

Содержание

Предисловие.....	4
1. ЗАДАЧИ С ОТВЕТАМИ.....	5
1.1. Физические свойства нефтей и нефтепродуктов.....	5
1.2. Гидравлические режимы работы нефте- и нефтепродуктопроводов.....	17
1.3. Трубопроводы с самотечными участками; вставки, лупинги, отводы.....	26
1.4. Гидравлические характеристики работы насосов и насосных станций.....	37
1.5. Совместная работа нефтеперекачивающих станций и трубопровода.....	48
1.6. Истечение жидкости из трубопровода при его повреждении.....	55
1.7. Неустановившиеся режимы работы трубопроводов....	65
1.8. Последовательная перекачка нефтепродуктов.....	79
1.9. Перекачка высоковязких нефтей и нефтепродуктов с подогревом.....	92
1.10. Физические свойства природных газов.....	105
1.11. Стационарные режимы работы <i>простых</i> газопроводов.....	114
1.12. Стационарные режимы работы <i>сложных</i> газопроводов.....	124
1.13. Расчет режимов работы центробежных нагнетателей газа.....	133
1.14. Переходные процессы в газопроводах. Специальные задачи.....	143
2. РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....	155
Рекомендуемая литература.....	349

Предисловие

Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа представляет собой учебное пособие для студентов технических вузов, а также факультетов и других учебных заведений нефтегазового профиля. Основное назначение книги состоит в том, чтобы дать изучающим теорию трубопроводного транспорта возможность приложить полученные знания к решению практических задач, а также проверить, усвоен ли пройденный материал настолько, что может быть использован на практике, или нет. Кроме того, задачи, содержащиеся в книге, ценны и сами по себе, поскольку служат методическим пособием по решению реальных проблем трубопроводного транспорта.

Для студентов и преподавателей нефтегазовых вузов настоящая книга служит материалом для учебной работы на семинарских занятиях. Задачи сборника сформулированы так, что содержат все необходимые данные для своего решения. В качестве технического средства для выполнения расчетов предполагается научный калькулятор. Подробные решения, содержащиеся во второй части книги, призваны помочь учащимся проверить правильность найденного решения, или в тех случаях, когда решение задачи вызывает трудности, показать, как оно находится.

Автор благодарит Е.Б. Герцог за всестороннюю поддержку.

Автор благодарит А.И. Владимирова, ректора РГУ нефти и газа И.М. Губкина, и С.М. Вайнштока, президента ОАО "АК "Транснефть", обеспечивших издание задачника.

Профессор М.В. Лурье,
Май-декабрь, 2002 г., Москва

Часть 1. ЗАДАЧИ С ОТВЕТАМИ

1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Справочный материал

Физические свойства нефтей и светлых нефтепродуктов, имеющие существенное значение для организации технологического процесса их транспортировки по трубопроводам, характеризуются плотностью ρ , а также динамической μ и кинематической ν вязкостями.

Плотность жидкости. Плотность ρ представляет собой массу жидкости в единице объема. Размерность плотности дается формулой M/L^3 . Единицей измерения плотности в системе СИ служит 1 кг/м^3 . Например, плотность бензинов составляет $730 - 760 \text{ кг/м}^3$, керосинов $780 - 830 \text{ кг/м}^3$, дизельных топлив $840 - 850 \text{ кг/м}^3$, нефтей – $840 - 960 \text{ кг/м}^3$.

При изменении давления и температуры плотность нефти или нефтепродукта также изменяется, поэтому ρ есть функция от давления p и температуры T , так что $\rho = \rho(p, T)$. Для расчета плотности в зависимости от температуры используется формула

$$\rho(T) = \rho_{20} [1 + \xi(20 - T)], \quad (1)$$

в которой ξ ($1/^\circ\text{C}$) - коэффициент объемного расширения; T - температура ($^\circ\text{C}$), а ρ_{20} - плотность жидкости при нормальных условиях ($T = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = p_{\text{атм.}} = 0,1013 \text{ МПа.}$) Для нефти и нефтепродуктов значения коэффициента ξ представлены в таблице 1. Из формулы (1) следует, что в тех случаях, когда $T > 20^\circ\text{C}$, $\rho < \rho_{20}$, а в тех случаях, когда $T < 20^\circ\text{C}$, $\rho > \rho_{20}$.

Таблица 1
Коэффициент ξ объемного расширения

Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент ξ , 1/°С
700-719	0,001225
720-739	0,001183
740-759	0,001118
760-779	0,001054
780-799	0,000995
800-819	0,000937
820-839	0,000882
840-859	0,000831
860-879	0,000782
880-899	0,000734
900-919	0,000688
920-939	0,000645

Для расчета плотности нефти или нефтепродукта в зависимости от давления используется формула

$$\rho(p) = \rho_{20} [1 + \beta(p - p_{\text{атм.}})] = \rho_{20} \left[1 + \frac{p - p_{\text{атм.}}}{K} \right], \quad (2)$$

в которой β (1/Па) называется *коэффициентом сжимаемости*, а $K = 1/\beta$ (Па) - *модулем упругости* жидкости. Средние значения модуля K упругости для бензинов составляют $\approx 10^9$ Па (1000 МПа); для керосинов, дизельных топлив и нефтей $\approx 1,5 \cdot 10^9$ Па (1500 МПа).

Используется также обобщенная формула, учитывающая как барическое, так и тепловое расширение:

$$\rho(p, T) = \rho_{20} \left[1 + \xi \cdot (20 - T) + \frac{p - p_{\text{атм.}}}{K} \right]. \quad (3)$$

Вязкие свойства жидкостей. Для характеристик свойств нефти и нефтепродуктов учитываются касательные напряжения τ , возникающие на площадках $d\sigma$, разделяющих слои жидкости, движущиеся с различными скоростями $u(y)$, рис. 1.1.

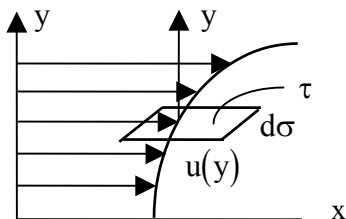


Рис. 1.1. К определению закона вязкого трения

Если для характеристик свойств нефти или нефтепродукта используется модель вязкой *ньютоновской жидкости*, то касательное напряжение τ полагается пропорциональным разности скоростей этих слоев, рассчитанной на единицу расстояния между ними:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}. \quad (4)$$

Касательное напряжение τ определяется как сила трения между слоями жидкости, разделенными выбранной площадкой, отнесенная к площади этой площадки:

$$[\tau] = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \frac{M \cdot L / T^2}{L^2} = \frac{M}{L \cdot T^2}.$$

Единицей измерения τ в системе СИ является Паскаль (Па) или $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$.

Коэффициент μ пропорциональности в законе (4) вязкого трения называется *коэффициентом динамической вязкости*. Размерность этого коэффициента такова:

$$[\mu] = [\tau] \cdot T = \frac{M}{L \cdot T}.$$

Единицей измерения μ в системе СИ является Пуаз, при этом $1 \text{ Пз} = 1/10 \cdot \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$. В частности, коэффициент динамической вязкости воды равен $0,01 \text{ Пз} = 0,001 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ или 1 сантиПуаз.

Коэффициент ν кинематической вязкости жидкости определяется как отношение μ/ρ :

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \frac{M/(L \cdot T)}{M/L^3} = \frac{L^2}{T}.$$

Единицей измерения ν в системе СИ является Стокс, при этом $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. В частности, коэффициент кинематической вязкости воды равен $0,01 \text{ Ст} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} = 1 \text{ санти Стокс (сСт)}$. Кинематическая вязкость бензина составляет примерно $0,6 \text{ сСт}$; дизельного топлива - $4 - 9 \text{ сСт}$; маловязкой нефти - $10 - 15 \text{ сСт}$ и т.д. Вязкость нефти и почти всех нефтепродуктов зависит от температуры. При повышении температуры вязкость уменьшается, при понижении - увеличивается.

Объемный расход Q ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальной трубе кругового сечения с радиусом r_0 под действием разности давлений Δp определяется формулой Гагена-Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot r_0^4 \Delta p}{8\mu L}, \quad (5)$$

в которой L - длина трубы. Расход аналогичного течения в вертикальной трубе, происходящего под действием силы тяжести, определяется формулой

$$Q = \frac{\pi \cdot r_0^4 \rho g}{8\mu} = \frac{\pi \cdot r_0^4 g}{8 \cdot \nu}, \quad (6)$$

где g – ускорение силы тяжести ($g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$).

Если шар с диаметром d_0 весьма медленно движется в вязкой несжимаемой жидкости со скоростью v , то со стороны жидкости на него действует сила F , называемая *стоксовским сопротивлением*:

$$F = 3\pi \cdot \mu v d_0. \quad (7)$$

В ряде случаев для характеристики свойств высоковязкой нефти или нефтепродукта используют модели **неньютоновских жидкостей**. Примером модели неньютоновской жидкости является модель *степенной жидкости Освальда*. Для этой модели справедливо соотношение

$$\tau = k \cdot \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \cdot \frac{du}{dy}, \quad (8)$$

где коэффициент k называется *консистентностью*, а n – показателем. Если $n < 1$, жидкость называют *псевдопластичной*, если $n > 1$ – *дилатантной* [3,8].

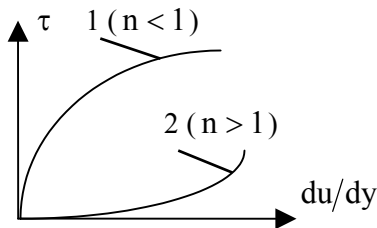


Рис. 1.2. Кривые течения степенной жидкости:
1 - псевдопластичной; 2 - дилатантной

Кривые течения, то есть зависимости касательного напряжения τ трения от du/dy ($1/c$), называемой *скоростью сдвига*, изображены на рис. 1.2.

Объемный расход Q ламинарного течения степенной жидкости в горизонтальной трубе кругового сечения с радиусом r_0 под действием разности давлений Δp определяется формулой:

$$Q = \frac{\pi r_0^3 n}{3n+1} \cdot \left(\frac{r_0 \Delta p / L}{2k} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (9)$$

Расход аналогичного течения в вертикальной трубе, происходящего под действием силы тяжести, определяется формулой

$$Q = \frac{\pi r_0^3 n}{3n+1} \cdot \left(\frac{r_0 \cdot \rho g}{2k} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{\pi r_0^3 n}{3n+1} \cdot \left(\frac{r_0 \cdot g}{2 \cdot k / \rho} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (10)$$

Другой моделью неньютоновской жидкости, используемой для характеристики свойств высоковязких нефтей, служит модель вязко-пластичной жидкости с предельным напряжением сдвига или модель *жидкости Шведова - Бингама*. Для нее справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}, \text{ если } \tau > \tau_0; \\ \frac{du}{dy} &= 0, \text{ если } |\tau| \leq \tau_0; \\ \tau &= -\tau_0 + \mu \frac{du}{dy}, \text{ если } \tau < -\tau_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Эти соотношения означают, что до тех пор, пока модуль касательного напряжения τ не превысит некоторой предельной величины τ_0 , являющейся характеристикой данной среды и называемой *предельным напряжением сдвига*, течение такой среды не

начинается (в этом случае $du/dy = 0$); и среда течет как вязкая жидкость, если $|\tau| \geq \tau_0$ (при этом $du/dy \neq 0$). Кривая течения вязко-пластичной жидкости представлена на рис. 1.3.

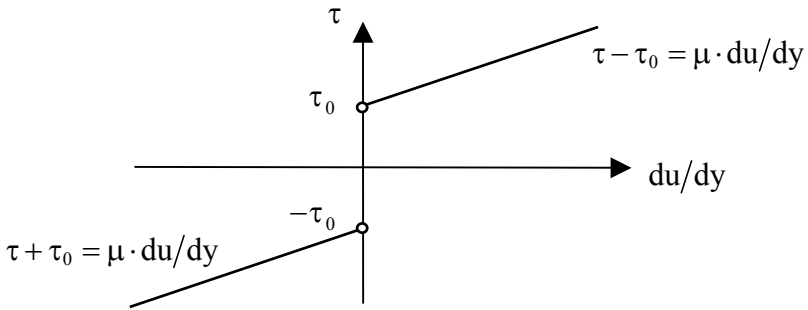


Рис. 1.3. Кривая течения вязко-пластичной жидкости

Объемный расход Q ламинарного течения вязко-пластичной жидкости Шведова-Бингама в горизонтальной трубе кругового сечения с радиусом r_0 под действием разности давлений Δp определяется формулой:

$$Q = \frac{\pi r_0^4 \Delta p / L}{8\mu} \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p / L} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p / L} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

Для начала такого течения должно выполняться условие

$$\Delta p > \frac{2\tau_0 \cdot L}{r_0} \quad \text{или} \quad \frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p / L} < 1.$$

Испаряемость жидкостей. При каждой температуре для нефти и нефтепродуктов существует давление p_y , при котором жидкая и паровая фаза находятся в термодинамическом равновесии. Это давление называют *упругостью насыщенных паров*, p_y .

(кг/м³). Например, упругость насыщенных паров бензина при $T = 20^{\circ}\text{C}$ составляет $\approx 0,07$ МПа, для различных керосинов, дизельных топлив и нефтей $p_{y.} \approx 0,01 \div 0,02$ МПа.

Для стабильных жидкостей $p_{y.} < 1,0$ атм. (0,1 МПа); для нестабильных - упругость насыщенных паров больше атмосферного давления.

Напомним, что $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$; $10^6 \text{ Па} = 1 \text{ МПа}$; $1 \text{ атм.} = 98100 \text{ Па}$, $1 \text{ МПа} \approx 10 \text{ атм.}$; *нормальное* атмосферное давление равно 0,1013 МПа.

Деформируемость трубопровода. Если нефть или нефтепродукт находятся в трубопроводе под давлением p большим, чем давление p_0 окружающей среды, то поперечное сечение трубопровода увеличено, причем увеличение Δd внутреннего диаметра и площади ΔS поперечного сечения даются формулами:

$$\Delta d = \frac{d_0^2}{2\delta \cdot E} \cdot \Delta p, \quad \Delta S = \frac{\pi \cdot d_0^3}{4\delta \cdot E} \cdot \Delta p, \quad (13)$$

где $\Delta p = p - p_0$; d_0 – номинальное значение диаметра; δ – толщина стенки трубопровода ($\delta \ll d_0$); E – модуль Юнга материала, из которого сделан трубопровод. Например, для трубных сталей $E \cong 2 \cdot 10^{11}$ Па или $2 \cdot 10^5$ МПа.

Объем V внутренней полости трубопровода изменяется, хотя и незначительно, при изменении температуры. Изменение ΔV объема внутренней полости трубопровода связано с тепловым расширением. В расчетах используют формулы

$$V(T) = V_0 \cdot [1 + \alpha_T(T - T_0)], \quad \text{и} \quad \Delta V = \alpha_T(T - T_0) \cdot V_0, \quad (14)$$

в которых V_0 – начальный объем трубопровода; T – температура трубопровода; T_0 – начальная температура; α_T – коэффици-

ент теплового (объемного) расширения металла, из которого сделан трубопровод (для сталей $\alpha_T \cong 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

При одновременном изменении давления жидкости в трубопроводе на величину Δp и температуры - на ΔT изменение ΔV объема трубопровода рассчитывают по формуле:

$$\Delta V = V_0 \cdot \left[\alpha_T (T - T_0) + \frac{d_0}{\delta \cdot E} (p - p_0) \right]. \quad (15)$$

ЗАДАЧИ

1. Плотность нефти при температуре 20°C равна 845 кг/м^3 . Вычислить плотность той же нефти при температуре 5°C .

Ответ. $855,5 \text{ кг/м}^3$.

2. Плотность нефти при температуре 5°C составляет 875 кг/м^3 . Вычислить плотность той же нефти при температуре 20°C .

Ответ. $864,9 \text{ кг/м}^3$.

3. Плотность зимнего дизельного топлива при температуре 12°C составляет 840 кг/м^3 . Какова будет его плотность при температуре 18°C ?

Ответ. $835,6 \text{ кг/м}^3$.

4. Температура авиационного керосина ТС-1 с номинальной плотностью $\rho_{20} = 825 \text{ кг/м}^3$ опустилась на 8°C . На сколько % увеличилась его плотность?

Ответ. На $0,71\%$.

5. Уровень нефти ($\rho_{20} = 850 \text{ кг/м}^3$) в вертикальном цилиндрическом резервуаре составлял утром 9 м , считая от дна резервуара. Определить, на сколько изменится этот уровень днем, когда средняя температура жидкости увеличится на 7°C .

Ответ. Повысится на $5,23 \text{ см}$.

6. Температура нефти ($\rho_{20} = 870 \text{ кг/ м}^3$) в вертикальном цилиндрическом резервуаре уменьшилась за сутки на 10°C . На сколько изменится уровень жидкости в резервуаре, если известно, что первоначально он составлял 6 м?

Ответ. Опустится на 4, 7 см.

7. Автомобильный бензин А-80 ($\rho_{20} = 730 \text{ кг/ м}^3$) хранится при температуре $T_0 = 15^\circ\text{C}$ в горизонтальной цилиндрической цистерне с диаметром котла 5 м и протяженностью 50 м. Горловина цистерны представляет собой вертикальный цилиндр с диаметром 2 м и высотой 3 м. Уровень бензина в горловине цистерны находится на 1 м ниже ее верхнего края. Определить, на сколько этот уровень понизится, если температура топлива уменьшится на 5°C .

Ответ. На 1,84 м.

8. Автомобильный бензин ($\rho_{20} = 730 \text{ кг/м}^3$) в цистерне бензовоза нагрелся на 25°C ., заполнив ее до нижнего среза горловины, в связи с чем объем топлива стал равен номинальному объему цистерны 10 м^3 . Определить, какой объем бензина будет зафиксирован в подземной емкости автозаправочной станции (АЗС) после слива цистерны, когда температура бензина уменьшится до температуры 15°C окружающего грунта.

Ответ. $9,825 \text{ м}^3$, т.е. на 175 л. меньше.

9. Каково изменение вместимости участка стального нефтепровода ($D = 820 \text{ мм}$, $\delta = 10 \text{ мм}$, $L = 100 \text{ км}$) при увеличении среднего давления находящейся в нем нефти на 10 атм.?

Ответ. $19,7 \text{ м}^3$.

10. Каково изменение вместимости участка стального нефтепровода ($D = 820 \text{ мм}$, $\delta = 10 \text{ мм}$, $L = 100 \text{ км}$) при увеличении средней температуры находящейся в нем нефти на 10°C .?

Ответ. $16,6 \text{ м}^3$.

11. Давление дизельного топлива ($\rho_{20} = 840 \text{ кг/ м}^3$) в практически горизонтальном участке нефтепродуктопровода ($D = 530 \text{ мм}$, $\delta = 8 \text{ мм}$, $L = 120 \text{ км}$) составляет 20 атм. Вычислить массу топлива на этом участке, если известно, что температура жидкости равна 15°C . Тепловым расширением трубопровода пренебречь.

Ответ. $\approx 21030,8 \text{ т}$.

12. Давление дизельного топлива ($\rho_{20} = 840 \text{ кг/ м}^3$) в практически горизонтальном участке нефтепродуктопровода ($D = 530 \text{ мм}$, $\delta = 8 \text{ мм}$, $L = 120 \text{ км}$) составляет 20 атм. Какую массу дизельного топлива нужно откачать из этого трубопровода, чтобы давление в нем снизилось до 10 атм.? Температуру считать постоянной, равной 15°C ; тепловым расширением трубопровода пренебречь.

Ответ. $\approx 20,3 \text{ т}$.

13. Согласно правилам технической эксплуатации нефтепродуктопроводов, в них производятся ежемесячные инвентаризации. Так, например, на 01 апреля на участке некоторого практически горизонтального нефтепродуктопровода ($D = 377 \text{ мм}$, $\delta = 8 \text{ мм}$, $L = 140 \text{ км}$) находился автомобильный бензин Аи-92 ($\rho_{20} = 750 \text{ кг/м}^3$) при температуре 7°C . Давления в начале и конце участка составляли 35 и 3 атм., соответственно. На 01 мая на рассматриваемом участке опять находился тот же бензин, однако его температура составляла 15°C , а давления - 45 и 5 атм., соответственно. Определить, на сколько изменилась масса бензина на данном участке нефтепродуктопровода.

Ответ. Уменьшилась на 85,485 т.

14. Найти зависимость изменения Δp давления в полностью заполненном жидкостью участке остановленного трубопровода от изменения ΔT температуры.

Ответ. $\Delta p = \frac{\xi - \alpha}{1/K + d_0/(\delta \cdot E)} \cdot \Delta T$, где d_0 – первоначальный внутренний диаметр трубопровода; δ – толщина его стенки; E – модуль Юнга; K – модуль упругости жидкости.

15. При опрессовке участка нефтепродуктопровода ($d_0 = 514$ мм, $\delta = 8$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\alpha_T = 3,3 \cdot 10^{-5}$ 1/°C), перекачивающего дизельное топливо ($\rho_{20} = 840$ кг/м³, $K = 1,5 \cdot 10^9$ Па, $p_y = 5 \cdot 10^3$ Па), в нем создали давление $p_1 = 2,5$ МПа; при этом температура нефтепродукта и трубы составила 10 °C. Определить, какое давление будет в испытуемом участке, если температура нефтепродукта (и трубы) понизится на 3 °C, т.е. станет равной 7 °C.

Ответ. 0,06 МПа (т. е. давление снизится почти на 25 атм.).

16. Определить динамическую вязкость нефти (900 кг/м³), если известно, что 300 мл этой нефти вытекают из камеры капиллярного вискозиметра через вертикальную цилиндрическую трубку с внутренним диаметром 2 мм за 500 с.

Ответ. $\cong 5,78$ сПз.

17. Определить кинематическую вязкость нефти, если известно, что 50 мл этой нефти вытекает из камеры вискозиметра через вертикальный цилиндрический капилляр с внутренним диаметром 2 мм за 4 мин.

Ответ. $\cong 18,5$ сСт.

18 Для определения вязкости нефти ($\rho_n = 900$ кг/м³) в нее брошена металлическая дробишка ($d = 0,5$ мм, $\rho = 7800$ кг/м³), которая под действием силы тяжести медленно опускается вниз с постоянной скоростью 0,5 см/с. Определить динамическую и кинематическую вязкости нефти.

Ответ. 188 сПз, 209 сСт.

19. Для выявления свойств парафинистой нефти проводят эксперименты по свободному истечению порции нефти объемом 200 мл из камеры вискозиметра. В первом опыте истечение происходит через вертикальный цилиндрический капилляр с внутренним диаметром 2 мм, а во втором - через аналогичный капилляр с внутренним диаметром 4 мм. В первом опыте время истечения оказалось равным 3000 с, во втором - 150 с. Считая нефть степенной жидкостью Освальда, найти константы n и k/ρ модели.

Ответ. $n = 0,756$, $k/\rho \cong 1,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^{1,244}$.

20. Эксперименты показали, что парафинистая нефть имеет предельное напряжение τ_0 сдвига, и ее свойства могут быть описаны в рамках модели вязко-пластичной жидкости Шведова-Бингама. Найти предельное напряжение сдвига, если для течения жидкости в горизонтальной трубке с внутренним диаметром 5 мм и длиной 50 см с расходом $3 \text{ см}^3/\text{с}$ необходима разность Δp давлений 150 кПа, а для течения с вдвое большим расходом - 200 кПа.

Ответ. $\tau_0 = 199 \text{ Па}$.

1.2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ НЕФТЕ- И НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ

Справочный материал

Основными уравнениями для расчета установившихся течений однородной несжимаемой жидкости в трубопроводе являются уравнение Бернулли

$$\left(\frac{\alpha_k \cdot v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{\alpha_k \cdot v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) = h_{1-2}, \quad (16)$$

а также уравнение сохранения массы жидкости

$$\rho \cdot v_1 S_1 = \rho \cdot v_2 S_2 = M, \quad (17)$$

записанные для потока жидкости в трубопроводах между сечениями 1 и 2. Здесь:

M – массовый расход жидкости (кг/с);

$$H(x) = \frac{\alpha_k \cdot v^2}{2g} + \frac{p(x)}{\rho g} + z(x) - \text{полный напор в сечении } x,$$

(м);

h_{1-2} – потери напора между сечениями 1 и 2 (м).

Для участка трубопровода, все сечения которого полностью заполнены жидкостью, $h_{1-2} = h_\tau + h_m$. Здесь:

$$h_\tau = \int_{x_1}^{x_2} \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} dx - \text{потери напора на трение;}$$

$$h_m = \sum_k \zeta_k \cdot \frac{v^2}{2g} - \text{потери напора на местных сопротивлениях}$$

(поворотах, задвижках, тройниках и т.п.);

$\lambda = \lambda(Re, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $Re = vd/\nu$ – число Рейнольдса; $\varepsilon = \Delta/d$ – относительная шероховатость; Δ – абсолютная шероховатость; α_k – коэффициент Кориолиса ($\alpha_k = 2$ для ламинарного течения; $\alpha_k \cong 1$ для турбулентного течения); ζ_k – коэффициент местного сопротивления.

Если трубопровод имеет постоянный диаметр, то уравнения (16) и (17) упрощаются:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + \sum_k \zeta_k \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (18)$$

$$v_1 = v_2 = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (19)$$

где L – расстояние между сечениями 1 и 2; Q – объемный расход жидкости.

Графическая интерпретация уравнения Бернулли представлена на рис. 1.4. На этом рисунке представлены: профиль трубопровода (жирная ломанная линия); линия $H(x)$ зависимости полного напора H от координаты x вдоль оси трубопровода (прямая линия с постоянным углом β наклона к горизонту) и три составляющие полного напора в произвольном сечении трубопровода: *геометрический напор* $z(x)$, *пьезометрический напор* $p(x)/\rho g$ и *скоростной напор* $\alpha_k v^2(x)/2g$. Линия $H(x)$, представляющая зависимость полного напора от координаты вдоль оси трубопровода, называется *линией гидравлического уклона*.

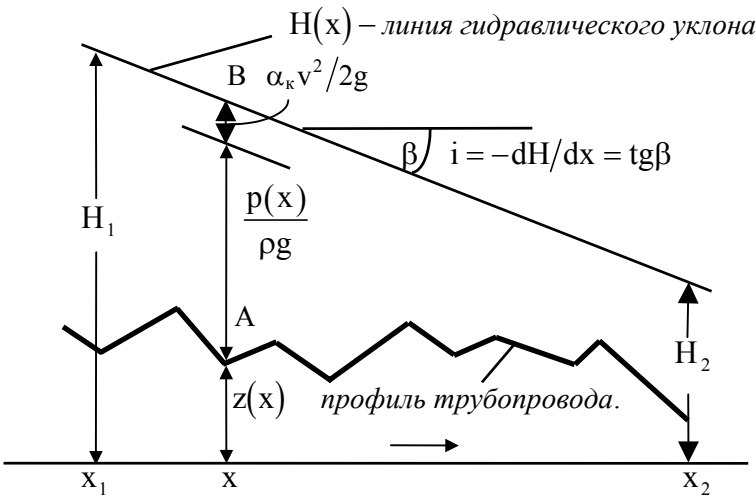


Рис. 1.4. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

Необходимым условием того, чтобы сечения трубопровода были заполнены жидкостью, является условие

$$p > p_y \text{ или } \rho g \cdot [H(x) - z(x)] > p_y, \quad (20)$$

где $p_{y.}$ – упругость насыщенных паров транспортируемой жидкости. Геометрически это условие означает, что линия $H(x)$ гидравлического уклона должна проходить выше профиля $z(x)$ трубопровода на величину $p_{y.}/\rho g$.

Безразмерную величину $i = -dH/dx$, определяющую уменьшение напора на единицу длины трубопровода, называют *гидравлическим уклоном*. Для трубопровода с постоянным диаметром существует следующее равенство:

$$i = \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (21)$$

Иногда гидравлический уклон измеряют в м/км, то есть в метрах падения напора на 1 км протяженности трубопровода (1 м/км соответствует $i = 0,001$).

Гидравлической (Q – H) – характеристикой участка трубопровода называется зависимость разности пьезометрических напоров $\Delta H = (p_1 - p_2)/\rho g$ в начале и конце участка от расхода Q транспортируемой жидкости. Если участок трубопровода не имеет парогазовых полостей, т. е. все его сечения заполнены жидкостью, то, как это следует из (18):

$$\Delta H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = (z_2 - z_1) + h_{1-2}(Q) \quad (22)$$

Коэффициент λ гидравлического сопротивления можно вычислить по следующим правилам.

Если течение жидкости в трубопроводе - *ламинарное*, то есть струйное, послойное (для этого число Рейнольдса Re должно быть меньше 2320), то для вычисления λ используется **формула Стокса**:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (23)$$

По мере увеличения числа Рейнольдса ($Re > 2300$) течение жидкости в трубопроводе постепенно теряет гидродинамическую устойчивость и переходит в *турбулентное*, то есть завихренное с перемешивающимися слоями. Наиболее известной формулой для расчета коэффициента λ в этом случае является **формула Альтшуля**:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\varepsilon + \frac{68}{Re} \right)^{1/4}, \quad (24)$$

справедливая в широком диапазоне чисел Рейнольдса, начиная от 10^4 до 10^6 и выше.

Если $10^4 < Re < 27/\varepsilon^{1,143}$, то формула Альтшуля переходит в другую формулу - **формулу Блазиуса**:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (25)$$

имеющую ту характерную особенность, что в нее так же, как и в формулу Стокса для ламинарного режима, не входит величина ε относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода. Последнее означает, что в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса трубопровод ведет себя как *гладкий*, поэтому течение жидкости в этом диапазоне называют даже течением в *гидравлически гладкой трубе*.

В области перехода течения от ламинарного к турбулентному, т. е. в диапазоне чисел Рейнольдса от 2320 до 10^4 , можно использовать аппроксимационную **формулу Гинзбурга**:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot (1 - \gamma_*) + \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \cdot \gamma_*, \quad (26)$$

в которой $\gamma_* = 1 - e^{-0,002 \cdot (Re - 2320)}$ – коэффициент *перемежаемости*. Очевидно, что конструкция последней формулы

обеспечивает непрерывность перехода от формулы Стокса для ламинарного режима течения к формуле Блазиуса для турбулентного режима в зоне гидравлически гладких труб.

Если же $Re > 500/\varepsilon$, то вторым слагаемым в круглой скобке формулы Альтшуля можно пренебречь по сравнению с первым, откуда следует, что при “больших” скоростях трение жидкости определяется, главным образом, степенью гладкости внутренней поверхности трубопровода, то есть параметром ε . В этом случае можно использовать более простую формулу - **формулу Шифринсона**:

$$\lambda = 0,11 \cdot \varepsilon^{0,25}. \quad (27)$$

Отсюда следует, что сопротивление трения пропорционально квадрату средней скорости жидкости, из-за чего рассматриваемый режим течения называют *квадратичным*.

ЗАДАЧИ

21. Средняя по сечению скорость v течения нефти ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) в трубопроводе ($D = 1020 \text{ мм}$; $\delta = 10 \text{ мм}$) равна $1,0 \text{ м/с}$. Определить годовую пропускную способность нефтепровода.

Ответ. 21,365 млн. т/год.

22. Нефтепродуктопровод состоит из двух последовательно соединенных участков: первого - с диаметром $D_1 = 530 \text{ мм}$ и толщиной стенки $\delta_1 = 8 \text{ мм}$, и второго с

диаметром $D_2 = 377$ мм и толщиной стенки $\delta_2 = 6$ мм. Скорость стационарного течения бензина в первом участке составляет 1,2 м/с. Какова скорость течения бензина во втором?

Ответ. 2,38 м/с.

23. Перекачка нефти ($\rho = 890$ кг/м³; $\mu = 0,015$ Пз.) ведется по нефтепроводу ($D = 530 \times 8$ мм) с расходом 800 м³/ч. Определить режим течения и вычислить коэффициент гидравлического сопротивления.

Ответ: Турбулентный режим в области гидравлически гладких труб; $\lambda \cong 0,0236$.

24. Перекачка бензина Аи-92 ($\rho = 750$ кг/м³; $\mu = 0,5$ сПз.) ведется по нефтепродуктопроводу ($D = 530 \times 8$ мм; $\Delta = 0,22$ мм) с расходом 1100 м³/ч. Определить режим течения и коэффициент гидравлического сопротивления.

Ответ: Турбулентный режим в области квадратичного трения; $\lambda \cong 0,016$.

25. Дизельное топливо Л-02-62 ($\rho = 840$ кг/м³; $\mu = 4,0$ сПз.) транспортируют по нефтепродуктопроводу ($D = 530$ мм; $\delta = 8$ мм; $\Delta = 0,22$ мм) с расходом 700 м³/ч. Определить режим течения и вычислить коэффициент гидравлического сопротивления.

Ответ: Турбулентный режим в области смешанного трения; $\lambda \cong 0,020$.

26. Чему равен гидравлический уклон на участке трубопровода ($D = 377$ мм, $\delta = 8$ мм, $\Delta = 0,15$ мм), транспортирующего дизельное топливо ($\nu = 5$ сСт.) с расходом 250 м³/ч?

Ответ. 1,37 м/км.

27. Данные о профиле нефтепровода, транспортирующего сырую нефть ($\rho = 850$ кг/м³), приведены в нижеследующей таблице

x, км	0	20	40	60	80	100	120
z, м	100	150	200	100	50	50	150
p, МПа	5,0						0,5

(x - координата сечения; z - геодезическая отметка). Найти давления в сечениях, пропущенных в таблице. Упругостью насыщенных паров нефти пренебречь; давление, выраженное в МПа, округлить с точностью до десятых.

Ответ.

X, км	0	20	40	60	80	100	120
p, МПа	5,0	3,9	2,8	3,0	2,7	2,0	0,5

28. Данные о профиле нефтепродуктопровода, транспортирующего бензин А-80 ($\rho = 735 \text{ кг/м}^3$), приведены в нижеследующей таблице

x, км	0	20	40	60	80	100
z, м	75	120	180	160	130	30
p, МПа		3,8		2,6		

(x - координата сечения; z - геодезическая отметка). Найти давления в сечениях, пропущенных в таблице. Давление, выраженное в МПа, округлить с точностью до десятых.

Ответ.

x, км	0	20	40	60	80	100
p, МПа	4,6	3,8	2,9	2,6	2,4	2,6

29. Построить гидравлическую ($Q - H$) – характеристику линейного участка нефтепровода ($D = 325 \times 8 \text{ мм}$, $L = 180 \text{ км}$), по которому транспортируется нефть ($\nu = 20 \text{ сСт}$), если известно, что профиль нефтепровода монотонно опускается вниз от отметки $z_n = 200 \text{ м}$ в начале участка до отметки $z_k = 100 \text{ м}$ в его конце. Потерями на местных сопротивлениях пренебречь. *Указание.* Заполнить пустые ячейки таблицы:

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	100	150	200	250	300
H, м					

Ответ.

Н, м	22	307	404	645	924
------	----	-----	-----	-----	-----

30. Построить гидравлическую ($Q - H$) – характеристику участка нефтепродуктопровода ($D = 530$ мм, $\delta = 7$ мм; $\Delta = 0,2$ мм, $L = 125$ км), по которому транспортируется дизельное топливо Л-05-62 ($\rho = 840$ кг/м³, $\nu = 9$ сСт), если известно, что профиль трубопровода монотонно поднимается вверх от отметки $z_n = 75$ м в начале участка до отметки $z_k = 180$ м в его конце. Потерями на местных сопротивлениях пренебречь. *Указание.* Заполнить пустые ячейки таблицы:

Q, м ³ /ч	800	900	1000	1100	1200
Н, м					

Ответ.

Н, м	408	479	559	646	740
------	-----	-----	-----	-----	-----

31. Нефтепродуктопровод состоит из двух последовательно соединенных участков: первого - $D_1 = 530 \times 8$ мм, $L_1 = 60$ км, и второго - $D_2 = 377 \times 6$ мм, $L_2 = 30$ км. Скорость стационарного течения бензина ($\nu = 0,6$ сСт) в первом участке составляет 1,2 м/с. Зная что шероховатость Δ внутренней поверхности участков составляет 0,15 мм, найти потери напора в нефтепродуктопроводе.

Ответ. 501 м.

32. По участку нефтепровода ($D = 820 \times 8$ мм, $L = 140$ км, $\Delta = 0,2$ мм, $z_n = 120$ м, $z_k = 160$ м) перекачивают маловязкую нефть ($\rho = 850$ кг/м³, $\nu = 7$ сСт) с расходом 2500 м³/ч. Какое давление необходимо поддерживать в начале участка, если в конце участка оно равно 3 атм.? Известно также, что все сечения нефтепровода заполнены нефтью полностью.

Ответ. 31,6 атм. ($\approx 3,1$ МПа).

33. Сырая нефть ($\rho = 890 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 10 \text{ сСт.}$) течет в практически горизонтальном участке нефтепровода ($D = 820 \times 10 \text{ мм}$, $L = 140 \text{ км}$) под действием разности давлений между началом и концом участка, равной 15 атм. Найти расход перекачки.

Ответ: $1809 \text{ м}^3/\text{ч.}$

34. Бензин А 76 ($\rho = 740 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,6 \text{ сСт.}$) перекачивают по трубопроводу ($D = 530 \times 7 \text{ мм}$, $\Delta = 0,2 \text{ мм}$; $L = 120 \text{ км}$; $z_{\text{н}} = 50 \text{ м}$, $z_{\text{к}} = 100 \text{ м}$), при этом давление в начале трубопровода составляет 55 атм. , а в конце - 3 атм. Найти расход перекачки.

Ответ: $1475 \text{ м}^3/\text{ч.}$

35. Пропускная способность $G_{\text{Б}}$ участка нефтепродуктопровода ($D = 530 \times 8 \text{ мм}$, $\Delta = 0,15 \text{ мм}$, $L = 125 \text{ км}$, $z_{\text{н}} = 50 \text{ м}$, $z_{\text{к}} = 150 \text{ м}$, где $z_{\text{н}}, z_{\text{к}}$ – высотные отметки начала и конца участка, соответственно) составляет на бензине ($\rho_{\text{Б}} = 740 \text{ кг/м}^3$, $\nu_{\text{Б}} = 0,6 \text{ сСт}$) $8,0 \text{ млн.т/год}$. Какова пропускная способность $G_{\text{Д}}$ того же участка трубопровода на дизельном топливе ($\rho_{\text{Д}} = 840 \text{ кг/м}^3$, $\nu_{\text{Д}} = 6,0 \text{ сСт}$), если известно, что давления в начале и конце участка при переходе с перекачки бензина на дизельное топливо не изменяются, а 1 год составляет 8400 часов?

Ответ. $7,34 \text{ млн.т/год.}$

1.3. ТРУБОПРОВОДЫ С САМОТЕЧНЫМИ УЧАСТКАМИ; ВСТАВКИ, ЛУПИНГИ, ОТВОДЫ

Справочный материал

Самотечным называется участок $[x_1, x_2]$ трубопровода, на котором жидкость течет неполным сечением, самотеком, под действием силы тяжести, рис. 1.5.

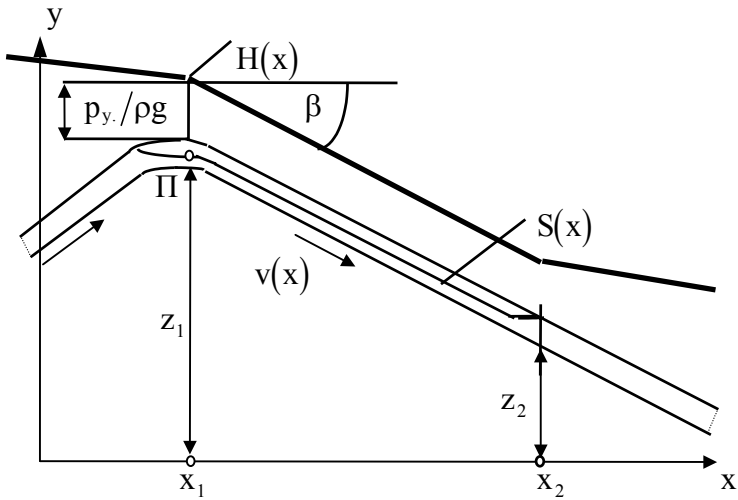


Рис. 1.5. Самотечный участок в трубопроводе

Давление в парогазовой полости над свободной поверхностью жидкости остается практически постоянным, равным упругости $p_{y.}$ насыщенных паров транспортируемой жидкости, поэтому течение на самотечном участке называют *безнапорным*. При этом разность напоров между сечениями x_1 (началом самотечного участка) и x_2 (концом самотечного участка) существует и равна разности $(z_1 - z_2)$ высотных отметок этих сечений

Стационарные самотечные участки в трубопроводе могут существовать только на нисходящих сегментах.

Начало Π каждого стационарного самотечного участка в трубопроводе называется *перевальной точкой*, рис. 1.5. На этом рисунке представлено поведение кривой гидравлического уклона, линии $y = H(x)$, на самотечном участке. Видно, что на этом участке линия гидравлического уклона проходит параллельно оси трубопровода на расстоянии $p_{y.}/\rho g$ от нее. Гидравлический уклон течения на самотечном участке равен абсолютной величине

тангенса угла наклона профиля трубопровода к горизонту, то есть $i = |\operatorname{tg}\beta|$.

Расход Q жидкости на самотечном участке в стационарном режиме равен расходу жидкости Q_0 в заполненных сечениях трубопровода

$$Q = v \cdot S = v_0 \cdot S_0 = Q_0 = \text{const.}, \quad (28)$$

где S, S_0 – площади сечений, занятых жидкостью на самотечном и полностью заполненном участках трубопровода ($S \leq S_0$), v, v_0 – скорости жидкости на этих участках, соответственно.

Степень $\sigma = S/S_0$ заполнения самотечного участка нефтью может быть различной, она зависит от отношения $\gamma = i/|\operatorname{tg}\beta|$ гидравлических уклонов ($\operatorname{tg}|\beta|$) на самотечном участке и ($i = \lambda \cdot 1/d \cdot v_0^2/2g$) на участках трубопровода, полностью заполненных нефтью. Обобщив многочисленные исследования в области безнапорных течений в каналах кругового сечения, можно предложить следующие аппроксимационные формулы для расчета степени заполнения сечения трубы нефтью на самотечном участке при расслоенном течении:

если $\gamma = i/|\operatorname{tg}\beta| \geq 1$, $\sigma = 1$. В этом случае сечение трубы заполнено полностью;

если $32,32 \cdot \lambda_0 \leq \gamma < 1$, то

$$\sigma = 1 - 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda_0}} \cdot (1 - \sqrt{\gamma});$$

если $4,87 \cdot \lambda_0 \leq \gamma < 32,32 \cdot \lambda_0$, то (29)

$$\sigma = 9,39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\lambda_0}} + 0,113;$$

если $\gamma < 4,87 \cdot \lambda_0$, то

$$\sigma = 0,1825 \cdot \left(\frac{2\gamma}{\lambda_0} \right)^{0,356}.$$

Формулы (29) позволяют рассчитать степень σ заполнения сечения трубопровода нефтью по известному отношению γ гидравлических уклонов i и $\text{tg}|\beta|$ на напорном и самотечном участках, соответственно.

Вставкой называют трубопроводный сегмент (BC), как правило, большего диаметра, чем основная магистраль, подключаемый к ней *последовательно* с целью снижения гидравлического сопротивления и увеличения пропускной способности, рис. 1.6.

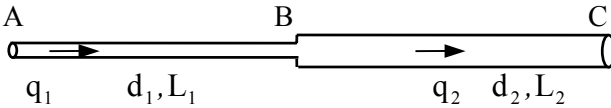


Рис. 1.6. Участок трубопровода со вставкой

Для вставки: справедливы соотношения:

$$\begin{cases} q_1 = q_2 = Q, \\ h_{A-C} = h_{A-B} + h_{B-C} \end{cases}, \quad (30)$$

т.е. расходы q_1 и q_2 нефти в основной магистрали и вставке одинаковы, а потери напора h_{A-B} и h_{B-C} в каждом из последовательно соединенных трубопроводов складываются.

В развернутом виде система уравнений (30) имеет вид:

$$\begin{cases} v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = Q, \\ h_{A-C} = \lambda^{(1)}(v_1, d_1) \cdot \frac{L_1}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \lambda^{(2)}(v_2, d_2) \cdot \frac{L_2}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g}. \end{cases}, \quad (31)$$

где L_1, d_1 и L_2, v_2 – длины и внутренние диаметры составляющих сегментов.

Лупингом (от английского слова “loop” - петля) называют дополнительный трубопровод, проложенный *параллельно* основной магистрали и соединенный с ней в двух сечениях: начальном x_1 и конечном - x_2 , рис. 1.7.

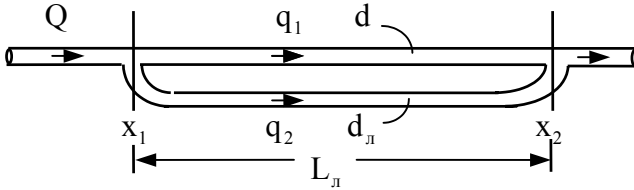


Рис. 1.7. Схема участка трубопровода с лупингом

Для лупинга справедливы соотношения:

$$\begin{cases} Q = q_1 + q_2, \\ h^{(1)}_{1-2} = h^{(2)}_{1-2}. \end{cases} \quad (32)$$

Они означают, что при разделении (или слиянии) потоков жидкости в точках разветвления расходы q_1 и q_2 складываются, а потери напора $h^{(1)}_{1-2}$ и $h^{(2)}_{1-2}$ в каждом из параллельно соединенных трубопроводов приравниваются.

В развернутом виде система уравнений (32) имеет вид:

$$\begin{cases} v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{л}}^2}{4} = Q, \\ \lambda^{(1)}(v_1, d) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = \lambda^{(2)}(v_2, d_{\text{л}}) \cdot \frac{1}{d_{\text{л}}} \cdot \frac{v_2^2}{2g}. \end{cases} \quad (33)$$

Эта система служит для определения двух неизвестных: v_1 и v_2 , скоростей течения жидкости в каждой из ветвей трубопровода.

Система легко разрешается в двух случаях.

1) Если режимы течения жидкости в каждом из трубопроводов находятся в зоне гидравлически гладких труб (зоне Блазиуса), то

$$\lambda^{(1)} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{v_1 d_{\pi}/\nu}} \quad \text{и} \quad \lambda^{(2)} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{v_2 d_{\pi}/\nu}}$$

и

$$q_1 = Q \cdot \frac{1}{1 + (d_{\pi}/d)^{19/7}}, \quad q_2 = Q \cdot \frac{(d_{\pi}/d)^{19/7}}{1 + (d_{\pi}/d)^{19/7}}. \quad (34)$$

Течение жидкости на участке с лупингом можно представить как течение на таком же участке без лупинга, но в трубопроводе с увеличенным (эквивалентным) диаметром d_3 . Для этого достаточно принять:

$$d_3 = d \cdot \left[1 + (d_{\pi}/d)^{19/7} \right]^{7/19}, \quad v_3 = \frac{4Q}{\pi d_3^2}, \quad (35)$$

$$i = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{v_3 d_3/\nu}} \cdot \frac{1}{d_3} \cdot \frac{v_3^2}{2g}.$$

2) Если режимы течения жидкости в каждом из трубопроводов находятся в зоне квадратичного трения, то $\lambda^{(1)} = \text{const.}$ и $\lambda^{(2)} = \text{const.}$ Из (33) получаем:

$$q_1 = Q \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda^{(2)}} \cdot (d_{\pi}/d)^{2,5}}, \quad q_2 = Q \cdot \frac{\sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda^{(2)}} \cdot (d_{\pi}/d)^{2,5}}{1 + \sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda^{(2)}} \cdot (d_{\pi}/d)^{2,5}};$$

$$i^{(1)} = i^{(2)} = i_0 \cdot \left[\frac{\sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda_0}}{1 + \sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda^{(2)}} \cdot (d_n/d)^{2,5}} \right]^2, \quad i_0 = \lambda_0 \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2g}, \quad (36)$$

где $v_0 = 4Q/\pi \cdot d^2$, λ_0 – скорость жидкости и коэффициент гидравлического сопротивления в неразветвленной части трубопровода, соответственно.

Течение жидкости на участке с лупингом можно представить как течение на таком же участке без лупинга, но в трубопроводе с увеличенным (эквивалентным) диаметром d_3 . Для этого достаточно принять:

$$i = \lambda_3 \cdot \frac{1}{d_3} \cdot \frac{v_3^2}{2g}, \quad \text{где } d_3 = d \cdot \left[\frac{1 + \sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda^{(2)}} \cdot (d_n/d)^{2,5}}{\sqrt{\lambda^{(1)}/\lambda_0}} \right]^{0,4}, \quad (37)$$

где λ_3 – коэффициент гидравлического сопротивления в неразветвленной части трубопровода, вычисленный по эквивалентному диаметру d_3 .

ЗАДАЧИ

36. Профиль участка нефтепродуктопровода ($L = 120$ км, $D = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,15$ мм) представлен таблицей:

x , км	0	10	15	20	30	40	60	80	120
Z , м	50	100	50	150	100	200	50	75	0

(x - координата сечения; z - геодезическая отметка). Давление p_k в конце участка равно 0,3 МПа. Какой минимальный расход дизельного топлива ($\rho = 840$ кг/м³, $\nu = 5$ сСт, $p_y = 0,01$ МПа) должен быть в трубопроводе, чтобы в нем не возникали самотечные участки?

Ответ. 775 м³/ч.

37. Профиль участка нефтепродуктопровода ($L = 120$ км, $D = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,15$ мм) представлен таблицей к предыдущей задаче № 36. Давление p_k в конце участка равно $0,3$ МПа. По трубопроводу перекачивают дизельное топливо ($\rho = 840$ кг/м³, $\nu = 5$ сСт., $p_y = 0,01$ МПа) с расходом 650 м³/ч. Определить, имеется ли в трубопроводе самотечный участок и если имеется, то где он расположен?

Ответ. Имеется между 40 и $49,942$ км.

38. Профиль участка нефтепровода $L = 150$ км, $D = 530$ мм, $\delta = 7$ мм) представлен таблицей:

х, км	0	25	50	75	100	125	150
z, м	100	100	150	200	50	0	50

(x - координата сечения; z - геодезическая отметка). По трубопроводу перекачивают нефть ($\rho = 850$ кг/м³, $\nu = 15$ сСт., $p_y = 0,03$ МПа). Определить давление p_n в начале участка нефтепровода, если расход Q перекачки составляет 500 м³/ч, а давление p_k в конце участка равно $0,3$ МПа.

Ответ. $\approx 1,57$ МПа.; в трубопроводе имеется самотечный участок, расположенный между 75 и $81,845$ км.

39. По участку нефтепродуктопровода ($L = 120$ км, $D = 529 \times 8$ мм, $\Delta = 0,2$ мм), сжатый профиль которого представлен таблицей:

х, км	0	20	40	60	80	100	120
z, м	50	100	150	100	200	120	40

(x - координата сечения; z - геодезическая отметка), ведется перекачка некоторого топлива ($\rho = 780$ кг/м³, $\nu = 3$ сСт., $p_y = 0,02$ МПа) с расходом 500 м³/ч, причем давление p_k в конце участка равно 1 атм. Как изменится расход перекачки, если давление в конце участка увеличить на 5 атм.?

Ответ. Не изменится.

40. Основываясь на условии предыдущей задачи, определить, на сколько нужно увеличить расход перекачки (сохранив при этом давление в конце участка трубопровода) для того, чтобы самотечный участок, имеющийся в трубопроводе, исчез.

Ответ. На 17,9 атм.

41. Данные о профиле нефтепродуктопровода, транспортирующего бензин ($\rho = 735 \text{ кг/м}^3$, $p_y = 0,07 \text{ МПа}$), приведены в нижеследующей таблице:

x, км	0	20	40	60	80	100
z, м	75	180	250	350	230	50
p, МПа	3,2					0,3

(x - координата сечения; z - геодезическая отметка). Определить, имеются ли в этом трубопроводе самотечные участки и, если есть, то где они расположены. Найти давления в сечениях, пропущенных в таблице. Давления, выраженные в МПа, округлять с точностью до десятых.

Ответ. Имеется один самотечный участок с началом в сечении 60 км и протяженностью 34,975 км.

x, км	0	20	40	60	80	100
p, МПа	3,2	2,1	1,2	0,1	0,1	0,3

42. Расход нефти на самотечном участке нефтепровода ($D = 720 \times 10 \text{ мм}$, $\alpha = -1^\circ$) равен $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Какова степень заполнения сечения трубопровода нефтью ($\nu = 25 \text{ сСт}$) на этом участке?

Ответ. 50,4 %.

43. Профиль нисходящего участка АВ нефтепродуктопровода ($L = 5000 \text{ м}$, $D = 530 \times 8 \text{ мм}$, $\Delta = 0,3 \text{ мм}$) наклонен к горизонту под углом $\alpha = 5^\circ$. При перекачке бензина ($\rho = 735 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,6 \text{ сСт}$) с расходом $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ нем образуется самотечный участок длиной 2000 м, считая от перевальной точки А. Определить объем парогазовой полости.

Ответ. 318 м^3 .

44. По участку нефтепровода ($L = 125$ км, $D = 530$ мм, $\delta = 7$ мм, $\Delta = 0,2$ мм) транспортируют нефть ($v = 8$ сСт.) с расходом 1000 м³/ч. Создаваемый перекачивающей станцией напор повысить нельзя, поэтому для увеличения пропускной способности участка на 20 % решено сделать вставку из трубопровода с большим диаметром ($D_{в.} = 720 \times 10$ мм, $\Delta_{в.} = 0,15$ мм). Какой длины должна быть такая вставка?

Ответ. 45,655 км.

45. Перекачка авиационного керосина (топлива самолета ТС-1), $\rho = 820$ кг/м³, $v = 2,5$ сСт., ведется с расходом $Q = 300$ м³/ч по участку практически горизонтального нефтепродуктопровода ($D = 325 \times 6$ мм, $\Delta = 0,15$ мм, $L = 120$ км). Для увеличения пропускной способности этого участка на 25 %, ввиду невозможности повысить рабочее давление на перекачивающей станции, решено сделать вставку, то есть заменить часть имеющегося трубопровода трубопроводом большего диаметра ($D_1 = 377 \times 7$ мм, $\Delta_1 = 0,2$ мм). Какой длины должна быть такая вставка?

Ответ. 80,42 км.

46. Нефтепродуктопровод состоит из трех последовательно соединенных участков: ($D_1 = 530 \times 8$ мм, $L_1 = 70$ км), ($D_2 = 505 \times 8$ мм, $L_2 = 50$ км), ($D_3 = 510 \times 7$ мм, $L_3 = 30$ км) с одинаковой шероховатостью внутренней поверхности. По трубопроводу перекачивают автомобильный бензин ($v = 0,6$ сСт) с расходом 1000 м³/ч. Каков эквивалентный внутренний диаметр нефтепродуктопровода?

Ответ. 502 мм.

47. Найти эквивалентный диаметр нефтепровода ($D = 720$ мм, $\delta = 10$ мм), моделирующий течение нефти на участке с лупингом ($D_{л.} = 530$ мм, $\delta_{л.} = 8$ мм), если извест

но, что течение нефти в обеих ветвях участка происходит в зоне гидравлически гладких труб.

Ответ. $d_s = 799$ мм.

48. По горизонтальному участку нефтепровода ($D = 820$ мм, $\delta = 10$ мм, $L = 120$ км) перекачивают сырую нефть ($v = 25$ сСт.) с расходом 2000 м³/ч. Требуется увеличить пропускную способность участка на 20 %. Поскольку увеличить давление на перекачивающей станции оказалось невозможным, то решили проложить лупинг с диаметром, равным диаметру основной магистрали. Определить длину такого лупинга.

Ответ. 46,228 км.

49. По горизонтальному участку нефтепровода ($D = 820 \times 10$ мм, $L = 120$ км) перекачивают сырую нефть ($\rho = 900$ м³/ч, $v = 25$ сСт.). Расход Q нефти в начале участка составляет 2000 м³/ч. В сечении $x = 40$ км существует отвод, через который ведется подкачка той же нефти с расходом $q = 500$ м³/ч. Какое давление необходимо поддерживать в начале участка для того, чтобы в конце участка оно составляло 0,5 МПа.

Ответ. 30,1 МПа.

50. Давление p_n в начале участка нефтепродуктопровода ($D = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,15$ мм, $L = 125$ км, $z_n = 25$ м) равно 5,5 МПа, а p_k в конце участка - 0,3 МПа ($z_k = 100$ м); по трубопроводу перекачивают дизельное топливо ($\rho = 840$ кг/м³, $v = 4$ сСт.). В сечении $x = 80$ км ($z_{80} = 75$ м) к трубопроводу присоединен практически горизонтальный отвод ($D_0 = 156 \times 5$ мм, $\Delta_0 = 0,1$ мм, $l_0 = 4000$ м). Найти расход жидкости в отводе, считая его полностью открытым и имеющим давление в конце, равное 0,2 МПа.

Ответ. 160 м³/ч.

1.4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ НАСОСОВ И НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Справочный материал

Для создания и поддержания в трубопроводе напора, достаточного для обеспечения транспортировки нефти или нефтепродукта, используют нефтеперекачивающие станции (НПС). Основное назначение каждой НПС состоит в том, чтобы забрать жидкость из сечения трубопровода с низким напором, увеличить этот напор и затем ввести транспортируемую жидкость в сечение трубопровода с высоким напором, поэтому главным элементом НПС являются насосы. Таким образом, насосы - это устройства для принудительного перемещения жидкости от сечения с меньшим значением напора $H_{в.}$ (в линии всасывания насоса) к сечению с большим значением напора $H_{н.}$ (в линии нагнетания). Величина $H = H_{н.} - H_{в.}$ разности напоров между линиями нагнетания и всасывания, то есть создаваемый насосом напор, называется *дифференциальным напором* насоса

$$H = H_{н.} - H_{в.} = \frac{p_{н.} - p_{в.}}{\rho g}. \quad (38)$$

Расход Q жидкости, проходящей через насос, называется его подачей.

Для перекачки нефтей и нефтепродуктов используют, в основном, центробежные насосы, в которых необходимый напор создается за счет центробежной силы. При этом, чем *больше* напор H , который должен создать такой насос, тем *меньше* подача Q , которую он может обеспечить. Зависимость $H = H(Q)$ называется гидравлической $(Q - H)$ – характеристикой насоса. Гидравлические характеристики центробежных насосов обычно представляют двучленной зависимостью

$$H = a - bQ^2, \quad (39)$$

в которой a и b – коэффициенты аппроксимации. Гидравлические $(Q - H)$ – характеристики некоторых центробежных насосов, предназначенных для перекачки нефти и нефтепродуктов, приведены в таблице 2.

Гидравлическая $(Q - H)$ – характеристика НПС складывается из соответствующих характеристик отдельных насосов станции, соединенных последовательно или параллельно, а также характеристик стационарных трубопроводов (системы обвязки) станции:

$$H_{\text{ст.}} = H_{\text{сум.}}(Q) - h_{\text{ст.}}(Q), \quad (40)$$

где $H_{\text{сум.}}(Q)$ – суммарная характеристика насосов, установленных на станции; $h_{\text{ст.}}(Q)$ – характеристика стационарных трубопроводов.

Полезная мощность $N_{\text{п}}$ насосной установки определяется формулой

$$N_{\text{п}} = \rho g \cdot Q \cdot H, \quad (41)$$

в которой H – дифференциальный напор, развиваемый насосом; Q – подача насоса. В системе СИ мощность измеряется в Ваттах:

$$[N_{\text{п}}] = \text{кг} / \text{м}^3 \times \text{м} / \text{с}^2 \times \text{м}^3 / \text{с} \times \text{м} = (\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2) / \text{с} = \text{Дж} / \text{с} = \text{Вт}.$$

Мощность $N_{\text{в}}$ на валу насоса определяется формулой

$$N_{\text{в.}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{н}}}, \quad (42)$$

где $\eta_{\text{н.}}$ – коэффициент полезного действия центробежного нагнетателя.

**Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации
характеристик некоторых центробежных насосов**

Тип насоса	Диаметр рабочего колеса, мм	а, м	б, $\text{м}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$
НМ 1250-260	440	331	$0,451 \cdot 10^{-4}$
НМ 2500-230	430	282	$0,792 \cdot 10^{-5}$
НМ 2500-230 на подачу $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$	405	251	$0,812 \cdot 10^{-5}$
НМ 2500-230 на подачу $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$	425	245	$0,160 \cdot 10^{-4}$
НМ 3600-230	450	304	$0,579 \cdot 10^{-5}$
НМ 3600-230 на подачу $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$	430	285	$0,644 \cdot 10^{-5}$
НМ 3600-230 на подачу $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$	450	273	$0,125 \cdot 10^{-4}$
НМ 5000-210	450	272	$0,260 \cdot 10^{-5}$
НМ 5000-210 на подачу $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$	470	286	$0,529 \cdot 10^{-5}$
НМ 5000-210 на подачу $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$	480	236	$0,484 \cdot 10^{-5}$
НМ 7000-210	455	299	$0,194 \cdot 10^{-5}$
НМ 10000-210 на подачу $7000 \text{ м}^3/\text{ч}$	505/484	305	$0,208 \cdot 10^{-5}$
НМ 10000-210 на подачу $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$	475/455	263	$0,197 \cdot 10^{-5}$

Потребляемая мощность $N_{\text{н.у.}}$ насосной установки (состоящей, как известно, из центробежного нагнетателя и привода) определяется формулой

$$N_{\text{н.у.}} = \frac{N_{\text{в.}}}{\eta_{\text{пр.}}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{н.}} \cdot \eta_{\text{пр.}}}, \quad (43)$$

в которой $\eta_{\text{пр.}}$ – коэффициент полезного действия привода насосной установки.

Коэффициент $\eta = \eta_{\text{н.}} \cdot \eta_{\text{пр.}}$ полезного действия насосной установки так же, как и дифференциальный напор, зависит от подачи Q насоса. Эту зависимость называют $(Q - \eta)$ - характеристикой насоса. Характеристику центробежного насоса обычно представляют в виде двухчленной формулы:

$$\eta = k \cdot Q - k_1 \cdot Q^2, \quad (44)$$

где k и k_1 – коэффициенты аппроксимации. В рабочем диапазоне подач коэффициент η , как правило, максимален (обычно $0,8 \div 0,85$).

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} H_i Q_i^2 - \sum_{i=1}^{i=5} H_i \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^4}{\left(\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2\right)^2 - 5 \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^4}, \quad b = \frac{5 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} H_i Q_i^2 - \sum_{i=1}^{i=5} H_i \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2\right)^2 - 5 \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^4},$$

и (45)

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{i=5} \eta_i Q_i \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^4 - \sum_{i=1}^{i=5} \eta_i Q_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^3}{\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^4 - \left(\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^3\right)^2}, \quad k_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=5} \eta_i Q_i \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^3 - \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} \eta_i Q_i^2}{\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} Q_i^4 - \left(\sum_{i=1}^{i=5} Q_i^3\right)^2}.$$

В проектной практике для аппроксимации гидравлических $(Q - H)$ и $(Q - \eta)$ - характеристик насоса используют паспортные кривые, а вычисление параметров a, b и k, k_1 осуществляют методом наименьших квадратов по 5 точкам (Q_i, H_i) и (Q_i, η_i) , лежащим на этих кривых.

На перекачивающих станциях центробежные насосы соединяют последовательно для увеличения напора или параллельно для увеличения расхода.

При **последовательном соединении насосов**, рис. 1.8, их $(Q - H)$ - характеристики складываются; при этом подача (расход) жидкости в насосах одна и та же, а напоры суммируются: $q_1 = q_2 = Q$; $H = H_1 + H_2$.

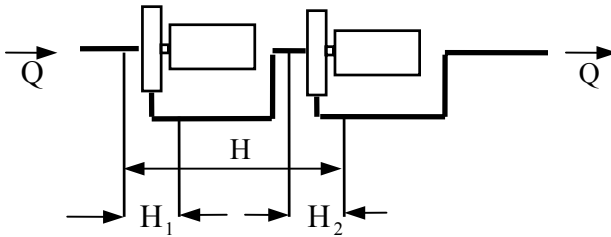
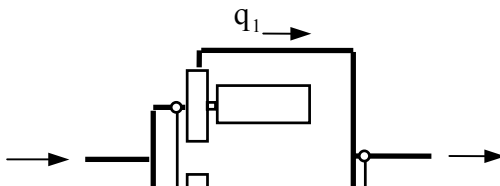


Рис. 1.8. Последовательное соединение насосов

Если $H = a_1 - b_1 \cdot Q^2$ - характеристика первого насоса, $H = a_2 - b_2 \cdot Q^2$ - характеристика второго насоса, то система двух последовательно соединенных насосов имеет характеристику

$$H = (a_1 + a_2) - (b_1 + b_2) \cdot Q^2. \quad (46)$$

При **параллельном соединении насосов**, рис. 1.9, их $(Q - H)$ - характеристики складываются иначе: подачи q_1 и q_2 (расходы) жидкости в насосах суммируются, а напор, создаваемый каждым насосом, один и тот же: $Q = q_1 + q_2$, $H = H_1 = H_2$.



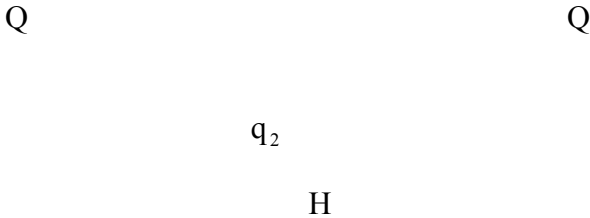


Рис. 1.9. Параллельное соединение насосов

Если $H = a_1 - b_1 \cdot Q^2$ – характеристика первого насоса, $H = a_2 - b_2 \cdot Q^2$ – характеристика второго насоса, то система двух параллельно соединенных насосов имеет характеристику

$$\sqrt{(a_1 - H)/b_1} + \sqrt{(a_2 - H)/b_2} = Q. \quad (47)$$

Рабочие характеристики центробежных насосов могут быть изменены путем изменения диаметра $D_{\text{к}}$ рабочего колеса или частоты ω вращения его вала. Измененная характеристика насоса при изменении диаметра $D'_{\text{к}}$ рабочего колеса или частоты ω' его вращения, связана с характеристикой насоса при номинальных значениях $D_{\text{к}0}, \omega_0$ этих параметров формулами:

$$H = a \cdot \left(\frac{D'_{\text{к}}}{D_0} \right)^2 - b \cdot Q^2 \text{ или } H = a \cdot \left(\frac{\omega'}{\omega_0} \right)^2 - b \cdot Q^2 \quad (48)$$

для изменения диаметра колеса и частоты вращения его вала, соответственно.

ЗАДАЧИ

51. С паспортной характеристики нефтяного центробежного насоса НМ сняты следующие значения H_i напоров и η_i коэффициентов полезного действия для соответствующих им значений Q_i расхода:

$Q_i, \text{ м}^3/\text{ч}$	250	500	750	1000	1250
$H_i, \text{ м}$	328	320	305	286	260
η_i	0,40	0,62	0,75	0,80	0,80

Представить $(Q - H)$ и $(Q - \eta)$ – характеристики этого насоса в виде парабол соответственно формулам (39) и (44).

Ответ. $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$; $\eta = 1,62 \cdot 10^{-3} Q - 0,81 \cdot 10^{-6} Q^2$.

52. С паспортной характеристики нефтяного центробежного насоса НМ сняты следующие значения H_i напоров и η_i коэффициентов полезного действия для соответствующих им значений Q_i расхода:

$Q_i, \text{ м}^3/\text{ч}$	2000	4000	6000	8000	14000
$H_i, \text{ м}$	380	360	340	310	180
η_i	0,35	0,60	0,78	0,85	0,82

Представить $(Q - H)$ и $(Q - \eta)$ – характеристики этого насоса в виде парабол соответственно формулам (39) и (44).

Ответ. $H = 378 - 1,02 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2$; $\eta = 0,181 \cdot 10^{-3} Q - 0,88 \cdot 10^{-8} Q^2$.

53. Разность давлений в линиях нагнетания и всасывания магистрального нефтяного насоса НМ 2500-230, рассчитанного на подачу $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ и перекачивающего сырую нефть ($\rho = 880 \text{ кг}/\text{м}^3$), равна 20 атм. Найти подачу (расход жидкости) насоса.

Ответ. $1708 \text{ м}^3/\text{ч}$.

54. Давление в линии всасывания центробежного насоса НМ 1250-260 равно 0,3 МПа. Определить давление в линии нагнетания этого насоса, если известно, что он ведет перекачку дизельного топлива ($\rho = 840 \text{ кг/м}^3$) с расходом $900 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Ответ. 2,73 МПа.

55. Два центробежных насоса НМ 1250-260, один с характеристикой $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2$, другой - с характеристикой $H = 301 - 0,387 \cdot 10^{-4} Q^2$, соединены последовательно. Какую характеристику будет иметь система этих двух насосов?

Ответ. $H = 632 - 0,838 \cdot Q^2$.

56. Два центробежных насоса НМ 5000-210 с характеристиками $H = 272 - 0,260 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$ (H - в м, Q - в $\text{м}^3/\text{ч}$), соединенные последовательно, развивают совместно напор 420 м. Определить расход перекачки.

Ответ. $4883 \text{ м}^3/\text{ч}$.

57. Два центробежных насоса НМ 1250-260, один с характеристикой $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2$, другой - с характеристикой $H = 301 - 0,387 \cdot 10^{-4} Q^2$, соединены параллельно. Какую характеристику будет иметь система этих двух насосов?

Ответ. $\sqrt{(331 - H)/0,451} + \sqrt{(301 - H)/0,387} = 10^{-2} \cdot Q$,
где H - в м, Q - в $\text{м}^3/\text{ч}$.

58. Определить подачу системы двух параллельно соединенных центробежных насосов, характеристики которых заданы уравнениями

$H = 270 - 0,465 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ и $H = 260 - 0,430 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$,
если известно, что развиваемый ими напор составляет 240 м.

Ответ. $1485 \text{ м}^3/\text{ч}$.

59. Два центробежных насоса, один с характеристикой $H = 330 - 0,415 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$, другой - с характеристикой $H = 280 - 0,315 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H – в м, Q – в м³/ч), соединенные параллельно, перекачивают вместе 2000 м³/ч. Определить напор, развиваемый системой этих двух насосов.

Ответ. 263,2 м.

60. Определить напор, развиваемый системой двух параллельно соединенных насосов НМ 5000-210, характеристики которых заданы уравнениями

$$H = 272 - 0,260 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \text{ и } H = 250 - 0,203 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2,$$

если известно, что они перекачивают сырую нефть с расходом 8000 м³/ч.

Ответ. 222,9 м.

61. Два центробежных насоса, один НМ-3600-230 с характеристикой $H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$, а другой - НМ 2500-230 с характеристикой $H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, м³/ч), соединенные параллельно, перекачивают нефть с суммарным расходом 1800 м³/ч, причем коэффициент η_1 полезного действия первого насоса оказался равным 0,78, а второго - 0,83. Каков коэффициент η полезного действия системы этих двух насосов?

Ответ. $\eta = 0,80$.

62. Два центробежных насоса, один НМ 2500-230 с характеристикой

$$H = 245 - 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2,$$

а другой НМ - с характеристикой

$$H = 295 - 0,363 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$$

(H - напор, м; Q - расход, м³/ч), соединенные параллельно, перекачивают нефть с суммарным расходом 1800 м³/ч, причем коэффициент η_1 полезного действия первого насоса

оказался равным 0,72, а второго - 0,80. Каков коэффициент η полезного действия системы этих двух насосов?

Ответ. $\eta = 0,733$.

63. Определить мощность на валу центробежного насоса НМ 3600-230 с подачей на 1800 м³/ч и диаметром рабочего колеса 450 мм при перекачке нефти ($\rho = 890$ кг/м³) с расходом 1650 м³/ч, если известно, что коэффициент η_n полезного действия центробежного нагнетателя при такой подаче равен 0,80.

Ответ. 1195,5 кВт.

64. Напорная характеристика центробежного насоса НМ 1250-260 имеет вид: $H = 295 - 0,363 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, м³/ч). Определить мощность, потребляемую насосной установкой при перекачке дизельного топлива ($\rho = 840$ кг/м³) с расходом 900 м³/ч, если известны коэффициенты полезного действия нагнетателя и привода, равные соответственно 0,82 и 0,95.

Ответ. 702,4 кВт.

65. Перекачку бензина необходимо вести с расходом 400 м³/ч, причем для этого достаточно, чтобы насос развивал напор не меньше, чем 325 м. Какой из двух указанных ниже насосов целесообразней использовать для этой цели:

насос НМ 360-460 с характеристиками

$$\begin{cases} H = 540 - 0,617 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2, \\ \eta = 0,456 \cdot 10^{-2} \cdot Q - 0,633 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \end{cases}$$

или насос НМ 500-300 с характеристиками

$$\begin{cases} H = 420 - 0,480 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2, \\ \eta = 0,328 \cdot 10^{-2} \cdot Q - 0,328 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \end{cases} ?$$

Ответ. НМ 500-300.

66. Гидравлическая $(Q - H)$ – характеристика центробежного насоса НМ 1250-260 с диаметром рабочего колеса 440 мм имеет вид: $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, $\text{м}^3/\text{ч}$). Определить, как изменится эта характеристика, если рабочее колесо обточить до диаметра 418 мм.

Ответ. $H = 299 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$.

67. Нефтяной магистральный насос НМ 3600-230 с диаметром рабочего колеса 450 мм, рассчитанный на подачу $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$, имеет гидравлическую $(Q - H)$ – характеристику: $H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, $\text{м}^3/\text{ч}$). Однако обнаружилось, что развиваемый насосом напор на 25 м превышает необходимый. На сколько нужно обточить рабочее колесо этого насоса, чтобы он развивал требуемый напор?

Ответ. На 21 мм.

68. Гидравлическая $(Q - H)$ – характеристика центробежного насоса с регулируемой частотой вращения рабочего колеса имеет вид: $H = 280 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, $\text{м}^3/\text{ч}$) при частоте вращения 3200 об/мин. Построить характеристики того же насоса при частотах вращения 2900 и 2600 об/мин.

Ответ. $H = 230 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$, $H = 185 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$.

69. Гидравлическая $(Q - H)$ – характеристика центробежного насоса с регулируемой частотой вращения рабочего колеса представлена при частоте вращения 3200 об/мин в виде: $H = 280 - 0,775 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{1,75}$ (H - напор, м; Q - расход, $\text{м}^3/\text{ч}$). Построить характеристики того же насоса при частотах вращения 2900 и 2600 об/мин.

Ответ. $H = 230 - 0,756 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{1,75}$, $H = 185 - 0,736 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{1,75}$.

70. Характеристика центробежного насоса с регулируемой частотой вращения при частоте вращения 3200 об/мин

имеет вид: $H = 280 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, м³/ч). Как и на сколько нужно изменить частоту вращения рабочего колеса, чтобы насос развивал напор 220 м при подаче 1000 м³/ч?

Ответ. Увеличить до 110 об/мин (т.е. до 3310 об/мин).

1.5. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ И ТРУБОПРОВОДА

Справочный материал

Уравнение баланса напоров для одного линейного участка нефте- или нефтепродуктопровода имеет вид, рис. 1.10:

$$[z_{\text{н}} + h_{\text{п}} + F(Q)] - [z_{\text{к}} + h_{\text{к}}] = h_{\text{н-к}}(Q) \quad (49)$$

или

$$[z_{\text{н}} + h_{\text{п}} + F(Q)] - [z_{\text{к}} + h_{\text{к}}] = i(Q) \cdot L = \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (49')$$

где $z_{\text{н}}, z_{\text{к}}$ – высотные отметки начала и конца участка, соответственно; $h_{\text{п}}$ – подпор перед перекачивающей станцией; $h_{\text{к}}$ – напор в конце участка; $H = F(Q)$ – гидравлическая ($Q - H$) – характеристика перекачивающей станции; Q – расход перекачки; $h_{\text{н-к}}(Q)$ – потери напора между началом и концом участка; $i(Q)$ – гидравлический уклон; $\lambda(Re, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; L – протяженность участка; $Re = vd/\nu = 4Q/(\pi d\nu)$.

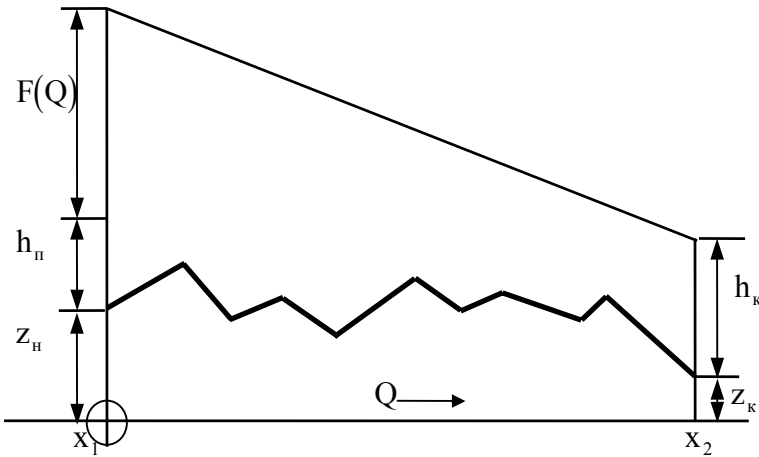


Рис. 1.10. Иллюстрация к уравнению баланса напоров

Для трубопровода, состоящего из нескольких участков, разделенных перекачивающими станциями, ведущими перекачку в режиме из насоса - в насос в случае отсутствия сбросов и подкачек жидкости, имеют место уравнения:

$$\begin{cases} [z_n + h_{n1} + F_1(Q)] - [z_2 + h_{n2}] = h_{1-2}(Q), \\ [z_2 + h_{n2} + F_2(Q)] - [z_3 + h_{n3}] = h_{2-3}(Q), \\ \dots \\ [z_n + h_{n,n} + F_n(Q)] - [z_k + h_k] = h_{n-(n-1)}(Q), \end{cases} \quad (50)$$

где $H = F_1(Q), H = F_2(Q), \dots, H = F_n(Q)$ – гидравлические характеристики перекачивающих станций; $h_{j-(j-1)}(Q)$ – потери напора на участках между станциями в зависимости от расхода Q перекачки; z_n, z_2, \dots, z_n – высотные отметки станций; $h_{n,1}, h_{n,2}, \dots, h_{n,n}$ – подпоры перед перекачивающими станциями; z_k, h_k – высотная отметка конца трубопровода и конечный напор, соответственно. Уравнения (50) представляют собой систему n алгебраических уравнений (по числу участков) с n неизвест-

ными величинами: расходом Q и $(n-1)$ подпорами $h_{n,j}$ перед промежуточными перекачивающими станциями.

1-е следствие (уравнение баланса напоров).

Почленное сложение уравнений системы (50) друг с другом дает уравнение, называемое уравнением баланса напоров для всего трубопровода:

$$(h_{n,1} - h_k) + \sum_{j=1}^{j=n} F_j(Q) = (z_k - z_1) + \sum_{j=1}^{j=n} h_{j-(j-1)}(Q). \quad (51)$$

Это уравнение служит для определения расхода Q жидкости (пропускной способности трубопровода), поскольку все неизвестные подпоры $h_{n,j}$ перед промежуточными перекачивающими станциями оказались исключенными.

Следует иметь в виду, что найденный из уравнения (51) расход Q может быть реализован в рассматриваемом трубопроводе только в том случае, если подпоры $h_{n,j}$ всех промежуточных станций будут больше минимально допустимого (гарантирующего бескавитационную работу насосов), а давления во всех сечениях трубопровода - меньше максимально допустимого, определяемого условиями прочности трубопровода.

2-е следствие (уравнение для подпоров на НПС).

Почленное сложение друг с другом только первых s ($s < n$) уравнений системы (50) дает уравнение для определения подпора $h_{n,s}$ перед s -й промежуточной НПС:

$$h_{n,s} = h_{n,1} + (z_n - z_k) + \sum_{j=1}^{j=s} [F_j(Q) - h_{j-(j-1)}(Q)]. \quad (52)$$

Расход Q , входящий в это уравнение, считается известным; он находится из уравнения (51).

При расчете потерь напора на участках трубопровода необходимо учитывать возможность существования на этих участках перевальных точек и самотечных сегментов.

ЗАДАЧИ

71. Два последовательно соединенных насоса НМ 1250-260, ($Q - H$) – характеристики которых имеют вид:

$$H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2,$$

($H -$ в м, $Q -$ в $\text{м}^3/\text{ч}$), осуществляют перекачку дизельного топлива ($\rho = 830 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\nu = 9 \text{ сСт}$) по участку трубопровода ($D = 530 \times 8 \text{ мм}$, $L = 120 \text{ км}$, $\Delta = 0,2 \text{ мм}$, $z_{\text{н}} = 50 \text{ м}$, $z_{\text{к}} = 100 \text{ м}$). Найти расход перекачки и давление в начале участка, если давление $p_{\text{к}}$ в конце участка составляет $0,3 \text{ МПа}$, подпор $h_{\text{п}}$ перед станцией равен 30 м и, кроме того известно, что самотечных участков в трубопроводе нет.

Ответ. $1071 \text{ м}^3/\text{ч}$, $4,79 \text{ МПа}$.

72. В практически горизонтальном нефтепродуктопроводе ($D = 325 \times 7 \text{ мм}$, $L = 140 \text{ км}$, $\Delta = 0,1 \text{ мм}$) ведется перекачка дизельного топлива ($\rho = 840 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\nu = 5 \text{ сСт}$). Перекачка осуществляется двумя одинаковыми насосами, соединенными последовательно. Характеристика каждого насоса имеет вид: $H = 365 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2$ ($H -$ в м, $Q -$ в $\text{м}^3/\text{ч}$). Как и насколько изменится расход перекачки, если один из насосов отключить? Принять $h_{\text{п}} = h_{\text{к}}$.

Ответ. Уменьшится с $301,8$ до $218,4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

73. По участку нефтепровода ($D = 820 \times 10 \text{ мм}$, $L = 125 \text{ км}$, $\Delta = 0,2 \text{ мм}$, $z_{\text{н}} = 75 \text{ м}$, $z_{\text{к}} = 140 \text{ м}$) ведется перекачка сырой нефти ($\rho = 870 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\nu = 9 \text{ сСт}$). Перекачка осуществляется двумя центробежными насосами НМ 3600-230,

соединенными последовательно. Характеристика каждого насоса имеет вид: $H = 285 - 0,644 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$ (H – в м, Q – в $\text{м}^3/\text{ч}$). Определить пропускную способность участка, если известно, что в трубопроводе самотечных участков нет.

Ответ. 3008 $\text{м}^3/\text{ч}$.

74. Для перекачки бензина ($\rho = 735 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,6 \text{ сСт}$) по участку нефтепродуктопровода ($D = 530 \times 7 \text{ мм}$, $L = 130 \text{ км}$, $\Delta = 0,15 \text{ мм}$, $z_{\text{н}} = 25 \text{ м}$, $z_{\text{к}} = 117 \text{ м}$) используют два насоса с характеристиками $H = 280 - 0,253 \cdot 10^{-3} Q^2$ (H – в м, Q – в $\text{м}^3/\text{ч}$), соединенные параллельно. Какую пропускную способность обеспечивает такой участок, если известно, что подпор станции равен 40 м, а давление в конце участка составляет 0,22 МПа?

Ответ. 691,5 $\text{м}^3/\text{ч}$.

75. Перекачка сырой нефти ($\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 25 \text{ сСт}$) ведется двумя насосами: НМ 2500-230 с характеристикой $H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$ и НМ 3600-230 с характеристикой $H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$, рассчитанными на подачу 1800 $\text{м}^3/\text{ч}$ и соединенными последовательно. Известно, что гидравлическая характеристика обвязки нефтеперекачивающей станции имеет вид $H = 0,15 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (здесь и выше H – в м, Q – в $\text{м}^3/\text{ч}$). Определить расход перекачки, если известно, что участок нефтепровода ($D = 820 \times 10 \text{ мм}$, $L = 150 \text{ км}$, $z_{\text{н}} = 80 \text{ м}$, $z_{\text{к}} = 120 \text{ м}$, $h_{\text{п}} = 70 \text{ м}$, $h_{\text{к}} = 40 \text{ м}$) носит относительно равнинный характер и на нем отсутствуют самотечные участки. Кроме того, известно, что потери напора на местных сопротивлениях составляют в данном участке $\approx 2\%$ от потерь напора на трение.

Ответ. 2246 $\text{м}^3/\text{ч}$.

76. Сжатый профиль участка керосинопровода ($D = 530 \times 8$ мм, $L = 120$ км, $\Delta = 0,15$ мм) представлен в таблице:

X, км	0	20	40	60	80	100	120
z, м	50	100	150	100	200	120	40

(x - координата сечения; z - высотная отметка). Перекачка керосина ($\rho = 820$ кг/м³, $\nu = 3,0$ сСт, $p_{\text{упр}} = 15$ кПа) осуществляется одним насосом НМ 1250-260, ($Q - H$) - характеристика которого имеет вид $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$, где H - в м, Q - в м³/ч. Найти расход перекачки, если известно, что подпор $h_{\text{п}}$ перед насосной станцией равен 40 м, а напор $h_{\text{к}}$ в конце участка трубопровода - 30 м.

Ответ. 864 м³/ч.

77. Перекачка авиационного керосина ($\nu = 3$ сСт) осуществляется в практически горизонтальном трубопроводе ($D = 325 \times 7$ мм, $\Delta = 0,15$ мм, $L = 114$ км) двумя центробежными насосами НМ 360-460, соединенными последовательно. Характеристика каждого насоса представляется уравнением $H = 565 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2$ (H - в м; Q - в м³/ч). Известен подпор $h_{\text{п}} = 40$ м перекачивающей станции и $h_{\text{к}} = 20$ м в конце трубопровода. Определить, какой протяженностью должен обладать лупинг с диаметром, равным диаметру основной магистрали, чтобы пропускная способность трубопровода увеличилась на 20 %.

Ответ. 61,98 км.

78. По участку трубопровода ($D = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,15$ мм, $L = 114$ км, $z_{\text{н}} = 20$ м, $z_{\text{к}} = 60$ м) перекачивают бензин ($\nu = 0,6$ сСт), причем перекачка ведется двумя одинаковыми соединенными последовательно насосами НМ 1250-260, с характеристиками $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ каждого (H - в м; Q - в м³/ч). К трубопроводу требуется подключить неф-

тебазу, находящуюся в 6 км от магистрали (координата x_0 точки подключения отвода равно 80 км, высотная отметка конца отвода $z_{к0} = 10$ м). Какой диаметр должен иметь отвод ($L_0 = 6$ км, $\Delta = 0,15$ мм, $\delta = 6$ мм) к нефтебазе, чтобы обеспечить расход сброса не менее $120 \text{ м}^3/\text{ч}$? Принять, что подпор $h_{п}$ станции и остаточные напоры $h_{к}$, $h_{к0}$ в конце трубопровода и отвода одинаковы и равны по 30 м.

Ответ. $D = 273 \times 6$ мм.

79. Нефтепровод ($L = 250$ км, $D = 720 \times 10$ мм, $\Delta = 0,2$ мм, $z_{н} = 130$ м, $h_{п} = 60$ м, $z_{к} = 100$ м, $h_{к} = 30$ м) состоит из двух последовательно соединенных участков: 100 и 150 км, соответственно. По нефтепроводу перекачивают сырую нефть ($\nu = 25$ сСт). На головной НПС работают два последовательно соединенные насоса НМ 2500-230 с характеристиками

$$H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$$

(H - в м, Q - в $\text{м}^3/\text{ч}$), а на промежуточной нефтеперекачивающей станции ($z_{с} = 200$ м) - два последовательно соединенные насоса НМ 3600-230 с характеристиками

$$H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

При этом кавитационный запас насосов составляет 40 м. Определить пропускную способность трубопровода и подпор промежуточной нефтеперекачивающей станции, если известно, что перевальные точки в нефтепроводе отсутствуют.

Ответ. $2066 \text{ м}^3/\text{ч}$; 49,9 м.

80. Нефтепровод с протяженностью 450 км состоит из трех линейных участков, данные о которых представлены в таблице, приведенной ниже. Подпор $h_{п}$ головной нефтеперекачивающей станции равен 50 м, а напор $h_{к}$ в конце трубопровода - 30 м.

№ п.п.	Длина, км	D, мм	δ , мм	z_n , м	z_k , м
1.	150	720	8	50	60
2.	180	720	8	60	70
3.	120	720	8	70	180

В начале каждого линейного участка находится нефтеперекачивающая станция с двумя одинаковыми последовательно соединенными насосами, характеристики которых даны в таблице:

№ п.п.	Марка насоса	(Q-H) - характеристика	Кавит. запас
1.	НМ 2500-230	$H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} Q^2$	40
2.	НМ 3600-230	$H = 285 - 0,640 \cdot 10^{-5} Q^2$	40
3.	НМ 5000-210	$H = 236 - 0,480 \cdot 10^{-5} Q^2$	40

Определить пропускную способность нефтепровода при перекачке нефти ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 30 \text{ сСт}$), а также подпоры промежуточных нефтеперекачивающих станций.

Ответ. 1832 м³/ч, 52,7 и 48,0 м.

1.6. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ЕГО ПОВРЕЖДЕНИИ

Справочный материал

Истечение жидкости через отверстие в трубопроводе. При нарушении герметичности резервуаров и трубопроводов истечение жидкости из отверстий в их стенках происходит, как правило, при переменном напоре.

Для преодоления жидкостью отверстия требуется некоторая разность давлений ($p_{\text{внут.}} - p_{\text{внеш.}}$) внутри трубопровода и вне него или в терминах напоров - разность напоров $\Delta H = (p_{\text{внут.}} - p_{\text{внеш.}}) / \rho \cdot g$. Если при этом размеры отверстия мно-

го меньше ΔH , то говорят о “*малом*” отверстии. Расход q жидкости через отверстие выражается формулой

$$q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H}, \quad (53)$$

в которой s – площадь отверстия, а μ – так называемый *коэффициент расхода*. Для отверстий в *тонких* стенках обычно принимают $\mu = 0,62$. Таким образом, для малых отверстий особенности его формы не играют существенной роли, а важна лишь площадь отверстия.

Если в трубопроводе ведут перекачку, то давление $p_{\text{внут.}}$ есть давление в том сечении трубопровода, в котором находится отверстие, а если истечение происходит в остановленном трубопроводе (самотеком), то возможны три случая [4].

Первый случай. Площадь s отверстия настолько мала, что вытекающая жидкость не создает в трубе сколько-нибудь заметного движения и жидкость в трубе можно считать покоящейся. Тогда для распределения давления в трубопроводе справедлива гидростатическая формула

$$p_{\text{внут.}} = p_y + \rho g \cdot (z - z_*),$$

где z – высотная отметка зеркала жидкости в трубопроводе, а z_* – высотная отметка сечения, в котором расположено сквозное отверстие. Если при этом внешнее давление считать равным атмосферному, то

$$p_{\text{внут.}} - p_{\text{внеш.}} = \rho g \cdot (z - z_*) - p_v.$$

Здесь $p_v = p_{\text{атм.}} - p_y$ – вакуумметрическое давление в полости, насыщенной парами перекачиваемой жидкости. В терминах напоров последнее уравнение имеет вид:

$$\Delta H = z - z_* - \frac{p_{в.}}{\rho g}, \quad (54)$$

то есть разность ΔH напоров, заставляющая вытекать жидкость через отверстие в стенке трубопровода, равна высоте “давящего” столба жидкости над отверстием за вычетом вакуумметрической высоты, создаваемой разрежением, образующимся в парогазовой полости трубы над зеркалом опускающейся жидкости. С учетом (54) формула (53) приобретает вид:

$$q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \left[(z - z_*) - \frac{p_{в.}}{\rho g} \right]}. \quad (55)$$

По мере вытекания жидкости высота z зеркала жидкости изменяется, так что z есть функция $z = z(t)$ времени t . Помимо этого, нужно учитывать, что длина столба опускающейся жидкости может уменьшаться как непрерывно, так и скачками - из нее могут исключаться целые участки трубопровода, имеющие \cup – образную форму. Это случается всякий раз, когда зеркало жидкости сравнивается по высоте с лежащей по ходу движения местной вершиной профиля.

Если жидкость вытекает через *малое* отверстие из сосуда, площадь $S(z)$ зеркала в котором известна в виде функции от его вертикальной отметки z , то время t_{1-2} снижения уровня жидкости от отметки z_1 до отметки z_2 ($z_* < z_2 < z_1$) представляется формулой:

$$t_{1-2} = - \int_{z_1}^{z_2} \frac{S(\xi)}{\mu s \sqrt{2g(\xi - p_{в.}/\rho g)}} d\xi. \quad (56)$$

В частном случае, если сосуд, о котором идет речь, есть *прямолинейный* участок трубопровода: $S(z) = S_0 = \text{const.}$, то

$$t_{1-2} = \frac{2S_0}{\mu s \sqrt{2g}} \cdot \left(\sqrt{z_1 - p_B / \rho g} - \sqrt{z_2 - p_B / \rho g} \right). \quad (57)$$

Второй случай. Площадь s отверстия в стенке трубы настолько велика, что можно пренебречь разностью напоров ΔH внутри и вне трубы в этом сечении. В этом случае предположение о гидростатическом распределении давления в трубопроводе неверно; в нем возникает интенсивное течение жидкости к месту аварии, так что значительная часть движущего напора теряется на преодоление сил внутреннего трения (гидравлические потери напора на трение). Поэтому для отверстий *большших* размеров разность ΔH напоров, входящая в формулу (53), **не выражается** формулой (54) через высотные отметки сечений трубопровода.

Для расчетов используют систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{p_y}{\rho g} + z_1(t) \right) - \left(\frac{p_{\text{атм.}}}{\rho g} + z_* \right) = \lambda(v_1) \cdot \frac{(x_* - x_1)}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2g}, \\ \left(\frac{p_y}{\rho g} + z_2(t) \right) - \left(\frac{p_{\text{атм.}}}{\rho g} + z_* \right) = \lambda(v_2) \cdot \frac{(x_2 - x_*)}{d} \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \\ \frac{dx_1}{dt} = v_1, \quad \frac{dx_2}{dt} = v_2, \quad q = (v_1 - v_2) \cdot S_0. \end{array} \right. \quad (58)$$

Здесь $x_1(t)$ — координата зеркала опускающейся жидкости в левой ветви трубопровода; $x_2(t)$ — в его правой ветви; $S_0 = \pi d^2 / 4$ — площадь сечения трубопровода.

Для каждого момента времени t из первого уравнения находят скорость v_1 движения жидкости в левой ветви трубопровода, из второго — скорость v_2 движения жидкости в правой вет-

ви трубопровода, а затем на основании третьего и четвертого уравнений сначала вычисляют изменения координат x_1 и x_2 :

$$dx_1 = v_1 dt \quad \text{и} \quad dx_2 = -v_2 dt,$$

и затем новые координаты $x_1(t + dt)$ и $x_2(t + dt)$:

$$x_1(t + dt) = x_1(t) + v_1 \cdot dt, \quad x_2(t + dt) = x_2(t) - v_2 \cdot dt.$$

Новые координаты зеркала жидкости в трубе позволяют найти соответствующие им высотные отметки Z_1 и Z_2 , и с помощью уравнений (58) повторить весь расчет заново. При этом нужно учитывать также и скачкообразные изменения координат x_1 и x_2 при отключении \cup – образных участков трубопровода, о которых говорилось в предыдущем случае.

Третий (общий) случай. Отверстие в стенке трубопровода таково, что необходимо учитывать потери напора при течении жидкости *слева* и *справа* к аварийному сечению, однако разностью напоров ΔH внутри и вне трубы в этом сечении пренебрегать также нельзя.

Течение *слева* от отверстия описывается уравнением:

$$\left(\frac{p_y}{\rho g} + z_1(t) \right) - \left(\frac{p_*}{\rho g} + z_* \right) = \lambda(v_1) \cdot \frac{(x_* - x_1)}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2g},$$

справа – уравнением:

$$\left(\frac{p_y}{\rho g} + z_2(t) \right) - \left(\frac{p_*}{\rho g} + z_* \right) = \lambda(v_2) \cdot \frac{(x_2 - x_*)}{d} \cdot \frac{v_2^2}{2g},$$

а расход q истечения жидкости через отверстие связан с разностью ΔH напоров формулой (53):

$$q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H}.$$

В этом случае процесс истечения из отверстия описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \left(\frac{p_y}{\rho g} + z_1(t) \right) - \left(\frac{p_*}{\rho g} + z_* \right) = \lambda(v_1) \cdot \frac{(x_* - x_1)}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2g}, \\
 \left(\frac{p_y}{\rho g} + z_2(t) \right) - \left(\frac{p_*}{\rho g} + z_* \right) = \lambda(v_2) \cdot \frac{(x_2 - x_*)}{d} \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \\
 (v_1 - v_2) \cdot S_0 = \mu \cdot s \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_* - p_{\text{атм.}})}{\rho}}, \\
 \frac{dx_1}{dt} = v_1, \quad \frac{dx_2}{dt} = -v_2.
 \end{array} \right. \quad (59)$$

При известных значениях x_1, x_2, x_* и z_1, z_2, z_* первые три уравнения системы (59) позволяют рассчитать три неизвестные величины: v_1, v_2 и p_* . Два последние уравнения дают возможность найти смещение границ x_1 и x_2 жидкости в трубопроводе, после чего процесс расчета повторяется.

Остаточный объем жидкости в трубопроводе. В процессе эксплуатации трубопровода существуют технологические операции, когда жидкость, заполнявшая внутреннюю полость трубопровода, сливается в резервуары через один из концов участка. При этом столб жидкости разрывается, и в трубопроводе образуются пустоты (x_2, x_3), (x_4, x_5) и т.д., заполненные парами транспортируемой жидкости, рис. 1.11. Расположение и объем таких пустот определяются профилем трубопровода.

Линия гидравлического уклона в рассматриваемом случае состоит из отрезков $[x_1, x_2]$, $[x_3, x_4]$ и т.д. горизонтальных прямых над полностью заполненными сегментами трубопровода и отрезков наклонных прямых, параллельных профилю трубопровода, там, где в трубопроводе образовались пустоты.

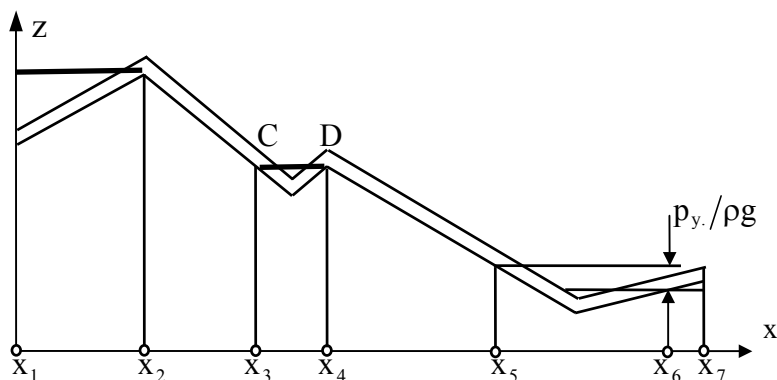


Рис. 1.11. Расчет остаточного объема жидкости в трубопроводе

Общий объем $V_{\text{ост.}}$ жидкости, оставшейся в трубопроводе, определяется как сумма объемов V_{CD} участков типа CD таких, что координаты их левых концов образуют монотонно возрастающую слева направо последовательность:

$$V_{\text{ост.}} = \sum_i V_{C_i D_i} \cdot \quad (60)$$

ЗАДАЧИ

81. Уровень бензина ($\rho = 735 \text{ кг/м}^3$) в вертикальном цилиндрическом резервуаре ($D = 15 \text{ м}$) составляет 8 м, считая от его дна. В боковой поверхности резервуара на высоте 1 м от дна образовалось круглое коррозионное отверстие с диаметром $d = 0,5 \text{ см}$, через которое бензин вытекал в течение 28 ч до тех пор, пока течь не устранили. Сколько тонн бензина потеряно?

Ответ. 10,53 т.

82. В дне подземного горизонтального цилиндрического резервуара - “сигары” ($L = 50$ м, $D = 8$ м), полностью заполненного дизельным топливом ($\rho = 840$ кг/м³), образовалась течь. Возникшее отверстие имеет площадь 1 см². Какое количество топлива может быть потеряно за сутки, если течь вовремя не устранить?

Ответ: 55,1 т.

83. В середине 2-км отвода ($D = 219 \times 6$ мм) от нефтепродуктопровода образовалось небольшое коррозионное отверстие ($d = 1$ мм), через которое бензин ($\rho = 740$ кг/м³, $p_y = 70$ кПа) вытекал в течение суток. Определить объем вытекшего топлива, если известно, что отвод состоит из двух равных по длине прямолинейных сегментов, наклоненных к середине участка под углом 3° ($\sin 3^\circ \cong 0,052$), что первоначально отвод был заполнен полностью и что упругостью трубы и паров жидкости можно пренебречь.

Ответ. 22,37 м³.

84. Определить объем нефти ($\rho = 870$ кг/м³, $\nu = 15$ сСт), вытекшей за 6 ч из работающего участка трубопровода ($D = 720 \times 10$ мм, $L = 120$ км, $z_n = 150$ м, $z_k = 100$ м) через отверстие ($x_* = 80$ км, $z_* = 50$ м) площадью 1 см² в его стенке, если известно, что избыточные давления p_n в начале и p_k в конце участка оставались постоянными и составляли 4,5 и 0,3 МПа, соответственно.

Ответ. 96,7 м³.

85. Определить объем нефти ($\rho = 870$ кг/м³, $\nu = 15$ сСт), вытекшей за 6 ч из работающего участка трубопровода ($D = 720 \times 10$ мм, $L = 120$ км, $z_n = 150$ м, $z_k = 100$ м) через отверстие ($x_* = 80$ км, $z_* = 50$ м) с площадью 25 см² в его стенке, если известно, что давления p_n в начале и p_k в кон-

це участка оставались постоянными и составляли 4,5 и 0,3 МПа, соответственно.

Ответ. 2285 м³.

86. В сечении $x = 26$ км нефтепродуктопровода ($D = 377$ мм, $\delta = 8$ мм) произошел полный разрыв трубы. Несмотря на то, что автоматика мгновенно перекрыла трубопровод задвижками, установленными в сечениях $x = 20$ и $x = 30$ км, предотвратить утечку все же не удалось и она происходила до полного вытекания жидкости. Определить, сколько нефтепродукта ($\rho = 730$ кг/м³, $p_y = 30$ кПа) вытекло, если профиль трубопровода между указанными выше задвижками задается таблицей:

x, км	20	22,5	23	24	25	26	27	28	30
z, м	100	120	200	150	170	100	180	75	190

(x - координата сечения; z - высотная отметка). Атмосферное давление принять равным 0,1 МПа.

Ответ. 246,45 м³.

87. Отвод ($L = 6$ км, $D = 156 \times 6$ мм) от магистрального нефтепродуктопровода (0-й км) к нефтебазе (6-й км) имеет профиль, представленный в таблице:

x, км	0	1,0	1,5	2,0	3,0	3,2	3,7	4,0	5,0	5,5	6,0
z, м	100	80	180	70	150	70	100	90	120	40	50

(x - координата сечения; z - высотная отметка). При открытых (на 0-м и 6-м км) задвижках бензин ($\rho = 735$ кг/м³) поступает в резервуар нефтебазы, а когда сброс нефтепродукта заканчивается, обе задвижки закрываются. Однако из-за не герметичности задвижки на нефтебазе бензин продолжает, хотя и медленно, стекать в резервуар нефтебазы. К моменту повторного открытия задвижек избыточное давление перед задвижкой на нефтебазе оказалось равным 0,45 МПа. Определить, какой объем бензина поступил на нефтебазу самотеком. Упругость насыщенных паров бензина принять равной 70 кПа.

Ответ. 3,58 м³.

88. Сквозное коррозионное отверстие площадью 4 мм² образовалось в стенке магистрального нефтепродуктопровода ($D = 377 \times 7$ мм) перекачивающего дизельное топливо ($\rho = 840$ кг/м³). Сечение, в котором образовалось отверстие, отстоит ровно на 56 км от перекачивающей станции участка ($L = 125$ км, $z_n = 100$ м, $z_k = 60$ м) трубопровода и имеет высотную отметку $z_* = 180$ м. Предположительная давность аварии оценена в 20 суток. Определить, какое количество нефтепродукта вытекло из трубопровода за это время, если известны давления $p_n = 4,5$ МПа и $p_k = 0,3$ МПа в начале и в конце участка, соответственно.

Ответ. 273,37 м³.

89. Передвижная насосная установка (ПНУ) военного полевого сборного трубопровода ($D = 156 \times 5$ мм) подает дизельное топливо ($\rho = 840$ кг/м³, $\nu = 6$ сСт, $p_y \approx 0$) на расстояние $L = 10$ км, причем избыточное давление p_n на выходе ПНУ равно 1,6 МПа, а расход Q составляет 80 м³/ч. Профиль трубопровода известен и представлен в таблице:

x , км	0	3,0	6,0	7,0	9,0	10,0
z , м	150	160	180	160	180	190

(x - координата сечения; z - высотная отметка сечения).

Пуля пробила сквозное отверстие с диаметром 8 мм в сечении $x = 5,5$ км. Через 20 мин ПНУ остановили, но отверстие смогли ликвидировать только через 6 часов. Сколько дизельного топлива потеряно?

Ответ. 11,08 м³.

90. В результате нарушения правил проведения земляных работ в зоне пролегания магистральных трубопроводов был порван керосинопровод ($D = 219 \times 6$ мм). Авария произошла в сечении $x = 12,0$ км трассы. В этот момент перекачка по трубопроводу не велась, но труба была полностью

заполнена авиационным керосином ТС-1 ($\rho = 780 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 2 \text{ сСт}$) и давление в месте аварии снизилось практически до атмосферного ($\approx 0,10 \text{ МПа}$). Глиняная пробка, перекрывшая трубопровод, была установлена только через 2 ч после аварии. Сколько керосина вытекло из трубопровода за это время, если профиль трубопровода в районе места аварии имеет следующий вид:

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

(x - координата сечения; z - высотная отметка сечения), а сечение $x = 20,0 \text{ км}$ - наивысшая точка профиля? Упругостью насыщенных паров керосина пренебречь.

Ответ. 44 м^3 .

1.7. НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

Справочный материал

Течение жидкости в трубопроводе, при котором гидравлические параметры (давление, скорость, расход, температура и т.п.) зависят не только от координаты x вдоль оси трубопровода, но и от времени t , называется *неустановившимся* или *нестационарным*. Такие течения описываются функциями $p(x,t)$, $v(x,t)$, $Q(x,t)$, $T(x,t)$ и др., определяющими как изменяются параметры течения в сечении x в зависимости от времени t .

Неустановившиеся процессы в трубопроводах возникают при пусках и остановках перекачки, включении или отключении отводов, работе запорной и регулирующей аппаратуры, а также при различных авариях - разрывах трубы и закупорках.

Для слабо сжимаемых жидкостей, каковыми являются нефть и нефтепродукты, неустановившиеся течения при полном *запол-*

нении сечений трубопровода жидкостью описываются дифференциальными уравнениями с частными производными

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = -\lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_0 v^2(x,t)}{2} - \rho_0 g \sin \alpha(x), \end{cases} \quad (61)$$

служащими для определения двух неизвестных функций: $p(x,t)$ – давления и $v(x,t)$ – скорости течения жидкости [3,8]. Здесь $\lambda(Re, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса $Re = vd/\nu$, вычисленного по мгновенной скорости $v = v(x,t)$, существующей в данном сечении трубопровода, причем для этого используются те же самые зависимости (23)-(27), которые справедливы для стационарных течений (*гипотеза квазистационарности*). Кроме того, ρ_0, d – невозмущенные значения плотности жидкости и диаметра трубопровода, соответственно; $\varepsilon = \Delta/d$ – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода; $\alpha(x)$ – угол наклона оси трубопровода к горизонту в сечении x ; $\sin \alpha(x) = dz/dx$.

Входящий в уравнения (61) коэффициент c является скоростью распространения волн давления (и расхода) в трубопроводе. Согласно Н.Е. Жуковскому, скорость c рассчитывается по формуле

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0}{K} + \frac{\rho_0 d}{E\delta}}}, \quad (62)$$

в которой K – модуль сжимаемости жидкости (Па); E – модуль Юнга материала, из которого изготовлен трубопровод (Па); δ – толщина стенки трубопровода. Для нефтей $K \approx 1,3 \div 1,4 \cdot 10^9$ Па, для нефтепродуктов $K \approx 1,0 \div 1,2 \cdot 10^9$ Па, для воды $K \approx 2,0 \div 2,1 \cdot 10^9$ Па. Модуль Юнга E для трубных сталей находится в пределах $1,8 \div 2,0 \cdot 10^{11}$ Па.

Тяжелая жидкость обладает инерцией, поэтому всякое изменение $\Delta v = v_1 - v_0$ скорости ее течения рождает скачкообразное изменение $\Delta p = p_1 - p_0$ давления, причем справедлива знаменитая формула Н.Е. Жуковского

$$\Delta p = \rho_0 c \cdot \Delta v. \quad (63)$$

Величину $|\Delta p|$ называют амплитудой волны (или *скачка*) давления.

Приведенным давлением \hat{p} называется сумма $p + \rho_0 g z$, отличающаяся от напора $(p/\rho_0 g + z)$ только множителем $\rho_0 g$. Для приведенного давления система дифференциальных уравнений (61) упрощается:

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{p}(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial \hat{p}(x,t)}{\partial x} = -\lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_0 v^2(x,t)}{2}, \end{cases} \quad (64)$$

она явно не содержит профиль $z(x)$ и потому более удобна в использовании.

Системы дифференциальных уравнений (61) или (64) решаются с начальными условиями, характеризующими распределение $\hat{p}(x,0)$ давления и $v(x,0)$ скорости течения в начальный $t = 0$ момент времени; краевыми условиями, отражающими то,

что происходит на концах $x = 0$ и $x = L$ трубопровода, а также условиями *сопряжения*. Последние выполняются в некоторых промежуточных сечениях $x = x_0$ и отражают влияние на работу трубопровода тех устройств, которые находятся в этих сечениях (например, задвижек, отводов для отбора или подкачки жидкости, аварийных отверстий и т.п.) [8].

Если произвести линеаризацию в законе сопротивления, считая последнее во всех случаях пропорциональным первой степени скорости $v(x, t)$, т. е. положить

$$\lambda(Re, \varepsilon) \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2(x, t)}{2} \approx \left\langle \lambda(Re, \varepsilon) \frac{1}{d} \cdot \frac{v(x, t)}{2} \right\rangle \cdot v(x, t) = b \cdot v(x, t),$$

где символ $\langle \rangle = b = \text{const.}$ обозначает среднее значение стоящей в скобках величины, то система дифференциальных уравнений, описывающих неустановившееся движение жидкости, упрощается и становится линейной:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{p}(x, t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p}(x, t)}{\partial x} = -b \cdot \rho_0 v(x, t). \end{cases} \quad (65)$$

Полученная система называется *системой телеграфных уравнений*, поскольку подобные уравнения используются для описания распространения сигналов в электрических линиях. Линеаризация исходных уравнений позволяет использовать для решения различные операционные методы.

Неустановившиеся процессы, возникающие в трубопроводе при смене одного стационарного течения другим, называются также *переходными* процессами. Если обозначить через v_0 скорость жидкости в трубопроводе до начала переходного процесса,

а через v_1 - скорость жидкости в новом установившемся течении, то согласно И.А. Чарному, можно принять:

$$\langle v(x,t) \rangle = \frac{2}{3} \cdot \frac{v_1^2 + v_1 v_0 - 2v_0^2}{v_1 - v_0}. \quad (66)$$

Для так называемых *длинных* трубопроводов и *не слишком быстрых* процессов в уравнениях (65) допустимо пренебрегать первым членом $\rho_0 \cdot \partial v / \partial t$ (инерцией жидкости) по сравнению со вторым членом, то есть считать, что так же, как и при стационарном течении, градиент давления $\partial \hat{p} / \partial x$ уравновешивается силой трения жидкости о внутреннюю поверхность трубопровода:

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \cong -b \cdot \rho_0 v(x,t). \quad (67)$$

В этих случаях система (65) сводится к одному уравнению второго порядка, называемому уравнением *типа теплопроводности*

$$\frac{\partial \hat{p}(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \hat{p}(x,t)}{\partial x^2}, \quad (68)$$

где $a^2 = c^2/b$ – постоянный коэффициент. При этом скорость $v(x,t)$ течения определяется выражением (67), то есть:

$$v(x,t) = -1/b \cdot \rho_0 \partial \hat{p}(x,t) / \partial x. \quad (69)$$

Если продифференцировать по x обе части уравнения (68) и исключить из него давление $\hat{p}(x,t)$ с помощью (69), то получится уравнение для скорости $v(x,t)$ течения:

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2}. \quad (70)$$

Если в *бесконечном* ($-\infty < x < +\infty$) трубопроводе, разделенном на две половины задвижкой, установленной в сечении $x = 0$, в начальный ($t = 0$) момент времени жидкость покоилась, причем давление слева от задвижки равнялось p^- , а справа - p^+ :

$$p(x,0) = \begin{cases} p^-, x < 0, \\ p^+, x > 0, \end{cases}, \quad p^- > p^+, \quad v(x,0) = 0, \quad (71)$$

то после мгновенного открытия задвижки в трубопроводе возникает течение жидкости в направлении от сечений с большими давлением к сечениям с меньшим давлением по закону:

$$p(x,t) = p^+ + \frac{p^- - p^+}{2} \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/\sqrt{4a^2t}} e^{-\zeta^2} d\zeta \right), \quad (72)$$

$$v(x,t) = -\frac{1}{b\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{a^2}{\rho_0 c^2} \cdot (p^- - p^+) \cdot e^{-\frac{x^2}{4a^2t}}.$$

ЗАДАЧИ.

91. Определить скорость распространения волн давления в стальном нефтепроводе ($D = 720 \times 10$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па), транспортирующем сырую нефть ($\rho_0 = 880$ кг/м³, $K = 1,32 \cdot 10^9$ Па).

Ответ. 1013 м/с.

92. Определить скорость распространения волн давления в стальном нефтепродуктопроводе ($D = 530 \times 8$ мм, $E = 1,8 \cdot 10^{11}$ Па), по которому ведется транспортировка автомобильного бензина ($\rho_0 = 730$ кг/м³, $K = 1,06 \cdot 10^9$ Па).

Ответ. 1026 м/с.

93. Найти скорость распространения волн давления в дюралевом керосинопроводе ($D = 30 \times 3$ мм, $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа, $\rho_0 = 780$ кг/м³, $K = 900$ МПа).

Ответ. 1023 м/с.

94. В нефтепроводе ($D = 720 \times 10$ мм, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па) произошло мгновенное (аварийное) перекрытие магистрали. Рассчитать повышение давления перед задвижкой и понижение давления после нее в первую секунду после закрытия, если нефть, которую перекачивают по трубопроводу с расходом 2200 м³/ч, имеет следующие параметры: $\rho_0 = 875$ кг/м³, $K = 1350$ МПа).

Ответ: $\pm 1,435$ МПа.

95. По трубопроводу ($D = 325 \times 7$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па) транспортируют дизельное топливо ($\rho = 840$ кг/м³, $K = 1,2 \cdot 10^9$ Па) с расходом 350 м³/ч. Внезапно на перекачивающей станции вышел из строя один из насосов, в результате чего расход мгновенно уменьшился на 130 м³/ч. Определить повышение давления в волне, которая начнет распространяться вверх по потоку, и разряжение в волне, которая начнет распространяться от станции вниз по потоку.

Ответ. 0,428 МПа.

96. На стык двух трубопроводов разного внутреннего диаметра d_1 и d_2 со стороны первой трубы приходит (падает) волна гидравлического удара с амплитудой $\Delta p_{\text{пад}}$. При этом образуются две волны давления: одна, отраженная, идущая в обратном направлении, имеет амплитуду $\Delta p_{\text{от}}$,

другая - с амплитудой $\Delta p_{\text{прох.}}$ проходит во вторую трубу. Выразить амплитуды $\Delta p_{\text{пад.}}$ и $\Delta p_{\text{прох.}}$ отраженной и проходящей волн давления через амплитуду $\Delta p_{\text{пад.}}$ падающей волны, если скорости распространения волн в первой и второй трубе равны c_1 и c_2 , соответственно.

Ответ.

$$\Delta p_{\text{прох.}} = \Delta p_{\text{пад.}} \cdot \frac{2 \cdot d_2^2 / c_2}{d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2},$$

$$\Delta p_{\text{от.}} = \Delta p_{\text{пад.}} \cdot \frac{d_2^2 / c_2 - d_1^2 / c_1}{d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2}.$$

97. К закрытому концу трубопровода движется волна гидравлического удара с амплитудой Δp . Определить повышение давления у закрытого конца после отражения от него волны гидравлического удара.

Ответ. $2\Delta p$.

98. Волна гидравлического удара, имеющая скорость c и амплитуду $\Delta p_{\text{пад.}}$, падает на местное сопротивление в трубопроводе, распадаясь при этом на две волны: проходящую и отраженную. Выразить амплитуды $\Delta p_{\text{прох.}}$ и $\Delta p_{\text{от.}}$ проходящей и отраженных волн, соответственно, если потери давления на местном сопротивлении связаны со скоростью v жидкости уравнением $\delta p = \zeta \cdot \rho_0 v^2 / 2$, где ρ_0 – плотность жидкости; ζ – коэффициент местного сопротивления, считающийся постоянным.

Ответ.

$$\Delta p_{\text{прох.}} = \frac{2\rho_0 c^2}{\zeta} \left[\sqrt{1 + \zeta \cdot \Delta p_{\text{пад.}} / \rho_0 c^2} - 1 \right],$$

$$\Delta p_{\text{от.}} = \frac{2\rho_0 c^2}{\zeta} \left[\sqrt{1 + \zeta \cdot \Delta p_{\text{пад.}} / \rho_0 c^2} - 1 \right] - \Delta p_{\text{пад.}}$$

99. В трубопроводе с диаметром d_0 , по направлению к точке его разветвления на два других трубопровода с диаметрами d_1 и d_2 движется волна гидравлического удара, имеющая скорость c_0 и амплитуду $\Delta p_{\text{пад.}}$. Найти амплитуды Δp_1 и Δp_2 волн давления, генерируемых в каждом из трубопроводов, если скорости их распространения в этих трубопроводах равны c_1 и c_2 . Найти также амплитуду $\Delta p_{\text{от.}}$ волны давления, отраженной от стыка трубопроводов и распространяющейся в обратном направлении.

$$\text{Ответ. } \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_{\text{пад.}} \cdot \frac{2 \cdot d_0^2 / c_0}{d_0^2 / c_0 + d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2},$$

$$\Delta p_{\text{от.}} = \Delta p_{\text{пад.}} \cdot \frac{d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2 - d_0^2 / c_0}{d_0^2 / c_0 + d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2}.$$

100. Найти повышение давления в трубопроводе ($D = 325 \times 7$ мм) в точке подключения к нему отвода ($D_0 = 219 \times 6$ мм), вызванного мгновенным закрытием последнего. Известно, что по трубопроводу транспортируют дизельное топливо ($\rho = 840$ кг/м³) и что расход жидкости в отводе перед его закрытием составлял 100 м³/ч. Скорости распространения волн давления в самом трубопроводе и в отводе принять одинаковыми, равными 1000 м/с.

Указание. Использовать результаты решения предыдущей задачи.

$$\text{Ответ. } 0,252 \text{ МПа } (\approx 2,57 \text{ атм.}).$$

101. На трубопроводе ($D_0 = 530 \times 8$ мм) имеется тупиковое (закрытое) ответвление ($D_1 = 219 \times 6$ мм), в котором жидкость покоится. По трубопроводу движется волна гидравлического удара с амплитудой $\Delta p = 0,8$ МПа, возбуждающая в тупиковом ответвлении течение жидкости по направлению к закрытому концу. Найти повышение давления у закрытого конца ответвления после отражения от него волны, приняв, что скорости распространения волн давления в трубопроводе и ответвлении равны друг другу.

Указание. Использовать результаты решения задачи №99.

Ответ. 1,46 МПа.

102. При полностью закрытой задвижке давления p_- до задвижки и p_+ после нее равны друг другу и составляют 0,5 МПа. Определить, на сколько изменятся эти давления при мгновенном закрытии задвижки, если известно, что по трубопроводу ($D = 377 \times 8$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па) перекачивают автомобильный бензин ($\rho = 735$ кг/м³, $K = 10^9$ Па, $p_y = 70$ кПа) с расходом 600 м³/ч.

Ответ. $\delta p_- = 1,262$ МПа, $\delta p_+ = 0,430$ МПа.

103. Две полости нефтепровода ($D = 325 \times 7$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па), заполненные нефтью ($\rho = 870$ кг/м³, $K = 1,3 \cdot 10^9$ Па), разделены пробковым краном с полнопроходным сечением. В левой полости нефтепровода давление составляет 2,0 МПа, в правой - 0,2 МПа. С каким расходом нефть начнет перетекать через кран, если последний мгновенно открыть?

Ответ. 262,4 м³/ч.

104. По участку нефтепродуктопровода ($D = 325 \times 6$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па) между двумя перекачивающими станциями, работающими в режиме “из насоса - в насос”, ведет-

ся перекачка автомобильного бензина ($\rho = 735 \text{ кг/м}^3$, $K = 1000 \text{ МПа}$), так что давление в конце участка составляет $0,4 \text{ МПа}$. В 5 км от конца участка имеется отвод ($D_0 = 156 \times 5 \text{ мм}$, $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$) к промежуточной нефтебазе, при открытии которого бензин начинает поступать на нефтебазу с расходом $80 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить, представляет ли опасность быстрое открытие отвода нормальному функционированию участка, если известно, что кавитационный запас насосов последующей станции составляет 40 м ?

Указание. Вычислить падение давления в точке подключения отвода к магистрали, вызванное мгновенным открытием отвода; использовать решение задачи № 99.

Ответ. Представляет, поскольку падение давления в волне разгрузки, вызванное мгновенным открытием отвода, составляет $\approx 0,2 \text{ МПа}$, что может снизить давление в линии всасывания последующей станции до значения, меньшего, чем кавитационный запас.

105. Короткий трубопровод оканчивается резервуаром, в котором давление можно считать постоянным. Первоначально жидкость в системе покоилась. Внезапно в трубопровод начали подавать жидкость с расходом Q . Возникающая волна давления распространяется по направлению к резервуару и отражается от него. Какой расход жидкости из трубы в резервуар установится сразу же после отражения от него волны давления? Трением пренебречь.

Ответ. $2Q$.

106. Приведенное давление $\hat{p}(x,t)$ и скорость $v(x,t)$ жидкости в трубопроводе в пренебрежении силами трения удовлетворяет системе уравнений, см. (64),

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{p}(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial \hat{p}(x,t)}{\partial x} = 0, \end{cases}$$

сводящейся к волновым уравнениям

$$\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}.$$

Показать, что на плоскости переменных (x, t) вдоль линий $x = c \cdot t + \text{const.}$ остается постоянной комбинация функций $I_1 = \hat{p}(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t)$, а вдоль линий $x = -c \cdot t + \text{const.}$ остается постоянной комбинация $I_2 = \hat{p}(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t)$.

Иными словами, показать, что

$$\text{если } \eta = x - ct = \text{const.}, \text{ то } I_1 = \hat{p}(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t) = \text{const.},$$

$$\text{если } \xi = x + ct = \text{const.}, \text{ то } I_2 = \hat{p}(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t) = \text{const.}$$

107. Пусть в начальный $t = 0$ момент времени давление и скорость жидкости в трубопроводе известны:

$$\hat{p}(x, 0) = \varphi(x); \quad v(x, 0) = \psi(x).$$

Какое течение возникает в бесконечном, то есть неограниченно простирающемся в обе стороны $(-\infty < x < +\infty)$ трубопроводе, при $t > 0$, если трением пренебречь?

Указание. Воспользоваться результатами решения предыдущей задачи № 106.

Ответ.

$$\hat{p}(x, t) = \frac{1}{2} \cdot [\varphi(x - ct) + \varphi(x + ct)] + \frac{\rho_0 c}{2} \cdot [\psi(x - ct) - \psi(x + ct)],$$

$$v(x, t) = \frac{1}{2\rho_0 c} \cdot [\varphi(x - ct) - \varphi(x + ct)] + \frac{1}{2} \cdot [\psi(x - ct) + \psi(x + ct)].$$

Замечание. Формулы, дающие решение этой задачи, называются *формулами Даламбера*.

108. В начальный момент времени $t = 0$ жидкость в трубопроводе покоилась: $v(x, 0) = 0$, а давление было постоянным: $p(x, 0) = p_0 = \text{const}$. Однако, начиная с этого момента и далее, в трубопровод через сечение $x = 0$ закачивают ту же жидкость, так что ее скорость в этом сечении изменяется по закону $v(0, t) = \psi(t)$. Определить давление $p(x, t)$ и скорость $v(x, t)$ течения, возникающего в трубопроводе, считая последний неограниченно простирающимся вправо от начального сечения (то есть в область $x > 0$). Трением в жидкости пренебречь.

Указание. Воспользоваться результатами решения задачи № 106.

Ответ. Пусть ρ_0 – плотность жидкости; c – скорость распространения волн давления. Тогда:

$$\text{при } x > ct : v(x, t) = 0, \hat{p}(x, t) = p_0;$$

$$\text{при } x < ct : \hat{p}(x, t) = p_0 + \rho_0 c \cdot \psi(t - x/c); v(x, t) = \psi(t - x/c).$$

109. При мгновенном закрытии задвижки в трубопроводе с внутренним диаметром d возникает волна гидравлического удара, амплитуда $\Delta_0 p$ которой в начальный момент времени связана со скоростью v_0 набегающего на задвижку потока формулой Н.Е. Жуковского $\Delta_0 p = \rho_0 c \cdot v_0$. Найти закон уменьшения скачка давления $\Delta_\phi p(t)$ на фронте ударной волны, приняв, что $\lambda_\phi \cdot v_\phi \approx \text{const} = \lambda_0 \cdot v_0$, где v_ϕ, λ_ϕ – значения скорости и коэффициента гидравлического сопротивления за фронтом ударной волны, а v_0, λ_0 – перед ним.

Замечание: принятое допущение $\lambda \cdot v = \text{const}$ выполняется в точности, если течения жидкости до и после фронта волны гидравлического удара являются ламинарными; в противном случае это допущение является лишь некоторым

приближением. Воспользоваться результатами решения задачи № 106.

Ответ. $\Delta_{\phi} p(t) = \rho_0 - v_0 \cdot \exp(-\lambda_0 v_0 t / 4d)$.

110. Перекачка дизельного топлива ($\rho_0 = 840 \text{ кг/м}^3$, $v = 10 \text{ сСт}$) в практически горизонтальном нефтепродуктопроводе ($D = 325 \times 7 \text{ мм}$, $L = 50 \text{ км}$) ведется одним насосом марки НМ 360-460, гидравлическая ($Q - H$) – характеристика которого имеет вид: $H = 565 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2$, где H – напор в м; Q – расход в $\text{м}^3/\text{ч}$. Подпор h_n перед насосом и напор h_k в конце трубопровода равны друг другу. На 35-м км трубопровода произошел разрыв трубы, вследствие чего давление в месте аварии мгновенно снизилось до атмосферного. Определить, через какое время волна разгрузки дойдет до насоса, на сколько упадет давление и увеличится расход жидкости в первые моменты после прихода волны. Принять, что $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $K = 1,32 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Указание. Воспользоваться результатами решения задачи № 109.

Ответ. 31,8 с; давление упадет на 0,668 МПа; расход увеличится на $106,3 \text{ м}^3/\text{ч}$.

111. В сечении $x = 0$ горизонтального участка нефтепровода ($D = 720 \times 8 \text{ мм}$, $L = 200 \text{ км}$, $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$), перекачивающего нефть ($\rho_0 = 900 \text{ кг/м}^3$, $v = 25 \text{ сСт}$, $K = 1,3 \cdot 10^9 \text{ Па}$) с расходом $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$, находится нефтеперекачивающая станция. После внезапного отключения одного из работающих насосов расход на станции упал до $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить, как будет изменяться расход перекачки в сечении $x = 75 \text{ км}$ вниз по потоку и каким он будет в этом сечении через 5 мин после отключения насоса.

Ответ. $1816 \text{ м}^3/\text{ч}$.

112. По участку практически горизонтального трубопровода ($D = 377 \times 8$ мм, $L = 200$ км, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па), перекачивают дизельное топливо ($\rho_0 = 840$ кг/м³, $\nu = 9$ сСт, $K = 1,1 \cdot 10^9$ Па) с расходом 600 м³/ч. При смене дизельного топлива бензином давление на выходе перекачивающей станции упало на 0,7 МПа. Определить, через какое время давление перед следующей перекачивающей станцией, отстоящей от данной на 100 км вниз по потоку, снизится пришедшей волной разгрузки на 0,25 МПа.

Ответ. 250 с.

1.8. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ПЕРЕКАЧКА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Справочный материал

Основным видом трубопроводного транспорта светлых нефтепродуктов (бензинов, керосинов, дизельных топлив) является *последовательная перекачка прямым контактированием* (batching). Последовательной перекачкой нефтепродуктов называется такой способ их транспортировки, при котором разносортные топлива, объединенные в партии по несколько тысяч или десятков тысяч тонн, закачивают в трубопровод последовательно одну за другой и транспортируют так до потребителя. При этом каждая партия вытесняет в трубопроводе предыдущую и в свою очередь вытесняется последующей. В конце трубопровода партии различных нефтепродуктов принимают в различные резервуары.

Последовательная перекачка осуществляется циклами. Каждый цикл формируется из нескольких партий, выстроенных в определенной последовательности, причем порядок следования выбирается таким, чтобы каждый нефтепродукт контактировал с двумя другими, наиболее близкими к нему по своим свойствам.

В зонах контакта последовательно движущихся партий образуется *смесь*, длина и объем которой увеличиваются по мере

продвижения партий нефтепродуктов по трубопроводу. На приемном пункте трубопровода смесь разделяют на несколько частей, которые затем добавляют к исходным нефтепродуктам в зависимости от имеющихся у них запасов качества (процесс, называемый *раскладкой смеси*).

При смешивании объемов V_1 и V_2 двух нефтепродуктов объем V_c получающейся смеси с большой степенью точности равен сумме составляющих его объемов:

$$V_c \cong V_1 + V_2. \quad (73)$$

Объемными концентрациями c_1 и c_2 (в дальнейшем - просто *концентрациями*) первого и второго нефтепродуктов в смеси называются отношения

$$c_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{V_1}{V_c}, \quad c_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2} = \frac{V_2}{V_c}, \quad (c_1 + c_2 = 1).$$

Объемные концентрации показывают, какую долю объема V_c смеси составляют объемы каждого нефтепродукта:

$$V_1 = c_1 \cdot V_c, \quad V_2 = c_2 \cdot V_c.$$

Плотность ρ_c смеси связана с плотностями ρ_1 и ρ_2 первого и второго нефтепродуктов формулой

$$\rho_c = \rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2, \quad (74)$$

а концентрации c_1 и c_2 выражаются через плотность смеси и плотности составляющих ее компонентов формулами:

$$c_1 = \frac{\rho_c - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2}, \quad c_2 = \frac{\rho_c - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1}, \quad (75)$$

Предельно допустимые концентрации $\theta_{\text{Д/Б}}$ дизельного топлива в бензине и $\theta_{\text{Б/Д}}$ бензина в дизельном топливе представляются формулами:

$$\theta_{\text{Д/Б}} = \frac{(T_{\text{кк}}^0 - T_{\text{кк}}) \cdot (T_{\text{кк}}^0 + T_{\text{кк}} - 248)}{2800 \cdot (\rho_{\text{Д}} - 753)}; \quad (76)$$

$$\theta_{\text{Б/Д}} = \frac{11,37}{T_{\text{В}} + 55} \cdot \lg \frac{T_{\text{В}}}{T_{\text{В}}^0}, \quad (77)$$

в которых $T_{\text{кк}}^0$ – температура конца кипения бензина по ГОСТ ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{кк}}$ – температура конца кипения бензина фактическая ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{В}}^0$ – температура вспышки дизельного топлива по ГОСТ ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{В}}$ – температура вспышки дизельного топлива по ГОСТ ($^{\circ}\text{C}$); $\rho_{\text{Д}}$ – плотность дизельного топлива, (кг/м^3).

Распределение $c(x, t)$ концентрации одного из нефтепродуктов в смеси, образующейся в области контакта при мгновенной смене одного нефтепродукта другим, представляется формулой

$$c(x, t) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{K \cdot t}} e^{-\zeta^2} d\zeta \right) = 0,5 \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{K \cdot t}} \right), \quad (78)$$

где x – координата вдоль оси трубопровода в подвижной системе отсчета, перемещающейся вместе с потоком со средней его скоростью v и имеющей начало в центре области смеси; t – время, прошедшая с начала ввода в трубопровод вытесняющей партии; K – коэффициент продольного перемешивания ($\text{м}^2/\text{с}$).

Длина l_c и объем V_c в симметричных пределах концентрации (от 0,01 до 0,99) выражаются формулами

$$l_c = 6,58 \cdot \sqrt{K \cdot \frac{L}{V}} = 6,58 \cdot Pe^{-0,5} \cdot L, \quad (79)$$

$$V_c = 6,58 \cdot S \cdot \sqrt{K \cdot \frac{L}{V}} = 6,58 \cdot Pe^{-0,5} \cdot V, \quad (80)$$

где L – длина трубопровода (пройденного смесью расстояния);
 $S = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения трубопровода;
 $V = S \cdot L$ – объем внутренней полости трубопровода;
 $Pe = vL/K$ – число Пекле [4].

Коэффициент K продольного перемешивания можно рассчитывать по различным формулам, например, по формуле Дж. Тейлора:

$$K = 1,785 \cdot \sqrt{\lambda} \cdot vd, \quad (81)$$

хотя, строго говоря, эта формула справедлива лишь для контакта нефтепродуктов, *близких* по своим физическим свойствам (двух сортов бензина или двух сортов дизельного топлива). В формуле (81) λ – коэффициент гидравлического сопротивления.

В промышленных расчетах используется формула Сьенитцера - Марона:

$$V_c = 1000 \cdot (\lambda_1^{1,8} + \lambda_2^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,43} \cdot V, \quad (82)$$

в которой λ_1 и λ_2 – коэффициенты гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам потока для первого и второго контактирующих нефтепродуктов, соответственно; V – объем внутренней полости трубопровода [4].

Если трубопровод состоит из нескольких последовательно соединенных участков труб с различными диаметрами d_1, d_2, \dots, d_n и длинами L_1, L_2, \dots, L_n , соответственно, то объем V_c образующейся смеси выражается формулой

$$V_c = \left(V_{c1}^{1/0,57} + V_{c2}^{1/0,57} + \dots + V_{cn}^{1/0,57} \right)^{0,57}, \quad (83)$$

где V_{ci} – объем смеси, который образовался бы на i -м участке, будь этот участок независимым трубопроводом, см. формулу (82):

$$V_{ci} = 1000 \cdot (\lambda_{1i}^{1,8} + \lambda_{2i}^{1,8}) \cdot \left(\frac{d_i}{L_i} \right)^{0,43} \cdot V_i;$$

$V_i = L_i \cdot \pi d_i^2 / 4$ – объем внутренней полости i -го участка.

Если область смеси двух контактирующих нефтепродуктов разделить на две части по сечению, в котором концентрация $s = 1/2$, то объем J примеси каждого из них в другом (т. е. объем одного нефтепродукта, попавшего в другой через это сечение) составляет $\approx 0,0858 \cdot V_c$.

Минимально допустимый объем $V_{нс}$ партии s -го нефтепродукта, поступающий на приемный пункт трубопровода и обеспечивающий полную раскладку образовавшейся смеси, определяется формулой:

$$V_{нс} = \frac{2 \cdot 0,0858}{\theta_{s/k}} \cdot V_c \cong \frac{0,172}{\theta_{s/k}} \cdot V_c, \quad (84)$$

в которой $\theta_{s/k}$ – предельно допустимая концентрация s -го нефтепродукта в контактирующем с ним k -м нефтепродукте (см. формулы (76) и (77)).

При минимальном запасе качества в 3°C по температуре конца кипения для бензинов и 3°C по температуре вспышки для дизельных топлив соотношения между минимально допустимы-

ми объемами $V_{пБ}$ и $V_{пД}$ партий бензина и дизельного топлива и объемом V_c образующейся смеси таковы:

$$V_{пБ} \geq 100 \cdot V_c, \quad V_{пД} \geq 85 \cdot V_c. \quad (85)$$

Годовое число N циклов последовательной перекачки нефтепродуктов определяется формулой:

$$N = \min \left\{ \frac{G_1}{V_{п1}}, \frac{G_2}{V_{п2}}, \dots, \frac{G_m}{V_{пm}} \right\}, \quad (86)$$

где G_1, G_2, \dots, G_m – годовые объемы нефтепродуктов, поступающие в пункт раскладки смеси; $V_{п1}, V_{п2}, \dots, V_{пm}$ – минимально допустимые объемы партий этих нефтепродуктов.

Вместимость $W_{ГПС}$ резервуарного парка головной перекачивающей станции (ГПС) нефтепродуктопровода определяется формулой:

$$W_{ГПС} = \frac{k}{N} \cdot \sum_{s=1}^{s=m} \left[\frac{G_s}{\eta_s} \cdot \left(1 - \frac{G_s}{8760 \cdot Q} \right) \right], \quad (87)$$

где G_1, G_2, \dots, G_m – годовые объемы нефтепродуктов, планируемые к транспортировке (m^3); Q – номинальная пропускная способность трубопровода ($m^3/ч$); η_s – коэффициент полноты использования резервуарной емкости под данный нефтепродукт ($\eta_s \approx 0,82 \div 0,85$); k – коэффициент неравномерности работы нефтепродуктопровода ($k \approx 1,2 \div 1,3$); N – годовое число циклов.

Аналогичная формула имеет место для вместимости $W_{КНП}$ резервуарного парка конечного наливного пункта (КНП):

$$W_{\text{КНП}} = \frac{k}{N} \cdot \sum_{s=1}^{s=m} \left[\frac{G_{\text{ск}}}{\eta_s} \cdot \left(1 - \frac{G_{\text{ск}}}{8760 \cdot Q} \right) \right] \quad (88)$$

с той только разницей, что входящие в эту формулу величины $G_{1к}, G_{2к}, \dots, G_{mk}$ представляют объемы нефтепродуктов, поступающие на наливной пункт трубопровода (в случае отсутствия путевой раздачи нефтепродуктов $G_s \equiv G_{\text{ск}}$); 8760 ч – число часов в календарном году [4].

ЗАДАЧИ

113. Последовательно перекачивают 3 нефтепродукта: автомобильный бензин А-76, дизельное топливо Л-62 летнее с температурой вспышки 62°C , дизельное топливо Л-40 летнее с температурой вспышки 40°C . Как разместить эти нефтепродукты в цикле?

Ответ. Л-40 \Rightarrow Л-62 \Rightarrow Л-40 \Rightarrow А-76 \Rightarrow Л-40 \Rightarrow и т.д.

114. Последовательно перекачивают 4 нефтепродукта: керосин тракторный, дизельное топливо Л-40, бензин автомобильный Аи 92 и бензин А 80. Как разместить эти нефтепродукты в цикле?

Ответ. Л-40 \Rightarrow К \Rightarrow Л-40 \Rightarrow А 80 \Rightarrow Аи 92 \Rightarrow А 80 \Rightarrow Л-40

115. В смеси 30 % бензина ($\rho_1 = 735 \text{ кг/м}^3$) и 70 % дизельного топлива ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$). Какова плотность смеси?

Ответ. $808,5 \text{ кг/м}^3$.

116. Смешали 400 кг керосина ($\rho_1 = 780 \text{ кг/м}^3$) и 100 кг дизельного топлива ($\rho_2 = 835 \text{ кг/м}^3$). Какова плотность смеси?

Ответ. 790 кг/м^3 .

117. Объем керосина ($\rho_1 = 780 \text{ кг/м}^3$) в смеси с дизельным топливом ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$) равен 400 л, а всего смеси - 500 л. Какова плотность смеси?

Ответ. 792 кг/м^3 .

118. Плотность смеси бензина ($\rho_1 = 735 \text{ кг/м}^3$) с дизельным топливом ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$) равна 810 кг/м^3 . Каковы концентрации бензина и дизельного топлива в смеси?

Ответ. 0,29 и 0,71.

119. Плотность смеси бензина ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$) и керосина ($\rho_2 = 780 \text{ кг/м}^3$) равна 750 кг/м^3 . Какова концентрация керосина в смеси?

Ответ. 0,4.

120. В резервуар, содержащий 8000 м^3 бензина ($\rho_1 = 735 \text{ кг/м}^3$), добавили 150 м^3 смеси ($\rho_c = 780 \text{ кг/м}^3$), образовавшейся при последовательной перекачке этого бензина с дизельным топливом ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$). Определить концентрацию примеси дизельного топлива в бензине.

Ответ. 0,0079.

121. Предельно допустимое содержание бензина ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$) в дизельном топливе ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$) составляет 0,2 %. Какой максимальный объем смеси этого дизельного топлива с бензином ($\rho_c = 800 \text{ кг/м}^3$) можно добавить в резервуар с 12000 м^3 дизельного топлива?

Ответ. $66,3 \text{ м}^3$.

122. Предельно допустимое содержание дизельного топлива в бензине ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$) составляет 0,12 %. Каков максимально возможный объем смеси ($\rho_c = 780 \text{ кг/м}^3$) этого бензина с дизельным топливом ($\rho_2 = 835 \text{ кг/м}^3$) можно добавить в резервуар с 17000 м^3 бензина?

Ответ. 43 м^3 .

123. Температура конца кипения бензина по ГОСТ составляет 185°C , а фактическая - 180°C . Определить предельно допустимое содержание дизельного топлива ($\rho_{\text{д}} = 840 \text{ кг/м}^3$) в этом бензине.

Ответ. 0,24 %.

124. Температура вспышки дизельного топлива по ГОСТ составляет 40°C , а фактическая - 45°C . Определить предельно допустимое содержание бензина в этом дизельном топливе.

Ответ. 0,58 %.

125. В резервуаре, содержащем 8000 м^3 бензина, температура конца кипения топлива составила 181°C , в то время как по ГОСТ она должна быть не выше 185°C . Какой максимальный объем смеси ($\rho_{\text{с}} = 760 \text{ кг/м}^3$) этого бензина ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$) с дизельным топливом ($\rho_2 = 835 \text{ кг/м}^3$) можно добавить в резервуар?

Ответ. 58 м^3 .

126. Температура вспышки дизельного топлива ($\rho_1 = 840 \text{ кг/м}^3$) в резервуаре с 10000 м^3 этого нефтепродукта оказалась равной 68°C , в то время как по ГОСТ она должна составлять 62°C . Какой максимальный объем смеси ($\rho_{\text{с}} = 805 \text{ кг/м}^3$) дизельного топлива с бензином ($\rho_2 = 730 \text{ кг/м}^3$) можно добавить в этот резервуар?

Ответ. 212 м^3 .

127. По нефтепродуктопроводу ($D = 530 \times 8 \text{ мм}$, $\Delta = 0,25 \text{ мм}$, $L = 750 \text{ км}$) последовательно перекачивают бензин ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$, $v_1 = 0,6 \text{ сСт}$) и дизельное топливо ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$, $v_1 = 9 \text{ сСт}$) с расходом $1100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить объем смеси, образующейся в каждом контакте партий этих нефтепродуктов, в симметричных пределах концентрации 0,01-0,99.

Ответ. 542 м^3 .

128. По нефтепродуктопроводу ($D = 377 \times 7$ мм, $\Delta = 0,19$ мм, $L = 420$ км) последовательно перекачивают бензин ($\rho_1 = 730$ кг/м³, $v_1 = 0,8$ сСт) и дизельное топливо ($\rho_2 = 840$ кг/м³, $v_1 = 10$ сСт) с расходом 500 м³/ч. Определить объем смеси, образующейся в каждом контакте партий этих нефтепродуктов, в симметричных пределах концентрации 0,01-0,99.

Ответ. 186 м³.

129. По нефтепродуктопроводу ($D = 325 \times 7$ мм, $\Delta = 0,2$ мм, $L = 650$ км) последовательно перекачивают бензин ($\rho_1 = 735$ кг/м³, $v_1 = 0,6$ сСт) и дизельное топливо ($\rho_2 = 840$ кг/м³, $v_1 = 9$ сСт) с расходом 400 м³/ч. Определить объем смеси, образующейся в каждом контакте партий этих нефтепродуктов, в симметричных пределах концентрации 0,01-0,99.

Ответ. 170 м³.

130. Во сколько раз увеличится объем смеси, образующейся при последовательной перекачке бензина ($v_1 = 0,6$ сСт) и дизельного топлива ($v_2 = 8$ сСт) в нефтепродуктопроводе ($D = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,2$ мм), если расход перекачки снизится с 1200 до 800 м³/ч?

Ответ. В 1,087 раз, то есть на 8,7 %.

131. Расход перекачки в нефтепродуктопроводе ($D = 325 \times 7$, $\varepsilon = \Delta/d = 2 \cdot 10^{-4}$) увеличили со 140 до 300 м³/ч. Во сколько раз уменьшится объем смеси при последовательной перекачке партий бензина ($v_1 = 0,8$ сСт) в контакте с партиями дизельного топлива ($v_2 = 8$ сСт)?

Ответ. В 1,324 раза.

132. Нефтепродуктопровод имеет 300 км трубы с диаметром $D_1 = 377 \times 8$ мм и 200 км трубы с диаметром $D_2 = 325 \times 6$ мм, причем относительная шероховатость ε

внутренней поверхности каждой составляет $\approx 2 \cdot 10^{-4}$. Найти объем смеси бензина ($v_1 = 0,6$ сСт) и дизельного топлива ($v_2 = 8$ сСт), образующегося при последовательной перекачке этих нефтепродуктов с расходом $300 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Ответ. 173 м^3 .

133. Магистральный нефтепродуктопровод состоит из 3-х последовательно соединенных участков: ($L_1 = 300$ км, $D_1 = 530 \times 8$ мм), ($L_2 = 200$ км, $D_2 = 377 \times 8$ мм), ($L_3 = 250$ км, $D_3 = 325 \times 7$ мм), имеющих примерно одну и ту же относительную шероховатость $0,0002$ внутренней поверхности. Найти объем смеси бензина ($v_1 = 0,6$ сСт) и дизельного топлива ($v_2 = 4$ сСт), образующегося при последовательной перекачке этих нефтепродуктов с расходом $400 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Ответ. 327 м^3 .

134. По нефтепродуктопроводу ($D = 530 \times 7$ мм, $\Delta = 0,2$ мм, $L = 250$ км) последовательно перекачивают бензин ($v_1 = 0,6$ сСт) и дизельное топливо ($v_1 = 4$ сСт) с расходом $1100 \text{ м}^3/\text{ч}$. При смене нефтепродукта на ГПС образуется 75 м^3 первичной технологической смеси. Определить полный объем смеси в конце трубопровода в симметричных пределах концентрации $0,01-0,99$.

Ответ. 264 м^3 .

135. Бензин ($\rho_1 = 735 \text{ кг/м}^3$, $v_1 = 0,6$ сСт) и дизельное топливо ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$, $v_1 = 9$ сСт) перекачивают по магистральному нефтепродуктопроводу ($D_1 = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,3$ мм, $L = 750$ км), с расходом $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Годовой объем перекачки составляет: по бензину $M_B = 2,5$ млн. т/год; по дизельному топливу $M_D = 5,0$ млн. т/год, причем промежуточные потребители, подключенные к трубопроводу отводами, забирают $0,5$ млн. т/год бензина и $1,0$ млн. т/год дизельного топлива.

Исходя из минимального запаса качества у транспортируемых нефтепродуктов 3°C по температуре конца кипения у бензина и 3°C по температуре вспышки у дизельного топлива, определить:

- максимально возможное годовое число циклов перекачки;
- вместимость резервуарного парка ГПС.

Принять, что коэффициент η полноты использования резервуарной емкости равен 0,82 и коэффициент k неравномерности работы трубопровода - 1,2.

Ответ. 46 циклов, 127 тыс. м^3 .

136. Используя условие предыдущей задачи определить, на сколько увеличилось бы годовое число циклов последовательной перекачки бензина и дизельного топлива, а также на сколько уменьшилась бы вместимость емкость резервуарного парка ГПС, если бы нефтеперерабатывающий завод гарантировал запас качества по температуре конца кипения бензина не 3°C , а 6°C , то есть поставлял бы для перекачки бензин с температурой конца кипения 189°C против 195°C по ГОСТ.

Ответ. С 46 до 91 цикла; с 127 до 64,2 тыс. м^3 .

137. По нефтепродуктопроводу ($D = 273 \times 6$ мм, $\Delta = 0,15$ мм, $L = 180$ км) с расходом $280 \text{ м}^3/\text{ч}$ перекачивают 2 сорта бензина А 76 (300 тыс. т/год) и Аи-92 (100 тыс. т/год), плотности и вязкости которых можно считать приближенно равными: $\rho = 735 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\nu = 0,6$ сСт. Октановые числа бензинов А 76 и Аи-92 (по исследовательскому методу) равны 76 и 87, соответственно. Определить максимально возможное годовое число циклов перекачки данных бензинов, если их смесь раскладывается поровну между партиями каждого сорта и изменение октанового числа каждого из бензинов недопустимо более, чем на 0,1. Известно, что при смешении бензинов с разными октановыми числами отклонения окта-

нового числа смеси от октановых чисел составляющих ее бензинов пропорциональны их концентрациям.

Ответ. 173.

138. Определить гидравлический уклон участка нефтепродуктопровода ($D = 377 \times 8$ мм, $\Delta = 0,2$ мм), транспортирующего дизельное топливо ($\nu = 5$ сСт) с расходом $500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Как изменится гидравлический уклон, если по участку начнут перекачивать бензин ($\nu = 0,6$ сСт)?

Ответ. 0,00539; 0,00453.

139. По участку нефтепродуктопровода ($D = 530 \times 8$ мм, $\Delta = 0,25$ мм, $L = 120$ км) перекачивают последовательно бензин ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$, $\nu_1 = 0,6$ сСт) и дизельное топливо ($\rho_1 = 840 \text{ кг/м}^3$, $\nu_1 = 9$ сСт) так, что в некоторый момент граница контакта между ними находится как раз посередине участка, причем впереди расположен бензин. Известно, что расход перекачки равен $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, а напор в начале участка составляет 450 м. Считая участок практически горизонтальным и пренебрегая областью смеси, построить эпюр распределения напора по длине участка.

Ответ. На первой половине участка напор линейно уменьшается от значения 450 до 223,5 м, потом напор скачкообразно увеличивается до 257,2 м, и, наконец, линейно уменьшается до 77,7 м в конце участка.

140. По участку нефтепродуктопровода ($D = 377 \times 7$ мм, $\Delta = 0,2$ мм, $L = 100$ км) с расходом $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ перекачивают последовательно бензин ($\rho_1 = 730 \text{ кг/м}^3$, $\nu_1 = 0,6$ сСт) и дизельное топливо ($\rho_1 = 845 \text{ кг/м}^3$, $\nu_1 = 9$ сСт) так, что в некоторый момент граница контакта между ними находится на 30-м км, причем впереди расположено дизельное топливо. Считая участок практически горизонтальным и пренебрегая областью смеси, определить скачкообразное изменение напора в месте контакта нефтепродуктов, если известно, что давление в начале участка составляет 4,5 МПа.

Ответ. 67,5 м.

1.9. ПЕРЕКАЧКА ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПОДОГРЕВОМ

Справочный материал

Для снижения гидравлических потерь при перекачке высоковязких нефтей и нефтепродуктов в ряде случаев используют подогрев. Трубопроводы, по которым транспортируют подогретые жидкости, называют *горячими*.

Хотя плотность вязких нефтей и нефтепродуктов зависит от температуры, см. формулы (1)-(3), ее изменениями во многих случаях можно пренебречь, считая $\rho \cong \rho_0 = \text{const}$. В то же время зависимостью $\nu(T)$ вязкости от температуры пренебрегать нельзя, поскольку от вязкости существенно зависит гидравлическое сопротивление транспортируемой жидкости.

Изменения кинематической вязкости ν ($\text{м}^2/\text{с}$) нефтей и нефтепродуктов в зависимости от температуры T ($^{\circ}\text{C}$) можно рассчитать по формуле Рейнольдса-Филонова:

$$\nu(T) = \nu_1 \cdot e^{-\kappa(T-T_1)}, \quad (89)$$

в которой ν_1 – вязкость жидкости при температуре T_1 , а коэффициент κ ($1/^{\circ}\text{C}$) зависит от индивидуальных свойств жидкости. Для определения κ достаточно знать вязкость ν_2 жидкости хотя бы еще при одном значении T_2 температуры:

$$\kappa = \frac{\ln(\nu_1/\nu_2)}{T_2 - T_1}. \quad (90)$$

В системе единиц СИ кинематическая вязкость ν измеряется в *Стксах* (Ст): $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; *сантистокс* - это $1/100 \cdot \text{Ст}$: $1 \text{ сСт} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Удельная теплоемкость C_v (Дж/кг \cdot $^{\circ}$ С) и коэффициент λ_n (Вт/м \cdot $^{\circ}$ С) теплопроводности нефти или нефтепродукта хотя и зависят от температуры, но могут приближенно приниматься постоянными:

$$C_v \approx 1900 \div 2100 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{С}); \quad \lambda_n \approx 0,1 \div 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{С}).$$

Теплоемкость трубы, в которой течет нефть или нефтепродукт, определяется теплоемкостью материала, из которого эта труба изготовлена. Теплоемкость трубной стали сравнительно невелика: $C_{\text{ст.}} \approx 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{С})$, но коэффициент $\lambda_{\text{ст}}$ ее теплопроводности во много раз больше коэффициента теплопроводности нефти: $\lambda_{\text{ст.}} \approx 40 \div 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{С})$.

Окружающий трубопровод грунт (при подземной прокладке) по своим теплофизическим свойствам может быть весьма разнообразным. Коэффициент $\lambda_{\text{гр.}}$ теплопроводности грунта равен в среднем $\lambda_{\text{гр.}} \approx 1 \div 2 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}\text{С}$, но может лежать и вне этого диапазона. Для сухих грунтов он значительно меньше, чем для влажных и тем более для сильно обводненных.

Коэффициенты теплопроводности $\lambda_{\text{из.}}$ изоляционных материалов также сильно зависят от конкретных свойств изоляции и могут изменяться от 0,02 до 0,2 Вт/(м \cdot $^{\circ}$ С).

Распределение $T(x)$ температуры нефти или нефтепродукта, имеющей плотность ρ , в стационарном режиме перекачки с расходом Q определяется формулой В.Г. Шухова (1853-1939):

$$T(x) = T_{\text{нар.}} + (T_0 - T_{\text{нар.}}) \cdot e^{-\frac{\pi \cdot K \cdot d}{\rho \cdot Q \cdot C_v} \cdot x}, \quad (91)$$

где $T_0 = T(0)$ – температура жидкости в начале участка трубопровода; $T_{\text{нар.}}$ – наружная температура (то есть температура окружающей среды); ρ – плотность жидкости; d – внутренний диаметр трубопровода; K – коэффициент теплопередачи от жидкости, текущей в трубопроводе, к окружающей среде. Если в качестве окружающей среды рассматривается грунт ($T_{\text{нар.}}$ – температура окружающего грунта), то K есть коэффициент теплопередачи от жидкости в грунт; если же в качестве окружающей среды рассматривается воздух на поверхности земли ($T_{\text{нар.}}$ – температура воздуха), то K есть коэффициент теплопередачи от жидкости, текущей в трубопроводе, в атмосферу. В системе СИ коэффициент K измеряется в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [3].

Если помимо теплопередачи от нагретой жидкости в окружающую среду рассматривается также выделение тепла в вязкой жидкости за счет сил внутреннего трения ее слоев друг о друга (диссипативный разогрев), формула В.Г. Шухова представляется в виде:

$$T(x) = T_{\text{нар.}} + T_{\otimes} + (T_0 - T_{\text{нар.}} - T_{\otimes}) \cdot e^{-\frac{\pi \cdot K \cdot d}{\rho \cdot Q \cdot C_v} \cdot x}, \quad (92)$$

где T_{\otimes} – некоторая постоянная величина, имеющая размерность температуры: $T_{\otimes} = \rho g Q \cdot i_0 / (\pi \cdot K \cdot d)$; i_0 – гидравлический уклон перекачки на рассматриваемом участке трубопровода.

В терминах начальной T_0 и конечной T_L температур жидкости на участке трубопровода $0 \leq x \leq L$ формула В.Г. Шухова может быть представлена в виде:

$$\frac{T(x) - (T_{\text{нар.}} + T_{\otimes})}{T_0 - (T_{\text{нар.}} + T_{\otimes})} = \left[\frac{T_L - (T_{\text{нар.}} + T_{\otimes})}{T_0 - (T_{\text{нар.}} + T_{\otimes})} \right]^{x/L}. \quad (93)$$

В этой формуле коэффициент K теплопередачи явно не содержится.

Для расчета коэффициента K теплопередачи для трубопровода с несколькими слоями изоляции обычно используют формулу

$$\frac{1}{K \cdot D} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot D} + \sum_{s=1}^{s=n} \frac{1}{2\lambda_s} \ln \frac{D_{s+1}}{D_s} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}}}, \quad (94)$$

где λ_s – коэффициенты теплопроводности стенки трубы и концентрических слоев изоляции; D_{s+1}, D_s – наружный и внутренний диаметры трубы и слоев изоляции; $D, D_{\text{нар.}}$ – наружный диаметр трубы и последнего слоя изоляции, соответственно; α_1 – коэффициент теплоотдачи от ядра потока нефти или нефтепродукта на стенки трубы, Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); α_2 – коэффициент теплоотдачи от трубы в грунт (или от поверхности грунта в окружающий воздух), Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Коэффициент α_1 теплоотдачи от ядра потока жидкости на стенки трубы зависит от гидродинамической структуры течения. В среднем этот коэффициент может изменяться от 50 до 300 Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Коэффициент α_2 теплоотдачи через грунт в окружающую среду зависит от многих факторов - от свойств самого

грунта и от условий съема тепла на поверхности земли; его значения могут составлять $1,0 \div 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

При длительной стационарной работе *горячего* трубопровода, проложенного в грунте, коэффициент α_2 можно рассчитать по формуле Форхгеймера, заменив в (94) произведение $\alpha_2 D_{\text{нар.}}$ выражением

$$\alpha_2 D_{\text{нар.}} = \frac{2\lambda_{\text{гр.}}}{\ln \left[2H/D_{\text{нар.}} + \sqrt{(2H/D_{\text{нар.}})^2 - 1} \right]}, \quad (95)$$

где H – глубина заложения (оси) трубопровода; $\lambda_{\text{гр.}}$ – коэффициент теплопроводности грунта, $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{С}$ [3].

При учете сопротивления теплоотдачи на границе “грунт-воздух” вместо последней формулы можно использовать другую приближенную формулу:

$$\alpha_2 D_{\text{нар.}} = \frac{2\lambda_{\text{гр.}}}{2H/D_{\text{нар.}} + \lambda_{\text{гр.}}/(\alpha_0 H)}, \quad (96)$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта в воздух; $\alpha_0 \approx 10 \div 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. В этом случае распределение $T(x, y, z)$ температуры в массиве грунта, окружающего трубопровод, можно приблизить формулой:

$$T(x, y, z) = T_* - \frac{\pi K d \cdot [T(x) - T_{\text{гр.}}]}{2\pi \cdot \lambda_{\text{гр.}}} \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + (z + H)^2}}{D/2}, \quad (97)$$

где T_* – температура грунта на внешней поверхности трубопровода со слоями изоляции; $T(x)$ – температура жидкости в сечении x ; y, z – пространственные координаты в

плоскости, перпендикулярной оси трубопровода, причем ось трубы имеет координаты $y = 0, z = -H$.

Потери напора h_τ на трение на участке *горячего* нефтепровода (или нефтепродуктопровода) с протяженностью L выражаются формулой:

$$h_\tau = \int_0^L \lambda dx \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (98)$$

Входящий в формулу (98) коэффициент λ гидравлического сопротивления не постоянен, поскольку вязкость транспортируемой жидкости изменяется по длине участка из-за изменения ее температуры. Если транспортировка высоковязкой жидкости ведется в области гидравлически гладких труб, для которой справедлива формула Блазиуса (25), то имеет место следующее представление:

$$h_\tau = \left(\int_0^L \lambda dx \right) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \lambda_{\text{эф.}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (99)$$

где $\lambda_{\text{эф.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{v \cdot d / v_{\text{нар.}}}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [\text{Ei}(-k) - \text{Ei}(-ke^{-m})]$, $v_{\text{нар.}} = v(T_{\text{нар.}})$,

$$k = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}), \quad m = \frac{\pi K d \cdot L}{\rho Q C_v} = \frac{4K \cdot L}{\rho v C_v d}.$$

Символ $\text{Ei}(z)$ обозначает так называемую *функцию Эйлера*:

$$\text{Ei}(z) = \int_{-\infty}^z \frac{e^\eta}{\eta} d\eta, \quad (100)$$

которая часто встречается в технических приложениях и для которой составлены специальные таблицы. Некоторые значения этой функции приведены в следующей таблице:

z	$Ei(z)$
-2,0	-0,049
-1,5	-0,100
-1,0	-0,219
-0,9	-0,260
-0,8	-0,311
-0,7	-0,374
-0,6	-0,454
-0,5	-0,560
-0,4	-0,702
-0,3	-0,906
-0,2	-1,223
-0,1	-1,823
-0,05	-2,468

ЗАДАЧИ

141. Кинематическая вязкость нефти месторождения Котуп-Тепе при температуре 20°C равно 40 сСт, а при температуре 70°C - всего 5,3 сСт. Определить вязкость этой нефти при температурах 40 и 50°C .

Ответ. 17,97 и 12,05 сСт.

142. Вязкость Узеньской нефти при температуре 10°C очень велика - она составляет $213,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. До какой температуры необходимо нагреть эту нефть, чтобы ее вязкость уменьшилась в 100 раз, если известно, что при повышении температуры до 20°C вязкость нефти снижается в 10 раз?

Ответ. 30°C .

143. Нефть Озек-Суатского месторождения при температуре 30°C имеет кинематическую вязкость 7 сСт . При снижении температуры до 20°C ее вязкость увеличивается в 50 раз. При каких температурах вязкость данной нефти не превышает $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$?

Ответ. При $T \geq 23,2^{\circ}\text{C}$.

144. Какое количество тепла в единицу времени нужно передавать нефти ($\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 2000 \text{ Дж/(кг }^{\circ}\text{C)}$), прокачиваемой с расходом $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ через нагревательную печь, чтобы температура нефти повысилась с 20 до 70°C ?

Ответ. $3,625 \text{ МВт}$ ($\approx 865,8 \text{ ккал/с}$).

145. Поток подогретой до температуры 50°C нефти движущейся с расходом $150 \text{ м}^3/\text{ч}$, вливается в поток холодной нефти ($T = 20^{\circ}\text{C}$), имеющей расход $300 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить температуру нефти после перемешивания двух потоков.

Ответ. 30°C .

146. Вязкость нефти ($\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 1900 \text{ Дж/(кг }^{\circ}\text{C)}$), при 20°C равна 40 сСт , а при нагреве до 50°C она уменьшается до $8,4 \text{ сСт}$. Сколько тепла в единицу времени необходимо затрачивать на подогрев нефти, чтобы перекачивать ее с расходом $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ при начальной вязкости 15 сСт , если известно, что на нефтеперекачивающую станцию нефть поступает с температурой 10°C ?

Ответ. $15,536 \text{ МВт}$.

147. По нефтепроводу ($D = 1020 \times 10 \text{ мм}$) транспортируют нефть ($\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 2000 \text{ Дж/(кг }^{\circ}\text{C)}$) с расходом $2300 \text{ м}^3/\text{ч}$ и температурой начального подогрева $T_0 = 65^{\circ}\text{C}$. Температура $T_{\text{нар}}$ грунта на глубине заложения трубопровода составляет 8°C , а суммарный коэффициент K теплопередачи от нефти в грунт равен $1,25 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^{\circ}\text{C)}$. Определить температуру нефти посередине и в конце 100-км пере-

гона между станциями подогрева. Выделяющимся теплом внутреннего трения пренебречь.

Ответ. 55,6 и 47,8 °С.

148. Температура T_0 нефти в начале 110-км перегона между станциями подогрева составляет 65 °С, а в конце перегона 30 °С. Определить температуру нефти в середине перегона, если известно, что температура окружающей среды, равна 10 °С.

Ответ. 44,17 °С.

149. Определить среднее значение коэффициента K теплопередачи от нефти в грунт на участке нефтепровода ($D = 720 \times 10$ мм, $L = 120$ км), транспортирующего нефть ($\rho = 870$ кг/м³, $C_v = 1970$ Дж/(кг °С)) с расходом 1800 м³/ч, если известны температура $T_0 = 60$ °С в начале участка, $T_L = 20$ °С – в его конце, а также $T_{нар.} = 6$ °С температура окружающей грунта на глубине заложения трубопровода.

Ответ. 4,39 Вт/(м² °С).

150. Замерами установлено, что коэффициент K теплопередачи на участке нефтепровода ($D = 720 \times 8$ мм, $L = 125$ км), по которому ведется транспортировка легкой нефти ($\rho = 848$ кг/м³, $C_v = 1968$ Дж/(кг °С)) с расходом 1800 м³/ч, не является постоянным, а имеет различные значения на различных сегментах рассматриваемого участка. Значения этого коэффициента таковы:

$$K = \begin{cases} 2,0 \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}), & \text{если } 0 \leq x \leq 30 \text{ км}, \\ 8,0 \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}), & \text{если } 30 \leq x \leq 90 \text{ км}, \\ 3,0 \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}), & \text{если } 90 \leq x \leq 125 \text{ км}. \end{cases}$$

Определить, среднее по участку значение коэффициента K теплопередачи, а также минимальную температуру T_0 нефти в начале участка, которую она должна иметь, чтобы к концу участка ее температура была не ниже 18°C . Известно, что температура $T_{\text{нар.}}$ окружающей среды составляет 6°C .

Ответ. Не ниже $K_{\text{ср.}} = 5,12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$; $T_{\text{min}} = 71,42^\circ\text{C}$.

151. На сколько градусов могла бы повыситься температура нефти ($\nu = 25 \text{ сСт}$, $C_v = 1950 \text{ Дж}/\text{кг } ^\circ\text{C}$) за счет тепла, выделяющегося при внутреннем трении слоев нефти друг о друга, если бы эту нефть перекачивали по трубопроводу ($D = 720 \times 10 \text{ мм}$, $L = 400 \text{ км}$) с расходом $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$ при наличии идеальной, т. е. с $K = 0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$, тепловой изоляции?

Ответ. 4°C .

152. По нефтепроводу ($D = 720 \times 10 \text{ мм}$), проложенному над землей, с расходом $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ведется перекачка сырой нефти ($\rho = 890 \text{ кг}/\text{м}^3$) без подогрева. Известно, что начальная температура нефти на 25°C выше температуры окружающего воздуха, а удельные потери напора в трубопроводе составляют $0,003 \text{ м}/\text{км}$. Какой коэффициент K теплопередачи должна обеспечивать тепловая изоляция для того, чтобы температура нефти оставалась постоянной по длине трубопровода?

Ответ. $0,29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$.

153. По нефтепроводу ($D = 720 \times 10 \text{ мм}$, $\lambda_{\text{ст.}} = 40 \text{ Вт}/(\text{м } ^\circ\text{C})$), длительное время работающему в стационарном режиме, ведется перекачка нефти с подогревом, причем коэффициент α_1 теплопередачи от жидкости к стенке трубы, рассчитанный по гидродинамическим зависимостям, известен и равен $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$. Ось трубопровода находится на глубине 2 м под поверхностью грунта ($\lambda_{\text{гр.}} = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м } ^\circ\text{C})$),

а сама труба имеет слой антикоррозийной изоляции ($\delta_{\text{из.}} = 8$ мм, $\lambda_{\text{из.}} = 0,5$ Вт/(м⁰С)). Найти коэффициент К теплопередачи от потока нефти на поверхность грунта в окружающую среду.

Указание: см. формулу Форхгеймера; тепловым сопротивлением на границе «грунт-воздух» пренебречь.

Ответ. 1,34 Вт/(м² °С).

154. Нефтепровод ($D = 1020 \times 10$ мм) покрыт слоем антикоррозийной битумной изоляции ($\delta_{\text{из.}} = 8$ мм, $\lambda_{\text{из.}} = 0,7$ Вт/(м⁰С)). Считая коэффициент α_1 теплопередачи от нефти к стенке трубы и теплопроводность металла трубы бесконечно большими, а также полагая коэффициент α_2 теплопередачи через грунт в окружающее пространство равным 2,0 Вт/(м² °С), оценить толщину δ_* дополнительного слоя тепловой изоляции ($\lambda_* = 0,1$ Вт/(м⁰С)), которую необходимо нанести на трубопровод, чтобы общий коэффициент К теплопередачи от нефти в окружающее пространство уменьшился вдвое по сравнению со случаем отсутствия такой изоляции.

Ответ. 54 мм.

155. Надземный участок *горячего* нефтепровода ($D = 720 \times 10$ мм, $L = 2$ км), транспортирующего легкую нефть ($\rho = 850$ кг/м³, $C_v = 1950$ Дж/(кг °С)) с расходом 1800 м³/ч, пролегает в местности, где температура $T_{\text{нар.}}$ воздуха может опускаться до минус 20 °С. Если этот участок не обеспечить тепловой изоляцией, то температура нефти на нем может уменьшиться на 8 °С (от 40 до 32 °С). Какой слой δ_* тепловой изоляции ($\lambda_* = 0,2$ Вт/(м⁰С)) необходимо нанести на воздушный переход нефтепровода, чтобы температура нефти на этом участке не снижалась более чем на 1 °С?

Ответ. 6,5 см.

156. Ось нефтепровода ($D = 720$ мм), находится на глубине $H = 1,3$ м от поверхности грунта ($\lambda_{\text{гр.}} = 1,8$ Вт/(м⁰С)). Для уменьшения тепловых потерь транспортируемой нефти ($T_0 = 40$ °С) труба имеет слой тепловой изоляции ($\delta_{\text{из.}} = 50$ мм, $\lambda_{\text{из.}} = 0,25$ Вт/(м⁰С)). Температура $T_{\text{нар.}}$ окружающего воздуха равна 0 °С, а коэффициент α_0 теплоотдачи с поверхности грунта по расчетам составляет 8 Вт/(м² °С). Пренебрегая изменениями температуры от ядра течения в трубе до начального слоя изоляции, найти суммарный коэффициент K теплопередачи от нефти в воздух и распределение температуры по поверхности грунта над трубопроводом.

Ответ. $2,2$ Вт/(м² °С); $T(x) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln(\sqrt{y^2 + 1,69} / 0,36)$,

где y – расстояние (в м), отсчитываемое вдоль поверхности грунта от точки над осью трубы. В частности, температура грунта над осью нефтепровода составляет $\approx (+1,54)$ °С.

157. Температура воздуха в районе пролегания нефтепровода (см. условие задачи № 156) опустилась до 0 °С и выпавший первый снег образовал на земле тонкое покрытие. При этом над трубопроводом осталась непокрытая снегом полоса. Определить ширину этой полосы.

Ответ. $0,67$ м.

158. По участку *горячего* нефтепровода ($D = 720 \times 10$ мм, $L = 135$ км) перекачивают нефть ($\rho = 860$ кг/м³, $\nu_1 = 15$ сСт при $T_1 = 60$ °С и $\nu_2 = 40$ сСт при $T_2 = 20$ °С, $C_v = 1950$ Дж/(кг °С)) с расходом 1800 м³/ч. Температура T_0 в начале участка составляет 60 °С, в его конце - $T_L = 25$ °С, а температура $T_{\text{нар.}}$ окружающей среды равна 10 °С. Считая трубопровод горизонтальным и пренебрегая местными сопротивлениями, определить потери напора на рассматриваемом участке.

Ответ. 382 м.

159. Для подачи высоковязкой нефти ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 2000 \text{ Дж/(кг } ^\circ\text{C)}$) по участку трубопровода ($D = 530 \times 8 \text{ мм}$, $L = 140 \text{ км}$) на нефтеперерабатывающий завод нефть нагревают до температуры $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить потери напора на рассматриваемом участке трубопровода и температуру в его конце, если известно, что вязкость ν нефти экспоненциально зависит от ее температуры T : $\nu(T) = 12 \cdot e^{-0,04(T-50)}$, где $\nu - \text{сСт}$, $T - ^\circ\text{C}$, средний коэффициент K теплопередачи составляет $3,5 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C)}$, а температура $T_{\text{нар}}$ окружающей среды равна $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Заполнить пустующие ячейки нижеследующей таблицы:

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	1000	800	600
$h_\tau, \text{ м}$			
$T, \text{ }^\circ\text{C}$			

Ответ.

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	1000	800	600
$h_\tau, \text{ м}$	592	412	264
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	20,3	16,9	13,6

160. По участку практически горизонтального нефтепровода ($D = 720 \times 10 \text{ мм}$, $L = 120 \text{ км}$) перекачивают нефть ($\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 2000 \text{ Дж/(кг } ^\circ\text{C)}$), $\nu_1 = 5 \text{ сСт}$ при $T_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\nu_2 = 40 \text{ сСт}$ при $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) с подогревом, при этом начальная температура T_0 нефти равна $50 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура $T_{\text{нар}}$ окружающей среды составляет $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Средний по участку коэффициент K теплопередачи равен $3,5 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C)}$. Перекачка ведется двумя последовательно соединенными насосами НМ 3600-230, характеристика каждого из которых имеет вид $H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} Q^2$ ($H - \text{в м}$, $Q - \text{в м}^3/\text{ч}$, $h_k = h_{\text{п}}$). Найти расход перекачки и температуру нефти в

конце участка. *Указание.* Использовать результаты решения предыдущих задач.

Ответ. 2231 м³/ч, 27 °С.

1.10. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ

Справочный материал

Природный газ состоит в основном из метана (СН₄). Плотность ρ газа зависит от его состава, давления и температуры. При *стандартных* условиях ($p = 0,1013$ МПа, $T = 293$ К) плотность природного газа $\rho_{\text{ст.}}$ составляет примерно 0,7 кг/м³.

Относительной плотностью Δ газа по воздуху называется отношение $\rho_{\text{г.}}/\rho_{\text{в.}}$ плотности $\rho_{\text{г.}}$ природного газа к плотности $\rho_{\text{в.}}$ воздуха при одних и тех же (например, стандартных) условиях. Очевидно, что для совершенных газов это отношение не зависит ни от давления, ни от температуры. В частности, плотность $\rho_{\text{ст.}}$ природного газа представляется в виде: $\rho_{\text{ст.}} = (\rho_{\text{в.}})_{\text{ст.}} \cdot \Delta$, причем $(\rho_{\text{в.}})_{\text{ст.}} \approx 1,204$ кг/м³.

Связь вида $F(p, \vartheta, T) = 0$ между давлением p в газе, его удельным объемом $\vartheta = 1/\rho$ и абсолютной температурой T называется *уравнением состояния* газа. При умеренных давлениях и температурах свойства газов достаточно хорошо моделируются уравнением состояния Клапейрона-Менделеева

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R_0 T, \quad (101)$$

где V – объем газа; m – его масса; μ – молярная масса газа, (кг/кмоль); R_0 – универсальная газовая постоянная ($R_0 = 8314$ Дж/(кмоль · К)). Газы, свойства которых моделируются уравнением Клапейрона-Менделеева, называют *совершенными*.

Если учесть, что удельный объем ϑ газа определяется как V/m , и $R_0/\mu = R$ – газовая постоянная *данного* газа (Дж/(кг·К)), то уравнение состояния совершенного газа записывается также в форме:

$$p \cdot \vartheta = RT \quad \text{или} \quad p = \rho RT. \quad (102)$$

Газовая постоянная R метана равна 518,33 Дж/(кг·К), углекислого газа – 188,95 Дж/(кг·К), кислорода – 259,81 Дж/(кг·К), воздуха – 287,1 Дж/(кг·К); $R = R_v/\Delta = 287,1/\Delta$.

Свойства *реальных* природных газов отличаются от свойств совершенного газа. Для каждого реального газа имеется некоторая *критическая температура* $T_{кр.}$ такая, что для любого значения $T \leq T_{кр.}$ существует давление p , при котором происходит фазовый переход газа в жидкое состояние, а для температур $T \geq T_{кр.}$ такой переход невозможен ни при каких давлениях. Если $T = T_{кр.}$, то существует давление $p_{кр.}$, при котором свойства жидкой и газовой фаз неразличимы. Параметры газа $T_{кр.}, p_{кр.}$ называется *критическими*. Так, например, для метана эти параметры составляют: $T_{кр.} = 190,55$ К, $p_{кр.} = 4,64$ МПа.

Некоторые постоянные компонентов, составляющих природный газ, приведены в нижеследующей таблице.

Таблица

Постоянные компонентов, составляющих природный газ

Газ	Молярная масса, кг/кмоль	Плотность по воздуху	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К
Метан	16,042	0,554	4,641	190,55
Этан	30,068	1,049	4,913	305,50
Пропан	44,094	1,562	4,264	369,80
Изобутан	58,120	2,066	3,570	407,90
н - Бутан	58,120	2,091	3,796	425,17
н - Пентан	72,146	2,480	3,374	469,78

Азот	28,016	0,970	3,396	126,25
Кислород	32,000	1,104	4,876	154,18
Сероводород	34,900	1,190	8,721	373,56
Углекисл.газ	44,011	1,525	7,382	304,19
Водород	2,020	0,069	1,256	33,10
Гелий	4,000	1,136	0,222	5,00
Воздух	28,966	1,000	3,780	132,46

В ряде случаев уравнение состояния реального газа представляют в виде

$$p = Z(p, T) \cdot \rho R T, \quad (103)$$

где $Z(p, T)$ – безразмерный коэффициент сжимаемости газа (называемый иногда еще коэффициентом сверхсжимаемости газа). Очевидно, что для совершенных газов $Z = 1$.

Зависимость $Z(\bar{p}, \bar{T})$ от отношений $\bar{p} = p/p_{кр.}$ и $\bar{T} = T/T_{кр.}$, называемых приведенным давлением и приведенной температурой, соответственно, представлена на рис. 1.12.

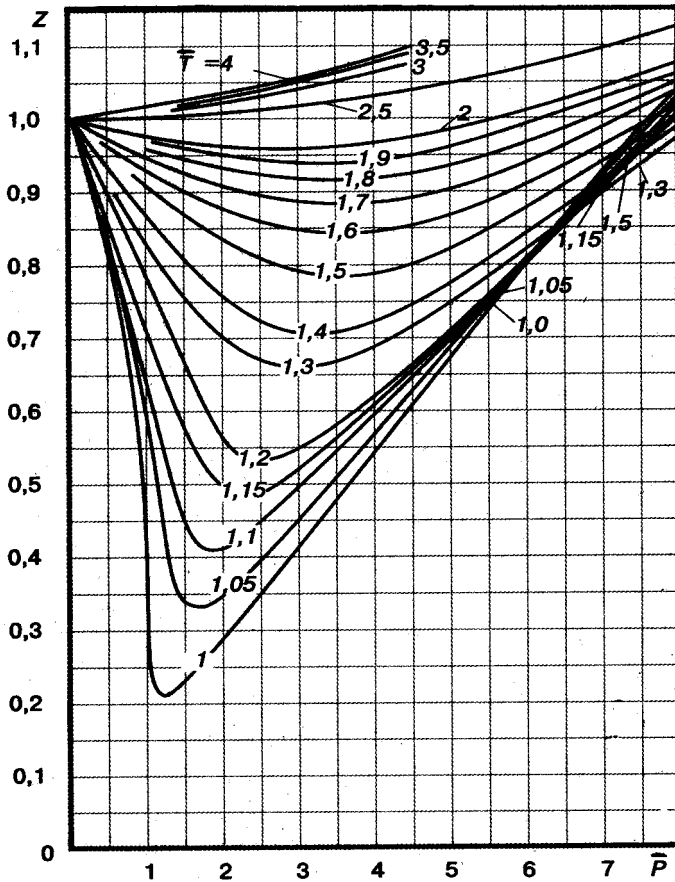


Рис. 1.12. Зависимость $Z(\bar{p}, \bar{T})$ от $\bar{p} = p/p_{кр.}$ и $\bar{T} = T/T_{кр.}$

Для природных газов, представляющих собой метан в смеси с некоторыми другими компонентами (этан, пропан, бутан, изобутан, пентан, азот, сероводород, углекислый газ, водород, гелий и т.п.), коэффициент $Z(\bar{p}, \bar{T})$ сжимаемости может быть рассчитан по следующей аппроксимационной формуле

$$Z(\bar{p}, \bar{T}) = 1 - 0,4273 \cdot \bar{p} \cdot \bar{T}^{-3,668} \quad (104)$$

Молярная масса и критические параметры газовой смеси вычисляются по следующим аддитивным формулам:

$$\mu = \sum_{j=1}^{j=n} x_j \cdot \mu_j; p_{кр.} = \sum_{j=1}^{j=n} x_j \cdot p_{кр.,j}; T_{кр.} = \sum_{j=1}^{j=n} x_j \cdot T_{кр.,j}, \quad (105)$$

где x_j – объемные доли компонентов, составляющих газ.

Простейшие термодинамические процессы. *Изотермический процесс:* $T = \text{const}$. При изотермическом расширении (или сжатии) совершенного газа от давления p_1 до давления p_2 к газу необходимо подводить (или соответственно отбирать) тепло:

$$\delta Q_w = RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (106)$$

где δQ_w – количество тепла, рассчитанное на единицу массы газа (*Дж/кг* или *кал/кг*; $1 \text{ кал} = 4,187 \text{ Дж}$); причем $\delta Q_w > 0$, если газ расширяется ($p_2 < p_1$), и $\delta Q_w < 0$, если газ сжимается ($p_2 > p_1$).

Обратимый *адиабатический процесс:* $\delta Q_w = 0$. Имеют место следующие соотношения:

$$\frac{p}{p_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^\gamma, \quad \frac{T}{T_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (107)$$

где ρ_1, p_1, T_1 – плотность, давление и температура газа в начальном состоянии; ρ, p, T – те же параметры газа в текущем (или конечном) состоянии; $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты; C_p, C_v – теплоемкости газа соответственно при постоянном дав-

лении и объеме (Дж/(кг К)). Например, для воздуха $\gamma = 1,4$; для метана - $\gamma = 1,31$; для этана - $\gamma = 1,20$; для пропана $\gamma = 1,16$ и т.д. Для совершенного газа ($Z = 1$) имеет место формула Майера: $C_p - C_v = R$.

Политропическим называется процесс, в котором плотность и давление связаны уравнением $p = A \cdot \rho^m$, где $A = \text{const.}$; m – показатель политропы. Если в этом процессе $m \neq \gamma$, то $\delta Q_w \neq 0$. Если процесс политропического сжатия газа ($p_2 > p_1$) идет с подводом тепла ($\delta Q_w > 0$), то $m > \gamma$; если же он сопровождается отбором тепла ($\delta Q_w < 0$), то $1 < m < \gamma$.

В политропическом процессе плотность, давление и температура газа связаны соотношениями, аналогичными (107):

$$\frac{p}{p_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^m, \quad \frac{T}{T_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{m-1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}. \quad (108)$$

ЗАДАЧИ

161. Газовая смесь состоит из 99 % метана, 0,5 % этана и 0,5 % азота. Определить молярную массу газовой смеси и значение газовой постоянной.

Ответ. 16,172 кг/кмоль; 514,1 Дж/(кг К).

162. Газовая смесь состоит из 88 % метана, 6 % этана, 4% пропана и 2 % азота. Определить молярную массу газовой смеси и значение ее газовой постоянной.

Ответ. 18,243 кг/кмоль; 455,7 Дж/(кг К).

163. Определить массу 100 тыс. нормальных (то есть вычисленных при давлении $p = 0,1013$ МПа и температуре $T = 293$ К) кубометров природного газа ($\mu = 19,2$ кг/кмоль).

Ответ. 79,842 т.

164. Объем природного газа ($\mu = 18,5$ кг/кмоль) в стандартных условиях составляет 250 тыс. м³. Какова его масса?

Ответ. 192,328 т.

165. Объем природного газа, измеренный при стандартных условиях, составляет 10 тыс. м³. Каков объем этого газа при нормальных (то есть вычисленных при давлении $p = 0,1013$ МПа и температуре $T = 273$ К) условиях?

Ответ. 9317,4 м³.

166. Объем природного газа, измеренный при нормальных условиях, составляет 50 тыс. м³. Каков объем этого газа при стандартных условиях?

Ответ. 53663 м³.

167. Природный газ, хранящийся в резервуаре емкостью 20 тыс. м³ при среднем давлении 0,11 МПа, подвержен колебаниям суточной температуры от +8 °С ночью до +20 °С днем. Определить амплитуду колебания давления в резервуаре.

Ответ. 0,0023 МПа.

168. Давление в газовом резервуаре составляет 0,12 МПа, температура +15 °С. На сколько повысится давление в этом резервуаре, если температура в нем возрастет на 15 °С?

Ответ. 0,0063 МПа.

169. Газовую полость (или *газовый пузырь*) подземного хранилища газа (ПХГ) можно приближенно считать прямым цилиндром, имеющим в плане форму эллипса с полуосями $a = 3000$ м, $b = 2000$ м и высотой $h = 15$ м. Пористость m пласта (то есть объемная доля пустот в породах, слагающих пласт), составляет 30 % (0,3), а насыщенность s пустот газом (то есть объемная доля этих пустот, заполненных газом), равна 0,65; остальная часть пустот заполнена водой. Определить, какой объем газа в стандартных кубических метрах находится в ПХГ, если известны пластовое давление $p = 10$ МПа и температура $T = 30$ °С газа. Извест-

ны также постоянные газа: $R = 470 \text{ Дж}/(\text{кг К})$,
 $p_{\text{кр.}} = 4,7 \text{ МПа}$, $T_{\text{кр.}} = 200 \text{ К}$.

Ответ. 6,554 млрд.м³.

170. После того, как из подземного хранилища газа (ПХГ), параметры которого даны в условии предыдущей задачи №169, отобрали некоторое количество газа, давление в газовой полости уменьшилось до 8,5 МПа, а насыщенность s газа снизилась с 0,65 до 0,35. Определить, какое количество газа (в стандартных кубических метрах) извлечено из ПХГ за период отбора.

Ответ. 3,661 млрд.м³.

171. Природный газ ($\mu = 19,5 \text{ кг/кмоль}$) при давлении 1,5 МПа и температуре 25 °С можно приближенно считать совершенным. Определить массу газа, если его объем при указанных условиях составляет 100 тыс. м³.

Ответ. 1180,6 т.

172. Метан находится в контейнере при давлении 20 МПа и температуре +10°С. В каком агрегатном состоянии находится газ? В каком агрегатном состоянии находился бы метан в том же контейнере, если бы его температуру снизили до (-110) °С? Ответ обосновать.

Ответ. В газообразном. В жидком.

173. Газовая смесь состоит из 94 % метана, 4 % этана и 2 % азота. Определить критические параметры смеси.

Ответ. 4,627 МПа; 193,86 К.

174. Характеристики газовой смеси представлены в таблице:

Компонента газа	Объемная доля, %	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К
Метан	92,0	4,641	190,55
Этан	4,0	4,913	305,50
Азот	2,0	3,396	126,25
Сероводород	1,0	8,721	373,56
Углекислый газ	1,0	7,382	304,19

Найти значения коэффициента Z сжимаемости этой смеси при давлении 6,5 МПа и температуре +25 °С.

Ответ. 0,871.

175. Характеристики газовой смеси представлены в таблице:

Компонента газа	Молярная масса, кг/кмоль	Объемная доля, %	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К
Метан	16,042	92,0	4,641	190,55
Этан	30,068	4,0	4,913	305,50
Изобутан	58,120	2,0	3,570	407,90
Азот	28,016	1,0	3,396	126,25
Сероводород	34,900	1,0	8,721	373,56

Найти плотность газа при давлении 7,0 МПа и температуре +15 °С.

Ответ. 62,61 кг/м³.

176. Давление на *устье* закрытой газовой скважины глубиной 1000 м (то есть давление в стволе скважины на уровне земной поверхности) составляет 7,0 МПа. Найти давление на *забое* скважины (то есть на уровне залегания продуктивного газового пласта), если параметры природного газа таковы: $R = 470$ Дж/кг К, $p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 195$ К.

В расчетах принять, что температура газа в скважине примерно постоянная, равная +30 °С, а для вычисления коэффициента Z сжимаемости использовать формулу (104).

Ответ. 7,58 МПа.

177. Давление газа в начале участка газопровода равно 5,5 МПа, а температура - +30 °С. В конце участка эти параметры составляют 3,5 МПа и +10 °С. Считая газ совершенным, найти, во сколько раз меньше плотность газа в конце участка, чем в его начале. Уточнить решение задачи, отказавшись от допущения о совершенности газа и используя значения критических параметров газа: $p_{кр.} = 4,6$ МПа, $T_{кр.} = 190$ К.

Ответ. В 1,468 раза; в 1,495 раза.

178. Степень сжатия ε газа в одноступенчатом центробежном нагнетателе равна 1,6. Считая процесс сжатия газа адиабатическим ($\gamma = 1,34$), определить температуру газа на выходе из нагнетателя, если температура на его входе равна 288 К.

Ответ. 324,5 К.

179. Давление природного газа в газоперекачивающем агрегате (ГПА) повышается в 1,4 раза, при этом температура увеличивается с $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ на входе до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ на выходе из агрегата. Считая процесс сжатия газа политропическим, найти показатель политропы.

Ответ. 1,255.

180. При политропическом сжатии газа газоперекачивающим агрегатом (ГПА) давление повышается в 1,57 раза, при этом температура увеличивается с $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ на входе до $+38\text{ }^{\circ}\text{C}$ на выходе из агрегата. Определить, во сколько раз увеличивается плотность газа.

Ответ. В 1,44 раза.

1.11. СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРОСТЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Справочный материал

При стационарном режиме работы газопровода массовый расход $\dot{M} = \rho v S$ газа (кг/с) остается одним и тем же во всех сечениях участка газопровода:

$$\dot{M} = \rho v S = \text{const.} \quad (109)$$

Здесь $\rho(x)$ – плотность газа; $v(x)$ – скорость газа; $S(x)$ – площадь поперечного сечения газопровода. При этом объемный рас-

ход Q газа ($\text{м}^3/\text{с}$), равный $v \cdot S$, изменяется от сечения к сечению. Если $S = S_0 = \text{const.}$, то объемный расход Q и скорость v газа увеличиваются от начала участка газопровода к его концу.

Коммерческим расходом Q_k газа ($\text{м}^3/\text{с}$), называется массовый расход газа, выраженный в стандартных кубических метрах. Очевидна формула:

$$Q_k = \frac{\dot{M}}{\rho_{\text{ст.}}}, \quad (110)$$

где $\rho_{\text{ст.}}$ — плотность газа при *стандартных* условиях ($p_{\text{ст.}} = 0,1013 \text{ МПа}$, $T = 293 \text{ К}$).

Распределение $p(x)$ давления по длине участка *простого* газопровода ($S = S_0 = \text{const.}$) при стационарном изотермическом ($T = T_0 = \text{const.}$) режиме работы имеет вид:

$$p^2(x) = p^2(0) - \frac{16 \cdot \dot{M}^2 \cdot \lambda \cdot ZRT}{\pi^2 d^5} \cdot x$$

или

$$p(x) = \sqrt{p^2(0) - \frac{16 \cdot \dot{M}^2 \cdot \lambda \cdot ZRT}{\pi^2 d^5} \cdot x}, \quad (111)$$

где x — координата вдоль оси газопровода, отсчитываемая от начала участка; $p(0) = p_n$ — давление газа в начале ($x = 0$) участка; λ — коэффициент гидравлического сопротивления, принимаемый постоянным; $d = D - 2\delta$ — внутренний диаметр газопровода; D, δ — внешний диаметр и толщина стенки трубопровода, соответственно. Кроме того, в формуле (111) коэффициент Z сжимаемости считается постоянным, вычисленным при среднем давлении на участке газопровода.

Среднее давление p_{cp} на участке газопровода представляется выражением:

$$p_{cp} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_n + \frac{p_k^2}{p_n + p_k} \right), \quad (112)$$

где p_k – давление в конце участка газопровода, то есть при $x = L$, где L – протяженность участка.

Давления p_n, p_k в начале и в конце участка газопровода связаны соотношением:

$$p_n^2 - p_k^2 = \frac{16 \cdot \dot{M}^2 \cdot \lambda \cdot ZRT \cdot L}{\pi^2 d^5}. \quad (113)$$

Массовый расход \dot{M} газа на участке газопровода выражается через давления на его концах следующей формулой:

$$\dot{M} = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{p_n^2 - p_k^2}{ZRT\lambda \cdot L}} \cdot d^5. \quad (114)$$

Если вычисления производятся в системе единиц СИ, то для коммерческого расхода газа $Q_k = \dot{M} / \rho_{ст.}$ существует представление:

$$Q_k = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_n^2 - p_k^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5 \quad (\text{м}^3/\text{с}), \quad (115)$$

где Δ – плотность газа по воздуху ($Q_k = \dot{M} / \rho_{ст.} = \dot{M} \cdot RT_{ст.} / p_{ст.}$; $R = R_b / \Delta$; $R_b = 287,1$ Дж/(кг К) – газовая постоянная воздуха; $(\rho_b)_{ст.} \approx 1,204$ кг/м³; $T_{ст.} = 293$ К, $p_{ст.} = 0,1013 \cdot 10^6$ Па).

Для расчета коэффициента λ гидравлического сопротивления можно использовать формулу

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2k}{d} \right)^{0,2}, \quad (116)$$

в которой k – среднее значение абсолютной эквивалентной шероховатости. Во многих случаях $k = 0,03 \div 0,05$ мм.

Если течение природного газа в газопроводе *неизотермическое*, то распределение $T(x)$ температуры по длине участка газопровода дается выражением

$$T(x) = T_{гр.} + (T_{н.} - T_{гр.}) \cdot e^{-ax} - D_* \cdot \frac{p_{н.} - p_{к.}}{a \cdot L} (1 - e^{-ax}), \quad (117)$$

где $T_{гр.}, T_{н.} = T(0)$ – температуры окружающего грунта и газа в начальном сечении участка, соответственно (К); $a = \alpha \pi d / M C_p$ (m^{-1}); α – коэффициент теплопередачи от газа в грунт ($\alpha \approx 1,5 \div 3,0$ Вт/(m^2 К)); C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении ($C_p \approx 2500$ Дж/(кг К)); D_* – коэффициент Джоуля-Томсона ($D_* \approx 0,3 \div 0,5$ К/МПа).

В пренебрежении эффектом Джоуля-Томсона (необратимым охлаждением природного газа), имеющим место только для реальных газов - справедлива *формула В.Г. Шухова*:

$$T(x) = T_{гр.} + (T_{н.} - T_{гр.}) \cdot e^{-ax}. \quad (118)$$

Температура $T_{к.}$ газа в конце участка газопровода с протяженностью L выражается формулой:

$$T_{к.} = T_{гр.} + (T_{н.} - T_{гр.}) \cdot e^{-aL}. \quad (119)$$

В этом случае распределение $T(x)$ температуры газа по длине участка можно представить в виде

$$\frac{T(x) - T_{гр.}}{T_{н.} - T_{гр.}} = \left(\frac{T_{к.} - T_{гр.}}{T_{н.} - T_{гр.}} \right)^{\frac{x}{L}}, \quad (120)$$

не содержащем явно коэффициент теплопередачи.

Средняя на участке трубопровода температура $T_{ср.}$ газа представляется формулой

$$T_{ср.} = T_{гр.} + \frac{T_{н.} - T_{к.}}{\ln \left(\frac{T_{н.} - T_{гр.}}{T_{к.} - T_{гр.}} \right)}, \quad (121)$$

где $T_{н.}, T_{к.}$ — температуры газа в начале и конце участка газопровода, соответственно.

ЗАДАЧИ

181. Перекачка газа по 100-км участку газопровода постоянного диаметра ведется в стационарном изотермическом режиме. Известны давления в начале и в конце участка, а также скорость в начале участка. Заполнить пустующие ячейки нижеследующей таблицы.

Координата, км	0	20	40	60	80	100
Давление, МПа	5,50					3,50
Скорость газа, м/с	5,00					

Коэффициент сжимаемости газа принять постоянным.

Ответ. Давления: 5,16; 4,80; 4,41; 3,98 МПа. Скорости: 5,73; 6,24; 6,91; 7,86 м/с.

182. При стационарной перекачке газа ($p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 194$ К) давление и температура в начале участка газопровода составляют 5,2 МПа и 35 °С, а в его конце – 3,5 МПа и 10 °С, соответственно. Определить, во сколько раз скорость газа в конце участка превышает скорость газа в его начале.

Ответ. В 1,375 раза.

183. Давление в начале участка газопровода составляет 7,5 МПа, а в конце участка – 4,0 МПа. Найти давление в середине этого участка.

Ответ. 6,0 МПа.

184. Давление в начале участка газопровода составляет 7,50 МПа, а в конце участка – 4,00 МПа. Найти давление в сечении, отстоящим на $1/3$ протяженности участка от его начала.

Ответ. 6,54 МПа.

185. Определить среднее давление на участке газопровода при стационарном изотермическом режиме перекачки, если давление в начале участка составляет 5,2 МПа, а в его конце – 3,5 МПа.

Ответ. 4,405 МПа.

186. Коммерческий расход газа ($\mu = 17,1$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,7$ МПа; $T_{кр.} = 194$ К) составляет 25 млн. м³/сутки. Найти объемный расход Q_v газа на входе в центробежный нагнетатель, если известно, что давление на входе в нагнетатель составляет 3,7 МПа, а температура газа +15 °С.

Ответ. 430 м³/мин.

187. Коммерческий расход газа ($\mu = 17,1$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,7$ МПа; $T_{кр.} = 194$ К) составляет 25 млн. м³/сутки. Найти отношение объемного расхода Q_n газа на выходе нагнетателя к объемному расходу Q_v на входе в нагнета-

тель, если известны давление и температура газа 3,7 МПа, +15 °С до нагнетателя, и 5,2 МПа, +35 °С после нагнетателя.

Ответ. 0,753.

188. Доказать, что увеличение давления в начале участка газопровода на величину Δp (при неизменном давлении в его конце) приводит к большему увеличению коммерческого расхода газа, чем уменьшение давления в конце участка на ту же величину Δp (при неизменном давлении в его начале).

189. Уменьшится или увеличится коммерческий расход газа на участке газопровода, если давления в начале и в конце этого участка одновременно увеличить на одну и ту же величину Δp ? Температуру, коэффициент сжимаемости и коэффициент гидравлического сопротивления считать постоянными.

Ответ. Увеличится.

190. Коммерческий расход газа, перекачиваемого по участку газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм, $k = 0,03$ мм) равен 20 млн. м³/сутки. Какой расход газа установился бы на участке такой же протяженности в газопроводе большего диаметра ($D = 1220 \times 12$ мм, $k = 0,03$ мм) при тех же давлениях в начале и конце участка. Среднюю температуру и коэффициент сжимаемости газа в сравниваемых вариантах считать одинаковыми.

Ответ. 31,85 млн. м³/сутки.

191. Компрессорная станция обеспечивает перекачку газа по участку газопровода постоянного диаметра, развивая при этом степень сжатия 1,56. Считая, что давления перед компрессорной станцией и в конце рассматриваемого участка равны друг другу, определить, на сколько нужно увеличить степень сжатия газа, чтобы расход перекачки возрос на 10 %. Давление в конце участка, среднюю темпе-

ратуру и коэффициент сжимаемости газа в сравниваемых вариантах считать одинаковыми.

Ответ. 1,654 (то есть на 6 %).

192. Давление в начале 125-км участка газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм, $k = 0,03$ мм) составляет 6,0 МПа, а в конце участка – 3,5 МПа. Определить коммерческий расход газа ($\Delta = 0,6$; $p_{кр.} = 4,8$ МПа; $T_{кр.} = 200$ К), перекачиваемого при постоянной температуре $+15$ °С.

Ответ. 37,64 млн. м³/сутки.

193. Давление в начале 120-км участка газопровода ($D = 1220 \times 12$ мм, $k = 0,03$ мм) составляет 5,5 МПа, а в конце участка – 3,8 МПа. Определить коммерческий расход газа ($\Delta = 0,59$; $p_{кр.} = 4,7$ МПа; $T_{кр.} = 194$ К), перекачиваемого при постоянной температуре $+10$ °С.

Ответ. 50,58 млн. м³/сутки.

194. Природный газ ($\Delta = 0,59$; $p_{кр.} = 4,7$ МПа; $T_{кр.} = 194$ К) перекачивают по участку газопровода ($L = 100$ км, $D = 1020 \times 10$ мм, $k = 0,05$ мм) в изотермическом режиме ($T = +10$ °С) с коммерческим расходом 30 млн. м³/сутки. Какое давление необходимо поддерживать в начале участка газопровода, чтобы давление в конце участка было не ниже 3,2 МПа?

Ответ. Не ниже 4,83 МПа.

195. Природный газ ($\Delta = 0,62$; $p_{кр.} = 4,75$ МПа; $T_{кр.} = 194$ К) необходимо транспортировать по участку газопровода ($L = 120$ км, $D = 1020 \times 10$ мм, $k = 0,03$ мм) с коммерческим расходом 35 млн. м³/сутки в изотермическом режиме при средней температуре $+12$ °С. Какое давление следует ожидать в конце участка газопровода, если давление в его начале составляет 5,5 МПа?

Ответ. 3,14 МПа.

196. Какой минимальный диаметр D ($\delta = 10$ мм; $k = 0,03$ мм) должен иметь 125-км участок газопровода, чтобы по нему транспортировать природный газ ($\Delta = 0,59$; $p_{кр.} = 4,7$ МПа; $T_{кр.} = 194$ К) с коммерческим расходом 28 млн. м³/сутки, если известно, что давление в начале участка не может быть выше 6,0 МПа, а в конце – ниже 4,0 МПа? Среднюю температуру транспортировки газа принять равной $+10$ °С.

Ответ. 1220 мм.

197. Природный газ ($C_p = 2500$ Дж/(кг К), $\Delta = 0,62$), транспортируют по участку газопровода ($L = 140$ км, $D = 1220 \times 10$ мм, $\alpha = 1,75$ Вт/(м² К)) с коммерческим расходом 32 млн. м³/сутки. При этом температура газа в начале участка составляет $+30$ °С, а температура грунта на глубине заложения оси газопровода – 0 °С. Найти распределение температуры газа по длине участка. Заполнить пустующие ячейки нижеследующей таблицы:

Координата, км	0	20	40	60	80	100	120	140
Температура, °С	30							

Эффектом Джоуля-Томсона пренебречь.

Ответ.

20	40	60	80	100	120	140
24,8	20,5	16,9	14,0	11,6	9,5	7,9

198. Известен эффект снижения температуры транспортируемого газа за счет эффекта Джоуля-Томсона. Оценить величину этого эффекта (коэффициент D_* Джоуля-Томсона равен $0,3$ °С/МПа), если известно, что природный газ ($C_p = 2500$ Дж/(кг К), $\Delta = 0,62$) транспортируют по участку газопровода ($L = 140$ км, $D = 1220 \times 10$ мм) с коммерческим расходом 32 млн. м³/сутки, причем давление в начале участка составляет 6,0 МПа, а в конце участка - 3,5 МПа. Извест-

но также, что температура газа в начале участка составляет $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура грунта на глубине заложения оси газопровода – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти распределение температуры газа по длине участка ($\alpha = 1,75\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$). Заполнить пустующие ячейки следующей таблицы:

Координата, км	0	20	40	60	80	100	120	140
Температура газа без учета эффекта Джоуля - Томсона, $^{\circ}\text{C}$	30	24,9	20,6	17,1	14,2	11,7	9,7	8,1
Температура газа с учетом эффекта Джоуля - Томсона, $^{\circ}\text{C}$	30							
Поправка к формуле В.Г. Шухова, $^{\circ}\text{C}$	0							

Ответ.

Координата, км	0	20	40	60	80	100	120	140
Температура газа с учетом эффекта Джоуля - Томсона, $^{\circ}\text{C}$	30	24,7	20,3	16,7	13,7	11,2	9,3	7,4
Поправка к формуле В.Г. Шухова, $^{\circ}\text{C}$	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5

199. Природный газ ($C_p = 2500\text{ Дж}/(\text{кг К})$, $\Delta = 0,62$) транспортируют по участку газопровода ($L = 140\text{ км}$, $D = 1220 \times 10\text{ мм}$, $\alpha = 1,75\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$) с коммерческим расходом $32\text{ млн. м}^3/\text{сутки}$. При этом температура газа в начале участка составляет $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура грунта на глубине заложения оси газопровода – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти среднюю по участку температуру газа. Эффектом Джоуля-Томсона пренебречь.

Ответ. $16,56\text{ }^{\circ}\text{C}$.

200. Природный газ ($C_p = 2500$ Дж/(кг К), $\Delta = 0,59$) перекачивают по участку газопровода ($D=1020 \times 10$ мм, $L=125$ км) с коммерческим расходом 25 млн. м³/сутки. Температура газа в начале участка газопровода составляет 35 °С, а в его конце 15 °С. Каково среднее значение коэффициента α теплопередачи на этом участке, если температура окружающего грунта составляет 10 °С?

Ответ. 2,06 Вт/(м² К).

1.12. СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Справочный материал

Сложным – называется газопровод, состоящий из нескольких последовательно или параллельно соединенных простых газопроводов.

Расчет сложного газопровода удобно осуществлять по упрощенным, инженерным, формулам, в которые входят *масштабированные коэффициенты*, позволяющие вводить аргументы в удобном для вычислений масштабе измерения. Так, например, формулу (115) предыдущего раздела, связывающую коммерческий расход газа Q_k с давлениями p_n в начале и p_k в конце участка газопровода, его протяженностью L и внутренним диаметром d , удобно представить в виде:

$$Q_k = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_n^2 - p_k^2}{L}}, \quad (122)$$

где A – константа, а K – так называемый *коэффициент расхода*:

$$K = \left(\frac{d}{d_3} \right)^{2,6}. \quad (123)$$

Входящий в эту формулу *эталонный диаметр* d_3 , выбирается произвольно, главным образом, из соображений удобства расчетов. Если давления p_n и p_k , выразить в **МПа**, протяженность L участка – в **км**, d и d_3 – в **мм**, температуру T – в **К**, то константу A можно представить в виде:

$$A = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d_3^{2,6}}{\sqrt{ZT\Delta}}, \quad (124)$$

при этом коммерческий расход Q_k газа будет выражаться в **млн. м³/сутки**. Здесь Δ – плотность газа по воздуху, то есть $\rho_{ст.} = (\rho_v.)_{ст.} \cdot \Delta$, а величины Z и T считаются постоянными (обычно, средними) по длине участка газопровода.

Ту же самую формулу (122), или формулу (113) предыдущего раздела, можно представить также в виде

$$p_n^2 - p_k^2 = B \cdot Q_k^2 \cdot \frac{L}{K^2}, \quad (125)$$

где $B = \frac{1}{A^2} = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{ZT\Delta}{d_3^{5,2}}$, причем в этой формуле так же,

как и в предыдущих, давления измеряются в **МПа**, протяженности – в **км**, диаметры – в **мм**, температуры – в **К**, коммерческий расход газа – в **млн. м³/сутки**, а величины Z , T и Δ считаются постоянными (средними) по длине участка газопровода.

Если участок сложного газопровода состоит из нескольких (n) участков (d_i, L_i) простого газопровода, соединенных *последовательно*, то для такого участка так же справедливы формулы

(122) и (125), если входящий в них коэффициент K расхода рассчитывать по формуле

$$\frac{L}{K^2} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{L_i}{K_i^2}, \quad (126)$$

где d_i, L_i – диаметр и протяженность i -го участка, составляющего сложный газопровод, соответственно; K_i – коэффициент расхода i -го участка простого газопровода; $L = \sum_{i=1}^{i=n} L_i$. Предполагается, естественно, что значения коэффициентов A_i для различных участков газопровода близки друг к другу. *Таким образом, для сложного газопровода, состоящего из последовательно соединенных участков простых газопроводов, величина L/K^2 равна сумме соответствующих величин L_i/K_i^2 .*

Если же участок сложного газопровода состоит из нескольких (n) участков (d_i, L_i) простых газопроводов, соединенных *параллельно*, то для такого участка так же справедливы формулы (122) и (125), если только входящий в них коэффициент K расхода рассчитывать по формуле

$$K = \sum_{i=1}^{i=n} K_i, \quad (127)$$

где K_i – коэффициент расхода i -го участка простого газопровода. *Таким образом, для сложного газопровода, состоящего из параллельно соединенных участков простых газопроводов, коэффициент расхода K равен сумме коэффициентов расхода K_i соединяемых участков.*

ЗАДАЧИ

201. Участок газопровода состоит из двух последовательно соединенных сегментов: первого (d_1, L_1) и второго (d_2, L_2). Давление в начале участка газопровода равно p_n , а в конце газопровода - p_k . Чему равно среднее давление p_{cp} на участке этого газопровода?

$$\text{Ответ. } p_{cp} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_* + \frac{L_1}{L} \frac{p_n^2}{p_n + p_*} + \frac{L_2}{L} \frac{p_k^2}{p_k + p_*} \right),$$

где $p_* = \sqrt{\frac{p_n^2 \cdot K_1^2 / L_1 + p_k^2 \cdot K_2^2 / L_2}{K_1^2 / L_1 + K_2^2 / L_2}}$ – давление в месте сочленения трубопроводных сегментов разного диаметра.

202. На участке газопровода с диаметром D_1 решили заменить существующую трубу трубой большего диаметра D_2 ($D_2 > D_1$) на протяжении половины длины участка. В каком случае среднее давление на участке газопровода будет большим - в случае, если заменить трубой большего диаметра первую половину участка или вторую? Давления в начале и конце участка в сравниваемых вариантах считать одинаковыми.

Ответ. Первую.

203. Участок газопровода состоит из двух последовательно соединенных сегментов: первого ($D_1 = 1220 \times 10$ мм, $L_1 = 70$ км) и второго ($D_2 = 1020 \times 10$ мм, $L_2 = 80$ км). Давление в начале участка газопровода равно 7,3 МПа, а в его конце – 4,0 МПа. Найти среднее давление на участке этого газопровода?

Ответ. 6,14 МПа.

204 Природный газ ($\mu = 18$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 196$ К) транспортируют по 120-км участку газопрово-

да, состоящего из двух последовательно соединенных трубопроводных сегментов: первый – ($D_1 = 1220 \times 12$ мм, $L_1 = 40$ км); второй – ($D_2 = 1020 \times 10$ мм, $L_2 = 80$ км). Давление в начале участка составляет 5,5 МПа, в конце участка – 3,5 МПа. Транспортировка ведется в режиме, близком к изотермическому, при средней температуре 15°C . Найти коммерческий расход газа

Ответ. 36,82 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$.

205. Первые 60 км участка газопровода имеют диаметр 1220 мм при толщине стенки 12 мм, а остальные 70 км – 1020 мм при толщине стенки 10 мм. Во сколько раз большим был бы коммерческий расход газа на рассматриваемом участке при тех же значениях давления в начале и конце участка, если бы этот участок целиком состоял из трубы $D = 1220 \times 10$ мм?

Ответ. В 1,352 раза, то есть на 35,2%.

206. На участке газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм, $L = 140$ км) понадобилось заменить 45 км трубы. Поскольку в распоряжении имелись трубы диаметром $D = 1220 \times 12$ мм, то замену решено было делать из труб именно этого большего диаметра. Определить, на сколько процентов можно увеличить расход газа на рассматриваемом участке газопровода, если давления в его начале и конце сохранить прежними.

Ответ. На 11,4 %.

207. Участок газопровода состоит из трех последовательно соединенных сегментов: первого ($D_1 = 1220 \times 12$ мм, $L_1 = 70$ км), второго ($D_2 = 1020 \times 10$ мм, $L_2 = 30$ км) и третьего ($D_3 = 820 \times 10$ мм, $L_3 = 50$ км). Найти коммерческий расход газа ($\Delta = 0,62$) на этом участке, если давление в начале участка равно 5,75 МПа, а в его конце – 3,8 МПа. Транспортировку газа считать происходящей в изотермиче-

ском режиме ($T = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$), среднее значение коэффициента Z сжимаемости принять равным 0,9.

Ответ. 24,8 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$.

208. На участке газопровода ($D = 1020 \times 10 \text{ мм}$, $L = 120 \text{ км}$) проложили лупинг длиной 75 км из трубы того же диаметра, что и основная магистраль. Во сколько раз увеличился коммерческий расход газа, если известно, что транспортировка газа ведется при тех же давлениях в начале и конце участка, что были до прокладки лупинга.

Ответ. В 1,372 раза.

209. Определить коммерческий расход газа ($\Delta = 0,59$) на участке газопровода ($D = 1020 \times 12 \text{ мм}$, $L = 120 \text{ км}$), имеющим лупинг ($D_{\text{л.}} = 820 \times 10 \text{ мм}$, $L_{\text{л.}} = 40 \text{ км}$), если давление в начале участка составляет 5,5 МПа, а в его конце - 3,8 МПа. Принять, что температура газа постоянна вдоль всего участка и равна $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднее значение коэффициента сжимаемости равно 0,9. Определить также, на сколько лупинг увеличивает пропускную способность участка.

Ответ. 35,135 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$; \approx на 11,6 %.

210. На первых 70 км участок магистрального газопровода – двухтрубный, то есть состоит из двух параллельных трубопроводов ($D_1 = 530 \times 8 \text{ мм}$), а на остальных 50 км он – однострубно́й ($D_2 = 720 \times 10 \text{ мм}$). В одном из вариантов проекта модернизации газопровода решено заменить двухтрубную часть участка однострубно́й с диаметром $D_2 = 720 \times 10 \text{ мм}$. Спрашивается, увеличится или уменьшится пропускная способность участка в этом варианте, если давления в начале и конце участка оставить такими же, какими они были до модернизации?

Ответ. Увеличится $\approx 7 \text{ \%}$.

211. Участок газопровода состоит из двух параллельных трубопроводов: первый $D_1 = 1020 \times 12 \text{ мм}$, второй

$D_2 = 820 \times 10$ мм, причем давления в них одинаковы, как в началах, так и в концах. Для текущего ремонта понадобилось временно вывести из эксплуатации половину второго трубопровода, начиная от середины и кончая концом. Для этого соорудили перемычку, соединив середины трубопроводов между собой, и поток газа из второй трубы направили в первую трубу. Определить, на сколько процентов уменьшится при этом пропускная способность участка, если давления в его начале и конце сохранить прежними. Сопротивлением перемычки пренебречь.

Ответ. На 24 %.

212. Для того, чтобы уменьшить степень сжатия газа на компрессорной станции, решено увеличить давление на ее входе (то есть в конце предыдущего участка) на 15% от существующего значения, сохранив при этом коммерческий расход Q_k газа и давление p_n в начале предыдущего участка неизменным. В качестве способа реализации такого решения избрали прокладку лупинга на предыдущем участке газопровода из труб того же диаметра, что и основная магистраль. Какую долю от протяженности предыдущего участка должен иметь лупинг, если известно, что отношение p_n/p_k существующих давлений в начале и конце этого участка, соответственно, равно 1,6?

Ответ. 27,6 %.

213. Степень сжатия газа на компрессорной станции можно уменьшить без снижения коммерческого расхода за счет снижения потерь давления на 140-км участке газопровода, следующем за станцией. Для этого на части рассматриваемого участка решено проложить лупинг с диаметром, равным диаметру основной магистрали. Определить длину такого лупинга, если известны существующие значения давлений: 6,5 МПа в начале участка, и 3,8 МПа в его конце, а также требование, согласно которому давление в начале

участка должно быть снижено на 1,0 МПа, а в конце участка остаться неизменным.

Ответ. 80,5 км.

214. Природный газ транспортируют по 100-км участку газопровода $D_0 = 1020 \times 10$ мм с коммерческим расходом $Q_{к.} = 28$ млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$. На сколько может увеличить пропускную способность этого участка лупинг, имеющий диаметр $D_1 = 820 \times 10$ мм и протяженность 40 км. Давления в начале и конце участка в сравниваемых вариантах считать одинаковыми.

Ответ. На 4 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$.

215. На 150-км участке газопровода ($D = 820 \times 10$ мм) имеются два лупинга: первый ($D_1 = 620 \times 10$ мм) с протяженностью 20 км, и второй ($D = 530 \times 8$ мм) с протяженностью 50 км. Определить коммерческий расход газа ($\Delta = 0,62$) на рассматриваемом участке, если давление в начале участка равно 6,2 МПа, а в конце участка – 3,8 МПа. Принять, что средняя температура газа на участке газопровода составляет 15°C , а коэффициент сжимаемости $Z \cong 0,9$.

Ответ. 15,79 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$.

216. Природный газ транспортируют по 120-км участку газопровода. Требуется увеличить коммерческий расход газа на рассматриваемом участке газопровода на 25 % при сохранении давлений в начале и конце участка. Какую протяженность должен иметь лупинг, выполненный из трубы такого же диаметра, что и основная магистраль, чтобы обеспечить требуемое увеличение расхода. Транспортировка газа ведется в режиме, близком к изотермическому.

Ответ. 57,6 км.

217. Коммерческий расход газа ($\Delta = 0,59$) на участке газопровода ($L = 125$ км, $D = 1020 \times 12$ мм, $T_{ср.} = 12^\circ\text{C}$, $Z = 0,92$) составляет 32,5 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$, а давление в начале

участка равно 4,8 МПа. Через отводы, подключенные к газопроводу в двух точках: на 40-м и 75-м км, газ отбирается из основной магистрали, причем расход в первом отводе составляет 2 млн. м³/сутки, а во втором – 4 млн. м³/сутки. Определить давление в конце участка газопровода.

Ответ. 2,83 МПа.

218. На 75-м км участка газопровода ($D = 1020 \times 12$ мм, $L = 130$ км) имеется отвод ($L_0 = 20$ км, $D_0 = 530 \times 8$ мм). Какую часть расхода газа основной магистрали забирает отвод, если известны давления $p_n = 5,8$ МПа в начале участка, $p_k = 3,5$ МПа в его конце и $p_{k0} = 2,0$ МПа – в конце отвода?

Ответ. 0,451, то есть $\approx 45,1$ %.

219. Природный газ ($\Delta = 0,62$) транспортируют по 130-км участку газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм), причем давление в начале участка равно 5,8 МПа, а в конце участка - 3,75 МПа. В 30 км от начала участка имеется отвод, через который газ подают на станцию подземного хранения газа (СПХГ) с расходом 8,0 млн. м³ сутки для закачки в пласт. Определить коммерческий расход газа в начале и в конце рассматриваемого участка. Принять, что средняя температура газа на участке газопровода составляет 12 °С, а коэффициент сжимаемости $Z \approx 0,9$.

Ответ. 39 и 31 млн. м³/сутки.

220. Участок газопровода состоит из двух последовательно соединенных сегментов: первого (d_1, L_1) и второго (d_2, L_2). Температура в начале участка газопровода равна T_n °С, а в конце газопровода - T_k °С. Чему равна средняя температура T_{cp} на участке этого газопровода, если температура окружающего грунта составляет $T_{гр}$ °С? Принять, что

коэффициент α теплопередачи для обоих сегментов одинаков.

Ответ.

$$T_{\text{ср.}} = T_{\text{гр.}} + \frac{d_1 L_1 + d_2 L_2}{L_1 + L_2} \cdot \left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{*}}{d_1} + \frac{T_{*} - T_{\text{к.}}}{d_2} \right) / \ln \left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}} \right), \text{ где}$$

$$T_{*} = T_{\text{гр.}} - (T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}})^{d_2 L_2 / (d_1 L_1 + d_2 L_2)} (T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}})^{d_1 L_1 / (d_1 L_1 + d_2 L_2)}.$$

1.13 РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ ГАЗА

Справочный материал

Транспортировка газа по трубопроводам осуществляется компрессорными станциями (КС), оборудованными газоперекачивающими агрегатами (ГПА).

Газоперекачивающие агрегаты состоят из *привода*, в качестве которого могут использоваться газовые турбины, электродвигатели или двигатели внутреннего сгорания, и *центробежного нагнетателя* (ЦБН). Задача привода состоит в том, чтобы вращать вал центробежного нагнетателя; задача центробежного нагнетателя - принудительно (за счет центробежной силы инерции) перемещать газ из линии низкого давления (линии всасывания) в линию высокого давления (линию нагнетания) [7].

Характеристиками центробежных нагнетателей называют зависимости степени сжатия $\varepsilon = p_{\text{н.}} / p_{\text{в.}}$, внутренней мощности N (кВт) и политропического к.п.д. η от объемного расхода $Q_{\text{в.}}$, м³/мин (подачи) газа при постоянном числе n об/мин рабочего колеса:

$$\varepsilon_n = f_1(p_{\text{в.}}, p_{\text{н.}}, Q_{\text{в.}}, n, D, \dots); \quad N_n = f_2(p_{\text{в.}}, p_{\text{н.}}, Q_{\text{в.}}, n, D, \dots);$$

$$\eta_n = f_3(p_{\text{в.}}, p_{\text{н.}}, Q_{\text{в.}}, n, D, \dots),$$

где $\rho_{в.}, p_{в.}, Q_{в.}$ – плотность, давление и объемный расход газа в линии всасывания нагнетателя; $p_{н.}$ – давление в линии нагнетания ЦБН; D – диаметр его рабочего колеса.

В безразмерном виде эти характеристики имеют вид:

$$\varepsilon_n = F_1 \left(\frac{p_{в.}/\rho_{в.}}{n^2 D^2}, \frac{Q_{в.}/S_0}{nD} \right), \quad \frac{N_n/S_0}{\rho_{в.} n^3 D^3} = F_2 \left(\frac{p_{в.}/\rho_{в.}}{n^2 D^2}, \frac{Q_{в.}/S_0}{nD} \right),$$

$$\eta_n = F_3 \left(\frac{p_{в.}/\rho_{в.}}{n^2 D^2}, \frac{Q_{в.}/S_0}{nD} \right),$$

где индекс n показывает, что характеристики ЦБН взяты при числе n оборотов его рабочего колеса.

Из соображений размерности отсюда следует [9]:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n_0} \left(\frac{p_{в.} n_0^2}{\rho_{в.} n^2}, Q_{в.} \frac{n_0}{n} \right), \quad N_n = \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \cdot N_{n_0} \left(\frac{p_{в.} n_0^2}{\rho_{в.} n^2}, Q_{в.} \frac{n_0}{n} \right),$$

$$\eta_n = \eta_{n_0} \left(\frac{p_{в.} n_0^2}{\rho_{в.} n^2}, Q_{в.} \frac{n_0}{n} \right), \quad (128)$$

где $\varepsilon_{n_0}, N_{n_0}, \eta_{n_0}$ – характеристики ЦБН при номинальном, в частности, *паспортном* числе (n_0) оборотов вала рабочего колеса.

Условия приведения характеристик ЦБН к универсальному виду предполагают представления их в форме (128) с той только разницей, что в линии всасывания нагнетателя выбираются вполне определенные фиксированные условия:

$$Z_{нр.} = 0,91; R_{нр.} = 490 \text{ Дж/кг К}; T_{нр.} = 288 \text{ К}; n = n_0.$$

Если при этом учесть, что $p_v/\rho_v = Z_v R_v T_v$, то при условиях приведения $(p_v/\rho_v)_{пр.} = Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.}$ имеют место так называемые *приведенные характеристики ЦБН*:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n_0} \left(Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.} \left(\frac{n_0}{n} \right)^2, (Q_v)_{пр.} \right); \quad (129)$$

$$N_n = \rho_v \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_v} \right)_{пр.} \left(Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.} \left(\frac{n_0}{n} \right)^2, (Q_v)_{пр.} \right); \quad (130)$$

$$\eta_n = \eta_{n_0} \left(Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.} \left(\frac{n_0}{n} \right)^2, (Q_v)_{пр.} \right), \quad (131)$$

где использованы обозначения:

$$\left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр.} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.}}{Z_v R T_v}} - \text{приведенное число оборотов};$$

$$(Q_v)_{пр.} = Q_v \frac{n_0}{n} - \text{приведенный расход всасывания}.$$

Приведенные характеристики двух центробежных нагнетателей 370-18-1 ($n_0 = 4800$ об/мин) и Н-300-1,23 ($n_0 = 6150$ об/мин) представлены на рис. 1.13 и 1.14 [7].

В политропическом процессе сжатия газа в ЦБН температура $T_{н.}$ в линии нагнетания связана с температурой $T_{в.}$ в линии всасывания формулой:

$$\frac{T_{н.}}{T_{в.}} = \left(\frac{p_{н.}}{p_{в.}} \right)^{\frac{m-1}{m}} = \varepsilon^{\frac{m-1}{m}}, \quad (132)$$

где m – показатель политропы ($m = 1,25 \div 1,30$).

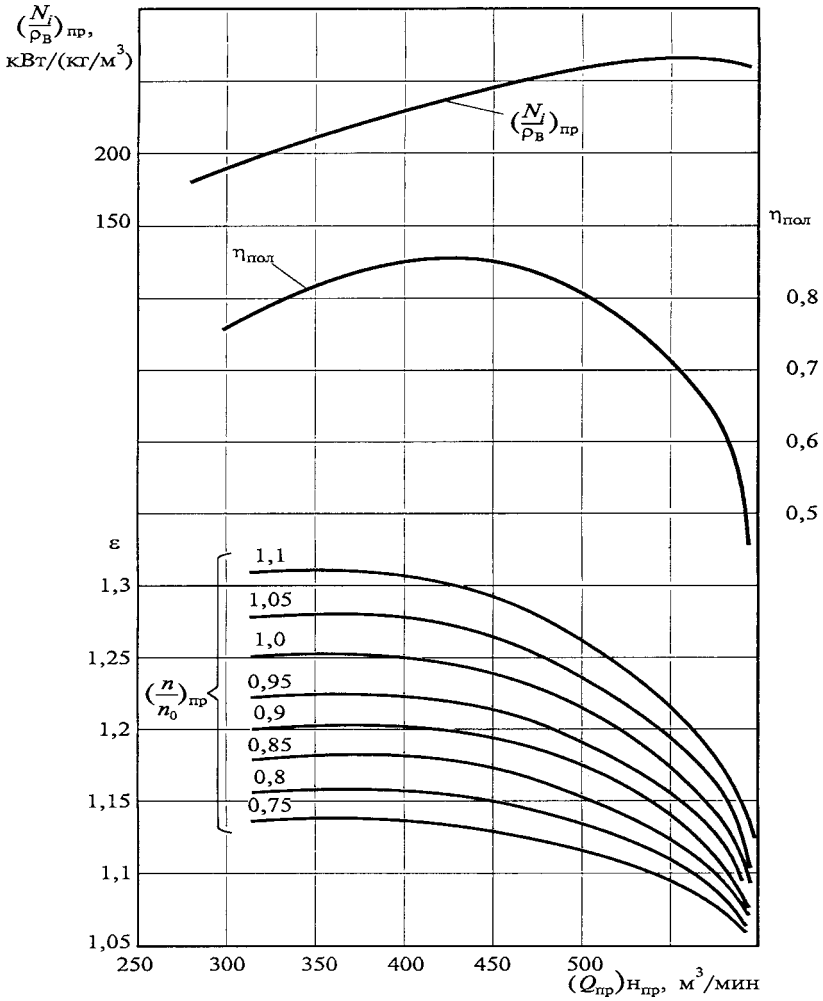


Рис. 1.13. Приведенные характеристики нагнетателя 370-18-1 при $T_{пр.} = 288 \text{ К}$; $Z_{пр.} = 0,9$; $R_{пр.} = 490 \text{ Дж}/(\text{кг К})$

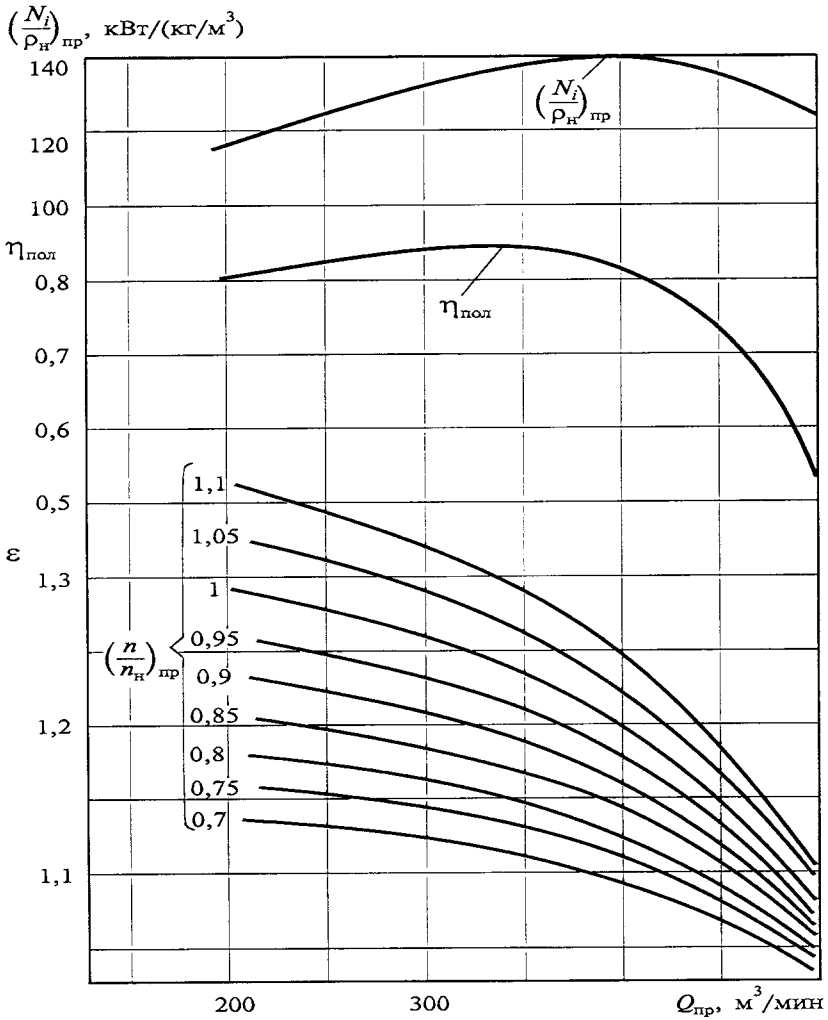


Рис. 1.14. Приведенные характеристики нагнетателя Н-300-1,23 при $T_{\text{пр}} = 288 \text{ K}$; $Z_{\text{пр}} = 0,91$; $R_{\text{пр}} = 490 \text{ Дж}/(\text{кг К})$.

Полезную мощность $N_{\text{пол.}}$, затрачиваемую на политропическое сжатие газа, приближенно можно рассчитать по формуле

$$N_{\text{пол.}} = \frac{\gamma}{Z_{\text{в.}} \cdot (\gamma - 1)} \cdot p_{\text{в.}} \cdot Q_{\text{в.}} \left(\varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right) = \frac{\gamma}{Z_{\text{н.}} \cdot (\gamma - 1)} \cdot p_{\text{н.}} \cdot Q_{\text{н.}} \left(1 - \varepsilon^{\frac{1-m}{m}} \right), \quad (133)$$

где $\gamma = C_p / C_v$ - показатель адиабаты газа.

Мощность $N_{\text{влп.}}$ на валу привода нагнетателя дается формулой

$$N_{\text{влп.}} = N_{\text{пол.}} + N_{\text{мех.}}, \quad (134)$$

где $N_{\text{мех.}}$ - мощность механических потерь, принимаемых, как правило, равными 100 кВт для газотурбинных и 150 кВт для электрических приводов.

ЗАДАЧИ

221. Определить плотность $\rho_{\text{в.}}$ газа ($\mu = 17,36$ кг/кмоль, $p_{\text{кр.}} = 4,8$ МПа, $T_{\text{кр.}} = 198$ К), поступающего во всасывающий коллектор компрессорной станции, если известно, что давление в нем равно 4,0 МПа, а температура - $+ 15$ °С.

Ответ. 31,87 кг/м³.

222. Найти объемный расход $Q_{\text{в.}}$ (м³/мин) газа в линии всасывания компрессорной станции, если коммерческий расход газа ($p_{\text{кр.}} = 4,7$ МПа, $T_{\text{кр.}} = 194$ К) составляет 15 млн. м³/сутки, а давление и температура в линии всасывания КС равны 3,5 МПа и 15 °С, соответственно.

Ответ. 274 м³/мин.

223. Давление и температура газа на входе в центробежный нагнетатель составляют 3,5 МПа и 15 °С, а на выходе из него - 4,55 МПа и 31,5 °С, соответственно. На сколько градусов увели-

чится температура газа на выходе из центробежного нагнетателя, если при той же самой степени сжатия температура на его входе увеличится на 5°C ?

Ответ. $5,3^{\circ}\text{C}$.

224. Давление природного газа ($\mu = 17$ кг/кмоль, $p_{\text{кр.}} = 4,7$ МПа, $T_{\text{кр.}} = 170$ К) в линии всасывания центробежного нагнетателя 370-18-1 ($n_0 = 4800$ об/мин) составляет 3,5 МПа, а температура - $+10^{\circ}\text{C}$. Определить степень сжатия, которую развивает этот нагнетатель при подаче 400 м³/мин и числе оборотов 4300 об/мин.

Ответ. 1,19.

225. Давление природного газа ($\mu = 18,5$ кг/кмоль, $p_{\text{кр.}} = 4,8$ МПа, $T_{\text{кр.}} = 195$ К) в линии всасывания центробежного нагнетателя Н-300-1,23 ($n_0 = 6150$ об/мин) составляет 3,75 МПа, а температура - $+10^{\circ}\text{C}$. Определить степень сжатия, которую развивает этот нагнетатель при подаче 260 м³/мин и числе оборотов 5300 об/мин.

Ответ. 1,21.

226. На сколько повысится степень сжатия газа нагнетателем Н-300-1,23, работающим в условиях, описанных в предыдущей задаче, если число его оборотов увеличить с 5300 до номинального значения $n_0 = 6150$ об/мин?

Ответ. 1,31.

227. Газоперекачивающий агрегат с центробежным нагнетателем Н-300-1,23 ($n_0 = 6150$ об/мин) перекачивает природный газ ($\Delta = 0,59$, $p_{\text{кр.}} = 4,75$ МПа, $T_{\text{кр.}} = 198$ К), причем частота вращения ротора нагнетателя составляет 6500 об/мин, а степень сжатия 1,25. Определить коммерческий расход газа, обеспечиваемый этим агрегатом, если известно, что давление и температура газа на входе в нагнетатель равны 3,8 МПа и 17°C , соответственно.

Ответ. 22,06 млн. м³/сутки.

228. Представить $(\varepsilon - Q_{в.пр.})$ – характеристики центробежно-го нагнетателя 370-18-1, рис. 1.13, в виде $\varepsilon^2 = a - b \cdot Q_{в.пр.}^2$, где $\varepsilon = p_n / p_v$; $Q_{в.пр.}$ – приведенное значение объемного расхода газа на входе в нагнетатель; a, b – коэффициенты аппроксимации, зависящие от приведенного числа $(n/n_0)_{пр.}$ оборотов ротора нагнетателя: $(n/n_0)_{пр.} = 0,95$; $(n/n_0)_{пр.} = 1,00$; $(n/n_0)_{пр.} = 1,05$. Приближение строить по двум точкам, имеющим абсциссы $(Q_{в.пр.})_1 = 350$ м³/мин; и $(Q_{в.пр.})_2 = 550$ м³/мин.

Ответ.

$$(n/n_0)_{пр.} = 0,95: \varepsilon^2 = 1,62 - 0,983 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2;$$

$$(n/n_0)_{пр.} = 1,00: \varepsilon^2 = 1,69 - 1,041 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2;$$

$$(n/n_0)_{пр.} = 1,05: \varepsilon^2 = 1,79 - 1,235 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2.$$

229. Представить $(\varepsilon - Q_{в.пр.})$ – характеристики центробежно-го нагнетателя Н-300-1,23, рис. 1.14, в виде $\varepsilon^2 = a - b \cdot Q_{в.пр.}^2$, где $\varepsilon = p_n / p_v$; $Q_{в.пр.}$ – приведенное значение объемного расхода газа на входе в нагнетатель; a, b – коэффициенты аппроксимации, зависящие от приведенного числа $(n/n_0)_{пр.}$ оборотов ротора нагнетателя: $(n/n_0)_{пр.} = 0,95$; $(n/n_0)_{пр.} = 1,00$; $(n/n_0)_{пр.} = 1,05$. Приближение строить по двум точкам, имеющим абсциссы $(Q_{в.пр.})_1 = 250$ м³/мин; и $(Q_{в.пр.})_2 = 450$ м³/мин.

Ответ.

$$(n/n_0)_{пр.} = 0,95: \varepsilon^2 = 1,69 - 2,040 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2$$

$$(n/n_0)_{пр.} = 1,00: \varepsilon^2 = 1,76 - 2,165 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2;$$

$$(n/n_0)_{пр.} = 1,05: \varepsilon^2 = 1,91 - 2,668 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2.$$

230. Центробежные нагнетатели Н-300-1,23 ($n_0 = 6150$ об/мин) используют для перекачки природного газа ($\Delta = 0,62$, $p_{кр.} = 4,8$ МПа, $T_{кр.} = 195$ К) с коммерческим расходом 15 млн. м³/сутки в расчете на каждый нагнетатель. При этом степень сжатия, необходимая для транспортирования газа по участку газопровода, следующему за КС, равна 1,2. Определить число оборотов нагнетателя и мощность на валу его привода, если известно, что давление и температура в линии всасывания нагнетателя равны 3,2 МПа и +10 °С, соответственно.

Ответ. 5380 об/мин; 2518 кВт.

231. Определить необходимое число оборотов вала центробежного нагнетателя 370-18-1 ($n_0 = 4800$ об/мин), обеспечивающего транспортировку природного газа ($\Delta = 0,62$, $p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 194$ К) с коммерческим расходом 22 млн. м³/сутки и степенью сжатия 1,25. Известно, что давление и температура газа в линии всасывания нагнетателя составляют 3,8 МПа и +15 °С, соответственно.

Ответ. 4714 об/мин.

232. Природный газ ($\Delta = 0,62$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 200$ К) перекачивают по 125-км участку газопровода ($D = 1220 \times 12$ мм). Транспортировка газа ведется двумя одинаковыми ГПА с нагнетателями Н-300-1,23 ($n_0 = 6150$ об/мин), соединенными параллельно и обеспечивающими суммарный коммерческий расход 10 млрд.м³/год (число рабочих дней в году считается равным 350). Определить число оборотов роторов этих нагнетателей и суммарно потребляемую мощность, если известно, что давление в конце всех участков газопровода составляет 3,5 МПа, а температура транспортируемого газа постоянна и равна 12 °С.

Ответ. 5360 об/мин; 5,4 МВт.

233. Природный газ ($\Delta = 0,65$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,75$ МПа, $T_{кр.} = 195$ К) транспортируют по 105-км участку газопровода ($D = 1220 \times 12$ мм) двумя одинаковыми ГПА с нагнетателями 370-18-1 ($n_0 = 4800$ об/мин), соединенными параллельно. Определить, какова должна быть степень сжатия газа и число оборотов роторов нагнетателей, чтобы обеспечить в газопроводе коммерческий расход 21 млрд.м³/год (число рабочих дней в году считается равным 350). Известно, что давление в конце участка газопровода составляет 3,8 МПа, а в линии всасывания нагнетателей – 4,7 МПа, при этом температура газа в линии всасывания равна +12 °С, ожидаемая после компримирования +30 °С, окружающего грунта +8 °С.

Ответ. 1,28; 4750 об/мин.

234. Два одинаковых центробежных нагнетателя Н-300-1,23 ($n_0 = 6150$ об/мин), соединенные последовательно, перекачивают природный газ ($\mu = 17$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 170$ К). В каждом нагнетателе происходит политропическое ($m = 1,27$) сжатие газа, причем промежуточное охлаждение отсутствует. Определить степень сжатия газа системой этих двух нагнетателей, если давление и температура в линии всасывания первого нагнетателя составляют 3,5 МПа и +10 °С, числа n_1 и n_2 оборотов их рабочих колес – 5300 и 5700 об/мин, соответственно, а объемная подача $Q_{в.1}$ газа при условиях входа в первый из них составляет 250 м³/мин. Найти также температуру газа на выходе второй ступени сжатия.

Ответ. 1,46; 307 К.

235. Два центробежных нагнетателя 370-18-1 ($n_0 = 4800$ об/мин), соединенные последовательно, перекачивают природный газ ($\Delta = 0,62$, $p_{кр.} = 4,7$ МПа, $T_{кр.} = 200$ К) с расходом $Q_{в.1} = 500$ м³/мин. Число n_1 оборотов ротора первого нагнетателя равно номинальному – 4800 об/мин, а число оборо-

тов n_2 ротора второго нагнетателя должно быть подобрано так, чтобы общая степень сжатия $p_{n2}/p_{в1}$ системой нагнетателей составляла 1,5. Определить число n_2 оборотов ротора второго ЦБН и суммарную мощность системы нагнетателей, если давление и температура на входе в нее составляют $p_{в1} = 3,2$ МПа, $T_{в1} = 15$ °С. Принять, что в нагнетателях происходит политропическое ($m = 1,25$) сжатие газа, причем промежуточным охлаждением и потерями в соединительных устройствах пренебречь

Ответ. 4670 /мин; 14,05 МВт.

1.14. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОПРОВОДАХ. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Справочный материал

Переходными называются нестационарные процессы в газопроводе, обусловленные сменой одного режима транспортировки газа другим. В нестационарных течениях газодинамические параметры потока в каждом сечении x не остаются постоянными величинами, а зависят от времени t .

Поскольку газ представляет собой *существенно сжимаемую среду*, плотность которой зависит как от давления, так и от температуры, то для описания нестационарных течений газа нужно использовать не только законы сохранения массы и количества движения, но также законы превращения энергии.

Нестационарные течения газа в газопроводах описываются системой трех дифференциальных уравнений с частными производными, отражающими основные законы физики, состоящей из *уравнения неразрывности* (закон сохранения массы); *уравнения движения* – (закон изменения количества движения; 2-й закон Ньютона) и *уравнения притока тепла* (следствие общего закона сохранения энергии и закона об изменении кинетической энергии системы материальных точек):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho v^2) = -\lambda(Re, k) \frac{1}{d} \frac{\rho v^2}{2}, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e_{\text{внут.}}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(e_{\text{внут.}} + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \rho v \right] = \frac{4}{d} \cdot \Theta_n. \end{cases} \quad (135)$$

Эта система служит для нахождения трех неизвестных функций $p(x, t)$, $v(x, t)$ и $T(x, t)$, зависящих от x и t [8]. В этих уравнениях: ρ – плотность газа; $Z(p, T)$ – коэффициент сжимаемости; $\lambda(Re, k)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $e_{\text{внут.}}(T)$ – внутренняя энергия единицы массы газа (Дж/кг); Θ_n – поток тепла, передаваемый через единицу площади поверхности в единицу времени, Дж/(м² с). Обычно эту систему замыкают алгебраическими соотношениями:

$$\begin{aligned} \rho &= p/ZRT, \\ e_{\text{внут.}} &= C_v T + \text{const.}, \\ J &= e_{\text{внут.}} + p/\rho = C_p T + \text{const.}, \\ \Theta_n &= -\alpha \cdot (T - T_{\text{гр.}}), \end{aligned} \quad (136)$$

где $J(T)$ – энтальпия единицы массы газа; α – коэффициент теплопередачи; $T_{\text{гр.}}$ – наружная температура; C_v, C_p – теплоемкости газа при постоянном объеме и давлении, соответственно.

Из системы уравнений (135) следует, что малые колебания параметров газа (так называемые *возмущения*) распространяются вдоль оси трубопровода с некоторой скоростью c , называемой *адиабатической скоростью звука* [8]. Для этой скорости справедлива формула:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot ZRT}, \quad (137)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты (для метана $\gamma = 1,31$), коэффициент Z считается постоянным (для совершенных газов $Z = 1$). Скорость $c \approx 400 \div 420$ м/с.

Если скорость v течения газа мала по сравнению со скоростью звука c (то есть мало число Маха $v/c \ll 1$), если можно пренебречь влиянием колебаний температуры на параметры газа, то система уравнений (135) упрощается:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_{ст.} c^2 \cdot \frac{\partial q_{к.}}{\partial x} = 0, \\ \rho_{ст.} \frac{\partial q_{к.}}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{\lambda c^2 \rho_{ст.}^2}{2\gamma d} \cdot \frac{q_{к.}^2}{p}, \end{cases} \quad (138)$$

где $q_{к.}(x, t) = \dot{M}/S = \rho(x, t) \cdot v(x, t)/\rho_{ст.}$ – *массовая скорость газа* (м/с), представляющая собой удельный (то есть рассчитанный на единицу площади сечения трубопровода) массовый расход газа, выраженный в стандартных куб. м.: $\dot{M} = \rho_{ст.} q_{к.} S$. Система уравнений (138) содержит две неизвестные функции: $p(x, t)$ и $q_{к.}(x, t)$ от x и t . В общем случае систему уравнений (138) можно решать *методом характеристик* [8].

Для длинных (магистральных) газопроводов в уравнениях (138) пренебрегают инерцией газа ($\rho_{ст.} \partial q_{к.}/\partial t \ll \partial p/\partial x$) и считают, что движущая сила – градиент давления – уравновешивается только силой $-\lambda c^2 \rho_{ст.}^2 / 2\gamma d \cdot q_{к.}^2 / p$ трения газа о внутреннюю поверхность трубопровода.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{\lambda c^2 \rho_{ст.}^2}{2\gamma d} \cdot \frac{q_{к.}^2}{p}.$$

В этих случаях систему уравнений (138) сводят к одному уравнению *типа теплопроводности*:

$$\frac{\partial p^2(x, t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 p^2(x, t)}{\partial x^2} \quad (139)$$

для функции $p^2(x, t)$, или

$$\frac{\partial q_{к.}^2(x, t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 q_{к.}^2(x, t)}{\partial x^2} \quad (140)$$

для функции $q_{к.}^2(x, t)$. В этих уравнениях:

$$q_{к.}^2 = -\frac{\gamma d}{\lambda c^2 \rho_{ст.}^2} \cdot \frac{\partial p^2}{\partial x}, \quad (141)$$

а коэффициент a^2 (m^2/c) определяется формулой:

$$a^2 = \frac{c^2 d}{\gamma \lambda \cdot v_{ср.}}, \quad (142)$$

где $v_{ср.}$ – среднее значение скорости газа в рассматриваемом нестационарном процессе.

Уравнения (139) или (140) решают в совокупности с *начальными* (при $t = 0$) и *краевыми* (при $x = 0$ и $x = L$) условиями, отражающими начальное состояние газа на участке ($0 \leq x \leq L$) газопровода и работу тех устройств, которые расположены на левом ($x = 0$) и правом ($x = L$) концах участка.

Если, например, в начальный момент времени в газопроводе существовал стационарный режим перекачки с давлениями $p_{н.}$ в

сечении $x = 0$ и $p_{к.}$ в сечении $x = L$, то начальное условие можно принять в виде:

$$p^2(x, 0) = p_{н.}^2 - \frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L} \cdot x \quad - \text{ для уравнения (139);}$$

$$q_{к.}^2(x, 0) = \frac{\gamma d}{\lambda c^2 \rho_{ст.}} \cdot \frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L} = \text{const.} - \text{ для уравнения (140).}$$

В качестве краевых условий можно задавать давления и расходы в виде функций от времени или алгебраические связи между давлениями и расходами, моделирующими оборудование, установленное на концах газопровода:

$$x = 0: \varepsilon = \frac{p_{н.}(0, t)}{p_{в.}} = \Phi[q_{к.}(0, t)] \text{ или } p(L, t) = f_1(t); \quad (141)$$

$$x = L: p_{к.}(L, t) = f_1(t) \text{ или } q_{к.}(L, t) = f_2(t). \quad (142)$$

Продувка газопровода. При продувке участка газопровода один газ (воздух) вытесняет другой газ (природный газ), поэтому в зоне их контакта образуется метановоздушная смесь. Длина l_c зоны смеси в пределах концентраций 0,01-99,99% определяется формулой

$$l_c = 6,22 \cdot d^{0,45} \cdot \sqrt{L}, \quad (143)$$

где внутренний диаметр d берется в мм, протяженность L участка вытеснения – в км, а длина l_c смеси – в м.

При опорожнении сосудов высокого давления, в том числе участков газопровода, путем сброса газа через короткие насадки (*свечи*) различают два режима истечения: первый – *критический*, когда скорость газа на выходе насадка равна местной скорости

звука (такой режим называют *звуковым*), и *докритический*, когда эта скорость меньше скорости звука (*дозвуковой*).

Критический режим истечения возникает, если давление p_* в сосуде больше давления p_a в среде, куда выпускается газ (например, атмосферного; тогда $p_a = p_{\text{атм.}}$) в определенное число раз, зависящее от показателя γ адиабаты; в противном случае режим истечения – докритический.

Для определения параметров истечения совершенного газа существуют следующие формулы:

1. Если $\frac{p_*}{p_a} > \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$, имеет место *критический* режим

истечения газа ($v_c = c_c$). В этом случае:

$$p_c = p_* \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}; \quad T_c = T_* \cdot \frac{2}{\gamma+1}; \quad v_c = \sqrt{\frac{2\gamma RT_*}{\gamma+1}}, \quad (144)$$

где T_* – температура газа в сосуде (или в том сечении газопровода, в котором имеется выпускное отверстие); p_c, v_c и T_c – давление, скорость и температура газа, соответственно, на срезе выходного отверстия; $c_c = \sqrt{2\gamma RT_*/(\gamma+1)}$.

Время t_1 уменьшения давления в сосуде с объемом V от значения p_0 до значения p_t при критическом режиме истечения находится по формуле

$$t_1 = \frac{V}{S_c} \cdot \frac{\ln(p_0/p_t)}{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2\gamma RT_*}{\gamma+1}}}, \quad (145)$$

где S_c – площадь отверстия, через которое происходит истечение газа. Кроме того:

$$p_a \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \leq p_t \leq p_0.$$

2. Если $\frac{p_*}{p_a} < \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$, имеет место *докритический* режим истечения газа ($v_c < c_c$). В этом случае:

$$p_c = p_a; \quad T_c = T_* \cdot \left(\frac{p_*}{p_a} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}; \quad v_c = \sqrt{\frac{2\gamma RT_*}{\gamma - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_*}{p_a} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right]}. \quad (146)$$

Время t_1 уменьшения давления в сосуде с объемом V от значения p_0 до значения p_t при докритическом режиме истечения находится по формуле

$$t_2 = \frac{V}{S_c} \cdot \frac{F(\gamma, p_0/p_a, p_t/p_a)}{\sqrt{\frac{2\gamma RT_*}{\gamma + 1}}} \quad (147)$$

где $F(\gamma, p_0/p_a, p_t/p_a)$ – функция, определяемая интегралом:

$$F(\gamma, p_0/p_a, p_t/p_a) = \int_{p_t/p_a}^{p_0/p_a} \frac{d\xi}{\sqrt{\xi^{2(\gamma-1)/\gamma} - \xi^{(\gamma-1)/\gamma}}}.$$

В частном случае, для метана ($\gamma = 1,31$) и полного опорожнения сосуда ($p_0/p_a = 1,839$; $p_t/p_a = 1$): $F(1,31; 1,839; 1) \cong 3,87$ и

$$t_2 \cong 1,33 \cdot \frac{V}{S_c} \cdot \frac{1}{\sqrt{RT_*}}. \quad (148)$$

ЗАДАЧИ.

236. Найти адиабатическую скорость звука в газопроводе, транспортирующем газ ($\mu = 17,8$ кг/кмоль, $p_{кр.} = 4,8$ МПа, $T_{кр.} = 194$ К; $C_p = 2500$ Дж/(кг К); $C_v = 2030$ Дж/(кг К), при значениях $p = 4,3$ МПа давления и $T_{ср.} = +15$ °С температуры.

Ответ. 388 м/с.

237. С какой скоростью волна повышения давления уходит вверх по потоку газа ($\Delta = 0,59$, $p_{кр.} = 4,55$ МПа, $T_{кр.} = 205$ °С, $C_p = 2400$ Дж/(кг К), $C_v = 1913$ Дж/(кг К)) от сечения, в котором произошло мгновенное закрытие крана, если известно, что давление газа в этом сечении было 5,2 МПа, а температура $+30$ °С?

Ответ. 404 м/с.

238. Давление $p(x, t)$ в переходном процессе, происходящем на участке газопровода ($D = 1020 \times 12$ мм, $L = 120$ км, $k = 0,05$ мм), описывается уравнением (139) типа теплопроводности:

$$\frac{\partial p^2(x, t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 p^2(x, t)}{\partial x^2}.$$

В этом уравнении параметр a , играющий роль коэффициента температуропроводности, определяется согласно равенству (142): $a^2 = c^2 d / (\gamma \lambda \cdot v_{ср.})$. Определить значение параметра a , если известно, что из-за отключения одного из ГПА давление на КС уменьшается от 5,1 МПа до 4,5 МПа

при неизменном давлении 3,8 МПа в конце участка. Принять $\Delta = 0,59$; $Z_{\text{ср.}} = 0,9$; $T_{\text{ср.}} = 15^{\circ}\text{C}$; $R = 490$ Дж/(кг К).

Ответ. $a^2 = 1,64 \cdot 10^6$ м²/с.

239. Удельный массовый расход газа $q_{\text{к.}}(x, t) = \dot{M}/S$ в переходном процессе, происходящем на участке газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм, $S = \pi d^2/4$, $L = 150$ км), описывается уравнением (140) типа теплопроводности:

$$\frac{\partial q_{\text{к.}}^2(x, t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 q_{\text{к.}}^2(x, t)}{\partial x^2},$$

причем параметр a^2 , играющий в этом уравнении роль коэффициента температуропроводности, равен $1,64 \cdot 10^6$ м²/с (см. решение предыдущей задачи). Считая рассматриваемый участок газопровода *полубесконечным* ($0 \leq x < \infty$), определить, через какое время внезапное изменение $\Delta Q_{\text{к.0}} = 0,25 \cdot Q_{\text{к.}}$ коммерческого расхода газа, происшедшее в начале участка на 25% от его первоначального значения, достигнет сечения $x = L = 150$ км газопровода? Под *временем достижения* понимается момент времени, когда изменение $\Delta Q_{\text{к.}}(L, t)$ расхода газа в сечении $x = 150$ км составит 1% от величины $\Delta Q_{\text{к.0}}$. При этом предполагается, что новый расход газа, установившийся в начале участка, поддерживается постоянным.

Ответ. 1002 с ($\approx 16,7$ мин).

240. В начале участка газопровода (d – внутренний диаметр; L – протяженность) давление составляет $p_{\text{н.}}$, а в конце – $p_{\text{к.}}$. В некоторый момент ($t = 0$) времени давление в начале участка увеличивают до значения $p_{\text{н.}}^*$ и далее поддерживают его постоянным. Начавшийся в газопроводе переходный процесс заканчивается установлением нового стационарного режима. Определить время установления

этого режима, понимая под ним интервал времени от начала процесса до момента, когда массовый расход газа в начале участка будет отличаться от массового расхода в конце участка не более чем на 1% от его нового значения.

$$\text{Ответ. } \frac{\lambda v_{\text{ср.}} L^2}{\pi^2 d \cdot Z_{\text{ср.}} R T_{\text{ср.}}} \cdot \ln \left(100 \cdot \frac{p_{\text{н.}}^{*2} - p_{\text{н.}}^2}{p_{\text{н.}}^{*2} - p_{\text{к.}}^2} \right).$$

241. Используя условие предыдущей задачи № 240, найти время установления стационарного режима на участке газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм, $L = 100$ км, $k = 0,05$ мм) при повышении давления в начале участка с 4,5 до 5,5 МПа, если известно, что давление в конце этого участка остается неизменным и равным 3,5 МПа. Принять: $Z_{\text{ср.}} = 0,9$; $R = 500$ Дж/(кг К); $T_{\text{ср.}} = 20$ °С.

Ответ. ≈ 49 мин.

242. Коммерческий расход газа ($\Delta = 0,60$, $Z_{\text{ср.}} = 0,92$, $R = 500$ Дж/(кг К); $T_{\text{ср.}} = 10$ °С) на участке магистрального газопровода ($D = 820 \times 10$, $L = 125$ км, $k = 0,03$ мм) составляет 15 млн. м³/сутки. После того, как один из газоперекачивающих агрегатов на КС внезапно отключился, расход газа уменьшился до 10 млн. м³/сутки. Определить, через какое время после отключения агрегата расход газа в сечении, отстоящем от КС на расстояние 25 км, станет меньше 10,5 млн. м³/сутки, если известно, что первоначальное давление на КС составляло 5,5 МПа, а в конце участка оставалось неизменным.

Ответ. 555 с ($\approx 9,25$ мин).

243. На 30-м километре участка газопровода протяженностью 150 км образовался свищ (сквозное коррозионное отверстие) площадью 20 мм². Какой объем газа ($\Delta = 0,62$, $\gamma = C_p/C_v = 1,37$) будет потерян за сутки в результате утечки через свищ, если известно, что давление в

начале участка газопровода составляет 5,5 МПа, а в конце – 3,5 МПа? Температуру газа в сечении утечки принять равной 12 °С, а коэффициент сжимаемости $Z_c = 0,9$.

Ответ. 40,2 тыс. м³.

244. На 80-м километре газопровода с протяженностью 120 км возникло сквозное отверстие площадью 4 см². Какой объем газа ($R = 500$ Дж/(кг К), $\gamma = C_p/C_v = 1,31$) будет потерян за сутки, если известно, что давление в начале участка газопровода составляет 5,8 МПа, а в его конце – 3,5 МПа, а средняя температура газа +10 °С? Газ считать совершенным.

Ответ. 391,24 тыс. м³.

245. Для производства ремонтных работ участок газопровода изолировали от остальной части трубопровода, перекрыв его кранами, и начали выпускать газ ($\gamma = 1,31$, $R = 487$ Дж/(кг К)) в атмосферу через короткий патрубок (свечу) с внутренним диаметром 100 мм. Определить скорость истечения газа на срезе свечи в моменты времени, когда давление внутри газопровода сделалось сначала 1,2, а потом 0,12 МПа, если известно, что температура газа в сечении, где установлена свеча, составляет +10 °С. Газ считать совершенным.

Ответ. 398 и 214 м/с.

246. Участок газопровода (см. условие задачи № 243) изолировали от остальной части трубопровода и начали выпускать газ ($\gamma = 1,31$, $R = 487$ Дж/(кг К)) в атмосферу через короткую свечу с внутренним диаметром 100 мм. Определить массовые расходы истечения газа в моменты времени, когда давления газа в месте установки свечи были равны 1,2 и 0,12 МПа. Известно, что температура газа в сечении, где установлена свеча, составляет +10 °С. Газ считать совершенным.

Ответ. 17,15 кг/с (24,15 м³/с) и 1,29 кг/с (1,82 м³/с).

247. За какое время давление в отсеченном участке газопровода ($D = 1220 \times 24$ мм, $L = 3000$ м) снизится с 4,0 МПа до 2,0 МПа, если газ ($\Delta = 0,62$, $T_0 = 10$ °С, $\gamma = 1,34$) выпускать через свечу с внутренним диаметром 84 мм? Какова скорость истечения газа? Газ считать совершенным.

Ответ. 1727 с (≈ 29 мин), 387,4 м/с.

248. Задача об опорожнении участка газопровода. Участок газопровода ($D = 820 \times 10$ мм, $L = 5$ км) выведен из эксплуатации для ремонта. После того, как его изолировали от остальной части газопровода кранами, давление газа ($\Delta = 0,59$, $T_0 = 10$ °С, $\gamma = 1,31$) в нем составило 2,0 МПа. Через свечу с внутренним диаметром 150 мм газ начали выпускать в атмосферу. Сколько времени необходимо для того, чтобы давление газа в изолированном участке газопровода опустилось до атмосферного (0,1013 МПа)?

Ответ. ≈ 31 мин.

249. (Задача о продувке участка газопровода) Для вытеснения природного газа из 25-км участка газопровода ($D = 820 \times 10$ мм) в него через начальное сечение нагнетают воздух. Определить длину газовой смеси в момент ее подхода к концу участка, если под смесью понимать область, в которой концентрация газа изменяется от 0,01 до 99,99 %.

Ответ. 630 м.

250. (Задача о маркере) В потоке газа в газопроводе ($D = 1020 \times 10$ мм, $L = 750$ км) создается метка путем введения специальной газовой примеси (маркера), концентрация которой равна θ_0 . Какова должна быть протяженность газовой метки для того, чтобы в конце рассматриваемого газопровода концентрация маркера в середине метки уменьшилась не более чем на 0,01 %?

Ответ. 3813 м.

ЧАСТЬ 2. РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

2.1. Физические свойства нефти и нефтепродуктов

1. Коэффициент ξ теплового расширения данной нефти согласно таблице составляет 0,000831. Используя формулу (1), получаем

$$\rho_5 = 845 \cdot [1 + 0,000831 \cdot (20 - 5)] = 855,5 \text{ кг/м}^3.$$

2. Согласно (1.1) имеем уравнение:

$$875 = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - 5)].$$

Коэффициент ξ полагаем сначала соответствующим плотности нефти при $T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$: $\xi = 0,000782$. Тогда

$$\rho_{20} = 875 / [1 + 0,000782 \cdot 15] \cong 864,9 \text{ кг/м}^3.$$

Поскольку найденное значение ρ_{20} плотности принадлежит тому же интервалу, для которого принято значение коэффициента ξ , то полученный результат в дальнейшем уточнении не нуждается.

3. Согласно (1) имеем:

$$840 = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - 12)]; \quad \rho_{18} = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - 18)].$$

Отсюда получаем:

$$\frac{840}{\rho_{18}} = \frac{1 + 8\xi}{1 + 2\xi}; \quad \rho_{18} = 840 \cdot \frac{1 + 2\xi}{1 + 8\xi}.$$

Если положить $\xi = 0,000882$ таким же, как и для нефти с плотностью $820 - 839 \text{ кг/м}^3$, то для ρ_{18} получаем:

$$\rho_{18} = 840(1 + 2 \cdot 0,000882) / (1 + 8 \cdot 0,000882) = 835,6 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда $\rho_{20} = 840 / [1 + 0,000882 \cdot (20 - 12)] = 834,1 \text{ кг/м}^3$. Это значение находится в том же диапазоне плотностей, для которого справедливо выбранное значение $\xi = 0,000882$,

следовательно, полученный результат в дальнейшем уточнении не нуждается. Итак, $\rho_{18} = 835,6 \text{ кг/м}^3$.

4. Имеем следующие равенства:

$$\rho_1 = 825 \cdot [1 + 0,000882 \cdot (20 - T_1)], \quad \rho_2 = 825 \cdot [1 + 0,00082 \cdot (20 - T_2)].$$

Отсюда получаем:

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_{20}} = \frac{825 \cdot 0,000882 \cdot (T_2 - T_1)}{825} = 0,000882 \cdot 8 \cong 0,71 \cdot 10^{-2}.$$

Итак, плотность топлива увеличилась примерно на 0,71 %.

5. Запишем уравнение (1) для двух значений плотности нефти - утренней и дневной:

$$\rho_{\text{ут.}} = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - T_{\text{ут.}})], \quad \rho_{\text{дн.}} = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - T_{\text{дн.}})],$$

где $\rho_{\text{ут.}}$, $\rho_{\text{дн.}}$ и $T_{\text{ут.}}$, $T_{\text{дн.}}$ - утренние и дневные плотности нефти и температуры, соответственно. Из этих уравнений находим изменение $\Delta\rho$ плотности:

$$\Delta\rho = \rho_{\text{ут.}} - \rho_{\text{дн.}} = \rho_{20} \xi \cdot (T_{\text{дн.}} - T_{\text{ут.}}) = 850 \cdot 0,000831 \cdot 7 \cong 4,94 \text{ кг/м}^3.$$

Поскольку масса нефти в резервуаре не изменилась, то должны иметь место равенства:

$$\rho_{\text{ут.}} \cdot H_{\text{ут.}} \cdot S = \rho_{\text{дн.}} \cdot H_{\text{дн.}} \cdot S \Rightarrow \rho_{\text{ут.}} \cdot H_{\text{ут.}} = \rho_{\text{дн.}} \cdot H_{\text{дн.}},$$

где S - площадь дна и H - уровень нефти в резервуаре.

Далее можно записать:

$$\rho_{\text{ут.}} \cdot H_{\text{ут.}} = \rho_{\text{дн.}} (H_{\text{ут.}} + \Delta H),$$

где ΔH - изменение уровня нефти в резервуаре. Тогда

$$\Delta H = H_{\text{ут.}} (\rho_{\text{ут.}} - \rho_{\text{дн.}}) / \rho_{\text{ут.}} = H_{\text{ут.}} \Delta\rho / \rho_{\text{дн.}}.$$

Вообще говоря, дневная плотность $\rho_{\text{дн.}}$ нефти неизвестна, но она не сильно отклоняется от номинальной плотности ρ_{20} нефти при 20°C , то есть от 850 кг/м^3 , поэтому с достаточной степенью точности имеет место равенство

$$\Delta\rho / \rho_{\text{дн.}} = 4,94 / 850 \cong 5,812 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда находим:

$$\Delta H = 9 \cdot 5,812 \cdot 10^{-3} = 52,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Таким образом, уровень нефти повысится на 5,23 см.

6. Задача решается аналогично предыдущей. Имеем:

$$\Delta H = H_0(\rho_0 - \rho_1)/\rho_1 = -H_0 \Delta \rho / \rho_1,$$

где $H_0 = 6$ м - начальный уровень нефти в резервуаре; ρ_0, ρ_1 - плотности нефти: начальная и сутки спустя, соответственно; $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_0$.

$$\Delta \rho = 870 \cdot 0,000782 \cdot 10 \cong 6,8 \text{ кг/ м}^3.$$

Если принять $\rho_1 \cong \rho_{20} = 870 \text{ кг/ м}^3$, то $\Delta \rho / \rho_1 \cong 0,00782$, откуда находим: $\Delta H \cong -0,047$ м. Это означает, что уровень нефти в резервуаре понизится примерно на 4,7 см.

7. Сначала вычисляем объем бензина в резервуаре:

$$V_{B,15} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L + \frac{\pi d^2}{4} \cdot h = \frac{3,14 \cdot 5^2}{4} \cdot 50 + \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} \cdot (3-1) \cong 987,53 \text{ м}^3.$$

Затем из условия неизменности массы топлива при изменении температуры вычислим объем бензина при температуре 10°C :

$$\rho_{15} V_{B,15} = \rho_{10} V_{B,10} \Rightarrow V_{B,10} = V_{B,15} \cdot \rho_{15} / \rho_{10}.$$

Согласно (1), имеем:

$$\rho_{10} = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - 10)], \quad \rho_{15} = \rho_{20} \cdot [1 + \xi(20 - 15)],$$

откуда находим: $\rho_{15} / \rho_{10} = (1 + 5\xi) / (1 + 10\xi)$. Для нефтепродуктов с плотностью 730 кг/м^3 $\xi = 0,001183$, поэтому $\rho_{15} / \rho_{10} = (1 + 5 \cdot 0,001183) / (1 + 10 \cdot 0,001183) \cong 0,99415$. Отсюда следует, что $V_{B,10} = 987,53 \cdot 0,99415 \cong 981,75 \text{ м}^3$, т. е. объем бензина уменьшился на $5,78 \text{ м}^3$.

Площадь S сечения горловины цистерны составляет: $S = 3,14 \cdot 2^2 / 4 = 3,14 \text{ м}^2$, поэтому уровень бензина в горловине понизится на $5,78 / 3,14 \cong 1,84$ м и будет находиться на

2,84 м ниже ее верхнего края, т. е. почти вся горловина освободится от жидкости.

Замечание. При решении этой задачи пренебрегалось тепловой усадкой самой цистерны. Если принять, что температура цистерны также понизится на 5°C , то уменьшение ΔV ее объема составит, согласно (14), следующую величину: $\Delta V = \alpha_T(T - T_0) \cdot V_0 = 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 981,25 \cong 0,16 \text{ м}^3$. В пересчете на изменение уровня жидкости в горловине цистерны это дает $\approx +0,05$ м. Таким образом, уточненный результат показывает не 1,84, а 1,79 м.

8. Температура бензина в емкости после слива уменьшилась на 10°C , поэтому плотности ρ_{25} и ρ_{10} вычисляются по следующим формулам:

$$\rho_{25} = 730 \cdot [1 + 0,001183 \cdot (20 - 25)] \cong 725,68 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{10} = 730 \cdot [1 + 0,001183 \cdot (20 - 10)] \cong 738,64 \text{ кг/м}^3.$$

Поскольку масса топлива после слива, естественно, сохранилась, то имеет место равенство

$$\rho_{10} V_{10} = \rho_{25} V_{25} \Rightarrow V_{10} = V_{25} \cdot \rho_{25} / \rho_{10},$$

из которого находим:

$$V_{10} = 10 \cdot 725,68 / 738,64 \cong 9,825 \text{ м}^3,$$

т. е. объем бензина, зафиксированный в подземной емкости АЗС, будет примерно на 175 л меньше, чем в цистерне бензовоза.

9. Изменение ΔV объема трубопровода при повышении в нем давления на величину Δp находится с помощью формулы (13). Имеем:

$$\Delta V = \frac{\pi d_0^3 L}{4\delta \cdot E} \cdot \Delta p = \frac{3,14 \cdot 0,8^3 \cdot 100000}{4 \cdot 0,01 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \cdot 10 \cdot 98100 \cong 19,7 \text{ м}^3.$$

10. Изменение ΔV объема трубопровода при изменении температуры трубы на величину ΔT находится с помощью формулы (14). Имеем:

$$\Delta V = \alpha_T (T - T_0) \cdot V_0 = 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot (10) \cdot \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \cdot 10^5 \cong 16,6 \text{ м}^3.$$

11. Сначала вычислим объем V участка нефтепровода с поправкой на давление:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,514^2}{4} \cdot 120000 \cong 24887,3 \text{ м}^3,$$

$$\Delta V = \frac{\pi d_0^3 L}{4 \cdot \delta \cdot E} \cdot \Delta p = \frac{3,14 \cdot 0,514^3 \cdot 120000}{4 \cdot 0,008 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \cdot 19 \cdot 98100 \cong 14,9 \text{ м}^3,$$

$$V = V_0 + \Delta V = 24887,3 + 14,9 = 24902,2 \text{ м}^3.$$

Затем вычислим плотность дизельного топлива с поправками на давление и температуру:

$$\begin{aligned} \rho_{15} &= 840 \cdot \left[1 + 0,000831 \cdot (20 - 15) + (20 - 1) \cdot 98100 / 1,5 \cdot 10^9 \right] \cong \\ &\cong 840 \cdot (1 + 0,004155 + 0,001243) \cong 844,534 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Наконец, вычисляем массу M топлива:

$$M = \rho_{15} V = 844,534 \cdot 24902,2 = 21030754,6 \text{ кг}.$$

Таким образом, масса дизельного топлива в рассматриваемом участке трубопровода составляет $\approx 21030,8$ т.

12. Эта задача решается аналогично предыдущей. При снижении давления с 20 до 10 атм. объем V участка трубопровода уменьшится. Имеем:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,514^2}{4} \cdot 120000 \cong 24887,3 \text{ м}^3,$$

$$\Delta V = \frac{\pi d_0^3 L}{4 \cdot \delta \cdot E} \cdot \Delta p = \frac{3,14 \cdot 0,514^3 \cdot 120000}{4 \cdot 0,008 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \cdot 9 \cdot 98100 \cong 7,1 \text{ м}^3,$$

$$V = V_0 + \Delta V = 24887,3 + 7,1 = 24894,4 \text{ м}^3.$$

Плотность дизельного топлива с учетом поправок на давление и температуру также уменьшится:

$$\begin{aligned} \rho_{15} &= 840 \cdot \left[1 + 0,000831 \cdot (20 - 15) + (10 - 1) \cdot 98100 / 1,5 \cdot 10^9 \right] \cong \\ &\cong 840 \cdot (1 + 0,004155 + 0,000589) \cong 843,985 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Вычислим массу M дизельного топлива на участке трубопровода:

$$M = \rho_{15} V = 843,985 \cdot 24894,4 = 21010500,2 \text{ кг или } \approx 21010,5 \text{ т.}$$

Таким образом, для того чтобы снизить давление в трубопроводе с 20 до 10 атм., необходимо откачать из него (см. решение задачи 11) $21030,8 - 21010,5 = 20,3$ т. дизельного топлива.

13. Рассчитаем сначала массу бензина в трубопроводе на 01 апреля. Имеем:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,361^2}{4} \cdot 140000 \cong 14322,3 \text{ м}^3,$$

$$\Delta V_p = \frac{\pi d_0^3 L}{4 \cdot \delta \cdot E} \cdot \Delta p = \frac{3,14 \cdot 0,361^3 \cdot 140000}{4 \cdot 0,008 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \cdot \left(\frac{35+3}{2} - 1 \right) \cdot 98100 \cong 5,7 \text{ м}^3.$$

Здесь ΔV_p – дополнительное увеличение объема трубопровода из-за превышения среднего давления в трубе над атмосферным (поправка на давление).

$$V = V_0 + \Delta V_p = 14322,3 + 5,7 = 14328 \text{ м}^3.$$

Затем рассчитаем плотность бензина с поправками на давление и температуру:

$$\begin{aligned} \rho_7 &= 750 \cdot \left[1 + 0,001118 \cdot (20 - 7) + (19 - 1) \cdot 98100 / 1,0 \cdot 10^9 \right] \cong \\ &\cong 750 \cdot (1 + 0,014534 + 0,001766) \cong 762,225 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Наконец, вычисляем массу M бензина:

$$M = \rho_7 V = 762,225 \cdot 14328 = 10921159,8 \text{ кг.}$$

Таким образом, масса бензина в рассматриваемом участке трубопровода составляет $\approx 10921,160$ т.

Аналогично рассчитываем массу бензина на 01 мая.

$$\Delta V_p = \frac{\pi d_0^3 L}{4 \cdot \delta \cdot E} \cdot \Delta p = \frac{3,14 \cdot 0,361^3 \cdot 140000}{4 \cdot 0,008 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \cdot \left(\frac{45+5}{2} - 1 \right) \cdot 98100 \cong 7,6 \text{ м}^3,$$

$$\Delta V_T = 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot (15 - 7) \cdot 14322,3 \cong 3,8 \text{ м}^3, \quad V_0 \cong 14322,3 \text{ м}^3.$$

Здесь ΔV_T – дополнительное увеличение объема трубопровода из-за повышения его температуры на 8°C (поправка на температуру).

$$V = V_0 + \Delta V_p + \Delta V_T = 14322,3 + 7,6 + 3,8 = 14333,7 \text{ м}^3.$$

Затем рассчитаем плотность бензина с поправками на давление и температуру:

$$\begin{aligned} \rho_{15} &= 750 \cdot \left[1 + 0,001118 \cdot (20 - 15) + (25 - 1) \cdot 98100 / 1,0 \cdot 10^9 \right] \cong \\ &\cong 750 \cdot (1 + 0,00559 + 0,002354) \cong 755,958 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Вычисляем массу M бензина:

$$M = \rho_{15} V = 755,958 \cdot 14333,7 = 10835675,2 \text{ кг}.$$

Таким образом, масса бензина в рассматриваемом участке трубопровода равна $\approx 10835,675$ т. Изменение массы бензина составило $10835,675 - 10921,160 = -85,485$ т.

14. Если участок трубопровода полностью заполнен жидкостью, находящейся под давлением p_1 и имеющей температуру T_1 , то масса жидкости в нем рассчитывается следующим образом:

плотность жидкости определяется формулой (13):

$$\rho_1 = \rho_0 \left[1 + \xi \cdot (20 - T_1) - \frac{p_{\text{атм.}} - p_1}{K} \right];$$

объем участка трубопровода – формулой (15):

$$V_1 = V_0 \cdot \left[1 - \alpha_T (20 - T_1) - \frac{p_{\text{атм.}} - p_1}{\kappa} \right], \text{ где } \kappa = \delta \cdot E / d_0;$$

масса жидкости (с точностью до малых высшего порядка):

$$M_1 = \rho_1 V_1 = \rho_0 V_0 \cdot \left[1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_1) - (1/K + 1/\kappa)(p_{\text{атм.}} - p_1) \right].$$

При охлаждении жидкости от температуры T_1 до температуры T_2 его плотность ρ_2 определяется равенством:

$$\rho_2 = \rho_0 \left[1 + \xi \cdot (20 - T_2) - \frac{p_{\text{атм.}} - p_2}{K} \right],$$

а объем рассматриваемого участка - равенством:

$$V_2 = V_0 \cdot \left[1 - \alpha_T (20 - T_2) - \frac{p_{\text{атм.}} - p_2}{\kappa} \right].$$

В то же время масса жидкости, естественно, не изменяется.

Если предположить, что и после снижения температуры трубопровод остается полностью заполненным жидкостью, то масса жидкости в нем определится формулой:

$$M_2 = \rho_2 V_2 = \rho_0 V_0 \cdot [1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_2) - (1/K + 1/\kappa)(p_{\text{атм.}} - p_2)].$$

Поскольку $M_1 = M_2$, то имеет место равенство:

$$\begin{aligned} 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_1) - (1/K + 1/\kappa)(p_{\text{атм.}} - p_1) = \\ = 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_2) - (1/K + 1/\kappa)(p_{\text{атм.}} - p_2) \text{ или} \end{aligned}$$

$$p_2 - p_1 = \frac{\xi - \alpha_T}{1/K + 1/\kappa} \cdot (T_2 - T_1). \quad (*)$$

15. Решение этой задачи основывается на формуле

$$p_2 - p_1 = \frac{\xi - \alpha_T}{1/K + 1/\kappa} \cdot (T_2 - T_1),$$

полученной при решении предыдущей задачи № 14.

Подставив исходные данные из условия, получим:

$$p_2 - 2,5 \cdot 10^6 = \frac{(83 - 3,3) \cdot 10^{-5}}{1/(1,5 \cdot 10^9) + 514/(8 \cdot 2 \cdot 10^{11})} \cdot (7 - 10) \cong 0,06 \cdot 10^6.$$

Таким образом, падение температуры в остановленном трубопроводе всего на $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к падению давления почти на 25 атм. Если бы в рассматриваемом случае температура снизилась больше, чем на $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, то в трубопроводе могли бы возникнуть пустоты, заполненные парами дизельного топлива.

16. Обозначим через t время истечения из камеры порции нефти объемом V . Тогда $V = Q \cdot t$. Используя для расхода Q формулу (6), находим:

$$V = \frac{\pi \cdot d^4 \rho g}{128 \mu} \cdot t \Rightarrow \mu = \frac{3,14 \cdot 0,002^4 \cdot 9,81 \cdot 900 \cdot 500}{128 \cdot 0,0003} \cong 5,78 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м·с)},$$

что составляет 5,78 сПз.

17. Обозначим через t время истечения из камеры порции нефти объемом V . Тогда $V = Q \cdot t$. Используя для расхода Q формулу (6), находим:

$$V = \frac{\pi \cdot d^4 g}{128 \nu} \cdot t \Rightarrow \nu = \frac{3,14 \cdot 0,002^4 \cdot 9,81 \cdot 240}{128 \cdot 0,00005} \cong 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

что составляет примерно 18,5 сСт.

18. В формулу (7) Стокса $F = 3\pi \cdot \mu v d$ следует подставить разность веса дробинки и выталкивающей силы $F = (\rho - \rho_n) g \cdot \pi d^3 / 6$ Архимеда. Из получившейся формулы найдем:

$$\mu = \frac{g d^2 \cdot (\rho - \rho_n)}{18 \cdot v}.$$

Подставив сюда исходные данные, получим:

$$\mu = \frac{9,81 \cdot 0,0005^2 \cdot (7800 - 900)}{18 \cdot 0,005} \cong 0,188 \text{ кг/(м·с)}$$

или 188 сПз. Разделив μ на плотность нефти, получим кинематическую вязкость ν :

$$\nu = \mu / \rho = 0,188 / 900 \cong 209 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

или 209 сСт.

19. Из формулы (10) следует, что $Q_1/Q_2 = (r_1/r_2)^{3+1/n}$. Поскольку отношение расходов истечения обратно пропорционально временам истечения, получаем уравнение:

$$\frac{150}{3000} = \left(\frac{1}{2}\right)^{3+1/n} \Rightarrow 3+1/n = \log_{1/2}(1/20) \cong 4,322 \Rightarrow n \cong 0,756.$$

Используя результаты первого эксперимента, на основе формулы (10) получаем уравнение для определения k/ρ :

$$Q_1 = \frac{0,0002}{3000} = \frac{3,14 \cdot 0,001^3 \cdot 0,756}{3 \cdot 0,756 + 1} \cdot \left(\frac{0,001 \cdot 9,81}{2 \cdot k/\rho} \right)^{1/0,756}$$

Из этого уравнения находим: $k/\rho \cong 1,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^{1,244}$.

20. Запишем формулу (12) для расхода вязкопластичной жидкости через рассматриваемую трубку для двух данных в условии пар значений расхода и перепада давлений:

$$Q_1 = \frac{\pi r_0^4 \Delta p_1 / L}{8\mu} \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1 / L} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1 / L} \right)^4 \right],$$

$$Q_2 = \frac{\pi r_0^4 \Delta p_2 / L}{8\mu} \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_2 / L} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_2 / L} \right)^4 \right].$$

Разделив почленно эти равенства друг на друга, получим:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \cdot \frac{1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1 / L} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1 / L} \right)^4}{1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1 / L} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \right)^4 \cdot \left(\frac{2\tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1 / L} \right)^4}.$$

Обозначая $2\tau_0/(r_0 \cdot \Delta p_1/L) = x$, получаем:

$$\frac{1}{2} = \frac{150}{200} \cdot \frac{1 - \frac{4}{3} \cdot x + \frac{1}{3} \cdot x^4}{1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{150}{200} \cdot x + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{150}{200} \right)^4 \cdot x^4},$$

т. е. имеем уравнение для нахождения неизвестной величины x :

$$0,5 \cong 0,75 \cdot \frac{1 - 4/3 \cdot x + 1/3 \cdot x^4}{1 - x + 1,105 \cdot x^4} \Rightarrow x \cong 0,53.$$

Теперь нетрудно найти значение τ_0 предельного напряжения сдвига. Имеем:

$$\frac{2L \cdot \tau_0}{r_0 \cdot \Delta p_1} = 0,53 \Rightarrow \tau_0 = 0,53 \cdot \frac{0,0025 \cdot 150000}{2 \cdot 0,5} \cong 199 \text{ Па}.$$

2.2. Гидравлические режимы работы нефти- и нефтепродуктопроводов

21. Внутренний диаметр d нефтепровода равен 1000 мм ($d = D - 2\delta = 1020 - 2 \cdot 10 = 1000$ мм), поэтому годовую пропускную способность G нефтепровода можно найти по формуле: $G = 8400 \cdot 3600 \cdot Q_M = 8400 \cdot 3600 \cdot \rho v \cdot S$ или

$$G = 8400 \cdot 3600 \cdot 900 \cdot 1,0 \cdot 3,14 \cdot 1,0^2 / 4 \cong 21,365 \cdot 10^9 \text{ кг/год,}$$

что составляет 21,365 млн. т/год. Здесь 8400 - годовое число часов работы нефтепровода (350 дней).

22. Из уравнения (17) сохранения массы следует, что $v_1 S_1 = v_2 S_2$ или $v_1 d_1^2 = v_2 d_2^2$. Отсюда находим:

$$v_2 = v_1 \cdot (d_1/d_2)^2 = 1,2 \cdot [(530 - 2 \cdot 8)/(377 - 2 \cdot 6)]^2 \cong 2,38 \text{ м/с.}$$

23. Находим внутренний диаметр d трубопровода:

$$d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м.}$$

Кинематическая вязкость ν равна μ/ρ :

$$\nu = 0,015/890 \cong 16,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \text{ или } 16,9 \text{ сСт.}$$

Далее вычисляем скорость v перекачки

$$v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 800 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 1,07 \text{ м/с.}$$

и число Рейнольдса Re :

$$Re = vd/\nu = 1,07 \cdot 0,514 / (16,9 \cdot 10^{-6}) \cong 32543.$$

Отсюда видно, что течение нефти происходит в режиме *гидравлически гладких труб* и, следовательно, λ вычисляется по формуле (25) Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{32543}} \cong 0,0236.$$

24. Внутренний диаметр d нефтепродуктопровода:

$$d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м.}$$

Кинематическая вязкость ν бензина равна μ/ρ :

$$v = 0,5 \cdot 10^{-3} / 750 \cong 0,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \text{ или } 0,67 \text{ сСт.}$$

Вычисляем скорость v перекачки

$$v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 1100 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 1,47 \text{ м/с}$$

и число Re Рейнольдса:

$$Re = vd/v = 1,47 \cdot 0,514 / (0,67 \cdot 10^{-6}) \cong 1127731.$$

Отсюда видно, что течение бензина происходит в режиме *квадратичного трения* и, следовательно, λ вычисляется по формуле (27) Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,22/514)^{0,25} \cong 0,016.$$

25. Внутренний диаметр d нефтепродуктопровода:

$$d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м.}$$

Кинематическая вязкость ν дизельного топлива равна μ/ρ . Следовательно, $\nu = 4 \cdot 10^{-3} / 840 \cong 4,76 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ или 4,76 сСт.

Скорость v перекачки составляет:

$$v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 700 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 0,94 \text{ м/с,}$$

а число Re Рейнольдса:

$$Re = vd/\nu = 0,94 \cdot 0,514 / (4,76 \cdot 10^{-6}) \cong 101504.$$

Отсюда видно, что течение дизельного топлива происходит в режиме *смешанного трения* и, следовательно, λ вычисляется по формуле (24) Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,22/514 + 68/101504)^{0,25} \cong 0,020.$$

26. Находим сначала скорость v течения дизельного топлива:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 250}{3600 \cdot 3,14 \cdot (0,377 - 2 \cdot 0,008)^2} \cong 0,679 \text{ м/с.}$$

Затем вычисляем число Re Рейнольдса:

$$Re = 0,679 \cdot 0,361 / (5 \cdot 10^{-6}) \cong 49024$$

и далее - коэффициент λ гидравлического сопротивления:

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{49024} \cong 0,021.$$

После этого находим гидравлический уклон i , см. (21):

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,021 \cdot \frac{1}{0,361} \cdot \frac{0,679^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00137.$$

Это означает, что уменьшение напора составляет 1,37 м на каждый км протяженности трубопровода.

27. Вычисляем напоры H_0 и H_k в начале и в конце участка трубопровода. Имеем:

$$H_0 = z_0 + \frac{p_0}{\rho g} = 100 + \frac{5 \cdot 10^6}{850 \cdot 9,81} \cong 699,6 \text{ м.},$$

$$H_k = z_k + \frac{p_k}{\rho g} = 150 + \frac{0,5 \cdot 10^6}{850 \cdot 9,81} \cong 210,0 \text{ м.}$$

После этого можно найти гидравлический уклон i на участке нефтепровода: $i = (699,6 - 210,0) / 120000 \cong 0,00408$ или 4,08 м/км.

На 20 км падение напора составляет $4,08 \cdot 20 = 81,6$ м, поэтому напоры в остальных сечениях трубопровода составляют:

$$H(20) = 699,6 - 81,6 = 618,0 \text{ м};$$

$$H(40) = 618,0 - 81,6 = 536,4 \text{ м};$$

$$H(60) = 536,4 - 81,6 = 454,8 \text{ м};$$

$$H(80) = 454,8 - 81,6 = 373,2 \text{ м};$$

$$H(100) = 373,2 - 81,6 = 291,6 \text{ м.}$$

Поскольку линия гидравлического уклона проходит всюду значительно выше профиля трубопровода, то давление во всех его сечениях выше упругости насыщенных паров транспортируемой жидкости и парогазовые полости в трубопроводе отсутствуют.

Рассчитываем давления в заданных сечениях:

$$p(20) = \rho g \cdot [H(20) - z(20)] = 850 \cdot 9,81 \cdot (618,6 - 150) \cong 3,907 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(40) = \rho g \cdot [H(40) - z(40)] = 850 \cdot 9,81 \cdot (536,4 - 200) \cong 2,805 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(60) = \rho g \cdot [H(60) - z(60)] = 850 \cdot 9,81 \cdot (454,8 - 100) \cong 2,958 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(80) = \rho g \cdot [H(80) - z(80)] = 850 \cdot 9,81 \cdot (373,2 - 50) \cong 2,695 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(100) = \rho g \cdot [H(100) - z(100)] = 850 \cdot 9,81 \cdot (291,6 - 50) \cong 2,015 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

28. Вычисляем напоры $H(20)$ и $H(60)$ в сечениях 20 и 60 км:

$$H(20) = z_{20} + \frac{p_{20}}{\rho g} = 120 + \frac{3,8 \cdot 10^6}{735 \cdot 9,81} \cong 647,0 \text{ м},$$

$$H(60) = z_{60} + \frac{p_{60}}{\rho g} = 160 + \frac{2,6 \cdot 10^6}{735 \cdot 9,81} \cong 520,6 \text{ м}.$$

Тогда гидравлический уклон i на участке нефтепровода равен: $i = (647,0 - 520,6) / 40000 \cong 0,00316$ или 3,16 м/км.

На 20 км падение напора составляет $3,16 \cdot 20 = 63,2$ м, поэтому напоры в остальных сечениях трубопровода составляют:

$$H(0) = 647,0 + 63,2 = 710,2 \text{ м};$$

$$H(40) = 647,0 - 63,2 = 583,8 \text{ м};$$

$$H(80) = 520,6 - 63,2 = 457,4 \text{ м};$$

$$H(100) = 457,4 - 63,2 = 394,2 \text{ м}.$$

Поскольку линия гидравлического уклона проходит всюду значительно выше профиля трубопровода, то давление во всех его сечениях выше упругости насыщенных паров бензина ($p_y \cong 0,07$ МПа) и парогазовые полости в трубопроводе отсутствуют.

Рассчитываем давления в заданных сечениях:

$$p(0) = \rho g \cdot [H(0) - z_0] = 735 \cdot 9,81 \cdot (710,2 - 75) \cong 4,58 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(40) = \rho g \cdot [H(40) - z_{40}] = 735 \cdot 9,81 \cdot (583,8 - 180) \cong 2,91 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(80) = \rho g \cdot [H(80) - z_{80}] = 735 \cdot 9,81 \cdot (457,4 - 130) \cong 2,36 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$p(100) = \rho g \cdot [H(100) - z_{100}] = 735 \cdot 9,81 \cdot (394,2 - 30) \cong 2,63 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

29. Решение задачи, см. (22), понятно из таблицы:

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	100	150	200	250	300
$v, \text{ м/с}$	0,37	0,56	0,74	0,93	1,11
Re	5717	8652	11433	14369	17150
λ	0,03	0,033	0,031	0,029	0,028
$h_{\tau}, \text{ м}$	122	407	504	745	1024
$h_{\tau} + \Delta z, \text{ м}$	22	307	404	645	924

30. Решение задачи, см. (22), понятно из таблицы:

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	800	900	1000	1100	1200
$v, \text{ м/с}$	1,063	1,196	1,329	1,462	1,595
Re	60945	68571	76196	83821	91447
λ	0,0217	0,0212	0,0208	0,0205	0,0202
$h_{\tau}, \text{ м}$	302,8	374,4	454	541	635
$h_{\tau} + \Delta z, \text{ м}$	408	479	559	646	740

31. Сначала определяем скорость бензина во втором участке:

$$v_1 \cdot \pi d_1^2 / 4 = v_2 \cdot \pi d_2^2 / 4 \Rightarrow v_2 = 1,2 \cdot (514/365)^2 \cong 2,38 \text{ м/с}.$$

Эти скорости соответствуют числам Рейнольдса:

$$Re_1 = 1,2 \cdot 0,514 / (0,6 \cdot 10^{-6}) = 1028000 \text{ и}$$

$$Re_2 = 2,38 \cdot 0,361 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 1431967.$$

Далее по формуле (27) Шифринсона рассчитываем коэффициенты гидравлического сопротивления:

$$\lambda_1 = 0,11 \cdot (0,15/514)^{0,25} \cong 0,0144;$$

$$\lambda_2 = 0,11 \cdot (0,15/361)^{0,25} \cong 0,0157.$$

И, наконец, вычисляем потери напора на трение:

$$(h_{\tau})_1 = 0,0144 \cdot 60000 / 0,514 \cdot 1,2^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 123,4 \text{ м},$$

$$(h_{\tau})_2 = 0,0157 \cdot 30000 / 0,361 \cdot 2,38^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 376,7 \text{ м.}$$

Общие потери напора в трубопроводе определяются суммой $123,4 + 376,7 \cong 501 \text{ м.}$

32. Сначала определяем скорость v течения нефти:

$$v = 4Q / \pi d^2 = 4 \cdot 2500 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,804^2) \cong 1,369 \text{ м/с.}$$

Затем вычисляем число Re Рейнольдса:

$$Re = vd / \nu = 1,369 \cdot 0,804 / (7 \cdot 10^{-6}) \cong 157239,$$

коэффициент λ гидравлического сопротивления:

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/804 + 68/157239)^{0,25} \cong 0,0178$$

и потери напора h_{τ} на трение:

$$h_{\tau} = 0,0178 \cdot 140000 / 0,804 \cdot 1,369^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 296,1 \text{ м.}$$

Из уравнения (16) Бернулли находим:

$$\frac{(p_H - 3) \cdot 98100}{850 \cdot 9,81} + (120 - 160) = 296,1 \Rightarrow p \cong 31,6 \text{ атм.}$$

Таким образом, давление в начале участка составляет 31,6 атм. ($\approx 3,1 \text{ МПа}$).

33. Уравнение Бернулли в данном случае имеет вид:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = h_{1-2} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Отсюда получаем уравнение для скорости v течения:

$$\frac{15 \cdot 98100}{890 \cdot 9,81} = \lambda \cdot \frac{140000}{0,8} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81} \Rightarrow \lambda \cdot v^2 \cong 0,0189.$$

Решаем полученное уравнение методом итераций (последовательных приближений).

Первое приближение: полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$, тогда $v^{(1)} = \sqrt{0,0189/0,02}$, или $\cong 0,972 \text{ м/с}$. Число Рейнольдса: $Re = 0,972 \cdot 0,8 / (10 \cdot 10^{-6}) = 77760$. Используя формулу Блазиуса (1.23), имеем: $\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{77760} \cong 0,0189 < \lambda^{(1)}$.

Второе приближение: полагаем $\lambda^{(2)} = 0,0189$, тогда $v^{(2)} = \sqrt{0,0189/0,0189}$, или 1,0 м/с. Число Рейнольдса $Re: Re = 1,0 \cdot 0,8 / (10 \cdot 10^{-6}) = 80000$. Используя формулу (1.25), имеем: $\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{80000} \cong 0,0188 \approx \lambda^{(2)}$. Таким образом, в результате второго приближения достигнуто хорошее совпадение взятого и полученного λ , поэтому третьей итерации не требуется.

Далее имеем: $Q = v \cdot \pi d^2 / 4 = 1,0 \cdot 3,14 \cdot 0,8^2 / 4 \cong 0,5024 \text{ м}^3/\text{с}$ или 1809 м³/ч.

34. Уравнение Бернулли в данном случае имеет вид:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} + z_n - z_k = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Отсюда получаем уравнение для скорости v течения:

$$\frac{(55-3) \cdot 98100}{740 \cdot 9,81} + (50-100) = \lambda \cdot \frac{120000}{0,516} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81} \Rightarrow \lambda \cdot v^2 \cong 0,0589.$$

Полученное уравнение решаем методом итераций.

Первое приближение: полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$; тогда $v^{(1)} = \sqrt{0,0589/0,02}$, или $\cong 1,716$ м/с. Вычисляем число Рейнольдса: $Re = 1,716 \cdot 0,516 / (0,6 \cdot 10^{-6}) = 1475760$. Используя формулу Шифринсона (1.27), имеем:

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/516)^{0,25} \cong 0,0154 < \lambda^{(1)} = 0,02.$$

Второе приближение: полагаем $\lambda^{(2)} = 0,0154$; тогда $v^{(2)} = \sqrt{0,0589/0,0154}$, или $v^{(2)} = 1,96$ м/с. Вычисляем число Рейнольдса: $Re = 1,96 \cdot 0,516 / (0,6 \cdot 10^{-6}) = 1685600$. Это означает, что режим течения и в этой итерации будет квадратичным, значит, коэффициент λ вычислен правильно: $\lambda = 0,0154$. Далее находим:

$$Q = 1,96 \cdot 3600 \cdot 3,14 \cdot 0,516^2 / 4 \cong 1475 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

35. Запишем уравнение Бернулли в следующем виде:

$$(\rho_n - \rho_k) + \rho_B g(z_n - z_k) = \lambda_B \cdot L/d \cdot \rho_B v_B^2 / 2,$$

$$(\rho_n - \rho_k) + \rho_D g(z_n - z_k) = \lambda_D \cdot L/d \cdot \rho_D v_D^2 / 2.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получаем:

$$(\rho_B - \rho_D)g(z_n - z_k) = L/2d \cdot (\rho_B \lambda_B v_B^2 - \rho_D \lambda_D v_D^2)$$

Подставляя исходные данные, имеем:

$$100 \cdot 9,81 \cdot 100 = 125000 / (2 \cdot 0,514) (740 \lambda_B v_B^2 - 840 \lambda_D v_D^2),$$

откуда находим: $740 \lambda_B v_B^2 - 840 \lambda_D v_D^2 \cong 0,8068$.

Последовательно вычисляя

$$v_B = 4Q / \pi d^2 = 4 \cdot 8 \cdot 10^9 / (8400 \cdot 3600 \cdot 740 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 1,724 \text{ м/с},$$

$$Re_B = 1,724 \cdot 0,514 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 1476893,$$

$$\lambda_B = 0,11 \cdot (0,15/514)^{0,25} \cong 0,0144 \text{ и } \lambda_B v_B^2 \cong 0,0428,$$

получаем: $\lambda_D v_D^2 \cong 0,0367$.

Это уравнение решаем методом итераций. В качестве нулевого приближения полагаем $\lambda_{D0} = 0,02$, тогда имеем:

$$v_{D0} \cong 1,355 \text{ м/с} \Rightarrow Re_{D0} = 1,355 \cdot 0,514 / (6 \cdot 10^{-6}) \cong 116078.$$

$$\lambda_{D1} = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/116078)^{0,25} \cong 0,0189.$$

В следующем приближении полагаем $\lambda_{D1} = 0,0189$:

$$v_{D1} \cong 1,393 \text{ м/с} \Rightarrow Re_{D1} = 1,393 \cdot 0,514 / (6 \cdot 10^{-6}) \cong 119334,$$

$$\lambda_{D2} = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/119334)^{0,25} \cong 0,0188,$$

что практически не отличается от принятого значения λ_{D1} .

Находим:

$$G_D = 840 \cdot 8400 \cdot 3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2 / 4 \cdot 1,393 \cong 7,3385 \cdot 10^9 \text{ кг/год},$$

что составляет $\approx 7,34$ млн.т/год.

2.3. Трубопроводы с самотечными участками; вставки, лупинги, отводы

36. Изобразив профиль трубопровода на чертеже, заметим, что самотечный участок прежде всего может возникнуть в сечении $x = 40$ км. При этом гидравлический уклон i находится так:

$$i = \frac{H(40) - H(120)}{(120 - 40) \cdot 10^3} = \frac{(200 + 0,01 \cdot 10^6 / 840 \cdot 9,81) - 0,3 \cdot 10^6 / 840 \cdot 9,81}{80000},$$

откуда находим: $i \cong 2,06 \cdot 10^{-3}$ или 2,06 м/км.

Уравнение

$$0,00206 = \lambda \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81} \text{ или } \lambda \cdot v^2 \cong 0,0208$$

решаем методом итераций (последовательных приближений).

В качестве *первого приближения* берем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда находим $v^{(1)} \cong 1,02$ м/с. Вычисляем число Рейнольдса:

$$Re^{(1)} = 1,02 \cdot 0,514 / (5 \cdot 10^{-6}) = 104856 \text{ и далее } \lambda:$$

$$\lambda^{(2)} = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/104856)^{0,25} \cong 0,0193.$$

В качестве *второго приближения* берем найденное значение $\lambda^{(2)} = 0,0193$. Имеем: $v^{(2)} \cong 1,038$ м/с. Вычисляем число Рейнольдса: $Re^{(2)} = 1,038 \cdot 0,514 / (5 \cdot 10^{-6}) \cong 106706$ и далее новое значение коэффициента гидравлического сопротивления: $\lambda^{(3)} = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/106706)^{0,25} \cong 0,0192$.

Поскольку $\lambda^{(3)} \cong \lambda^{(2)}$, то итерационный процесс закончен.

Итак, $v \cong 1,038$ м/с, что соответствует $Q \cong 775$ м³/ч.

37. Решение предыдущей задачи показало, что минимальный расход дизельного топлива, необходимый для перекачки без самотечных участков составляет 775 м³/ч. От-

сюда следует, что при меньшем расходе $650 \text{ м}^3/\text{ч}$ такой самотечный участок имеется, причем перевальная точка, очевидно, расположена в сечении $x = 40 \text{ км}$. Найдем координату конца самотечного участка.

Параметры перекачки топлива таковы:

$$v = 4 \cdot 600 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 0,804 \text{ м/с},$$

$$Re = 0,804 \cdot 0,514 / (5 \cdot 10^{-6}) \cong 82651,$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/82651)^{0,25} \cong 0,0201,$$

$$i = 0,0201 \cdot 1 / 0,514 \cdot 0,804^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 1,288 \cdot 10^{-3}$$

или $1,288 \text{ м/км}$.

Давление в конце участка трубопровода равно $0,3 \text{ МПа}$, что составляет $0,3 \cdot 10^6 / (840 \cdot 9,81) \cong 36,41 \text{ м}$ столба дизельного топлива, поэтому напор в сечении $x = 60 \text{ км}$ равен:

$$0 + 36,41 + (120 - 60) \cdot 1,288 \cong 113,69 \text{ м}.$$

Расчет координаты конца самотечного участка, находящегося между сечениями 40 и 60 км , понятен из рис. 2.1.

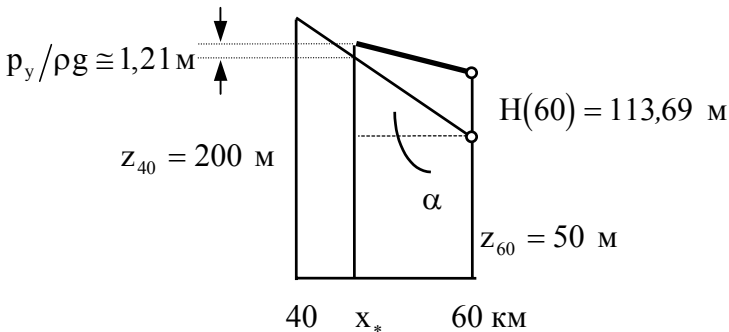


Рис. 2.1. К решению задачи № 37.

Обозначим координату конца самотечного участка через x_* . Поскольку тангенс угла α наклона профиля трубо-

провода на сегменте (40-60) км известен и равен: $(200 - 50)/20000 = 7,5 \cdot 10^{-3}$, то можно составить уравнение: $50 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot (60000 - x_*) + 1,21 = 113,69 + 1,288 \cdot 10^{-3} (60000 - x_*)$, из которого находим $x_* \cong 49942$ м или $\approx 49,942$ км. Таким образом, в рассматриваемом трубопроводе существует один самотечный участок, начало которого находится в сечении 40 км, а конец, в сечении 49,942 км.

38. Вычисляем параметры перекачки:

$$v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 500 / (3,14 \cdot 0,516^2 \cdot 3600) \cong 0,665 \text{ м/с,}$$

$$Re = vd/\nu = 0,665 \cdot 0,516 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 22876 ,$$

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{22876} \cong 0,0257 ;$$

$$i = 0,0257 \cdot 1 / 0,516 \cdot 0,665^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 1,123 \cdot 10^{-3} \text{ или } 1,123 \text{ м/км.}$$

$$p_y / \rho g = 0,03 \cdot 10^6 / (850 \cdot 9,81) \cong 3,60 \text{ м.}$$

Вычисляем напор $H(150)$ в конце трубопровода:

$$H(150) = z_{150} + p_k / \rho g = 50 + 0,3 \cdot 10^6 / (850 \cdot 9,81) \cong 85,98 \text{ м.}$$

Затем последовательно определяем напоры в заданных сечениях трубопровода, начиная с конечного. Имеем:

$$H(125) = H(150) + 25 \cdot i = 85,98 + 1,123 \cdot 25 \cong 114,06 > 0 + 3,6 \text{ м.}$$

$$H(100) = H(125) + 25 \cdot i = 114,06 + 1,123 \cdot 25 \cong 142,14 > 50 + 3,6 \text{ м.}$$

$$H(75) = H(100) + 25 \cdot i = 142,14 + 1,123 \cdot 25 \cong 170,22 < 200 \text{ м.}$$

Поскольку полный напор в сечении не может быть меньше высотной отметки этого сечения, то между 75 и 100 км должен быть самотечный участок, причем сечение $x = 75$ км является перевальной точкой.

Для того чтобы найти конец самотечного участка, обратимся к рис. 2.2.

Обозначим координату конца самотечного участка через x_* . Поскольку тангенс угла α наклона профиля трубо-

провода на сегменте (75-100) км известен: $(200-50)/25000=6 \cdot 10^{-3}$, то можно составить уравнение: $50 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot (100000 - x_*) + 3,6 = 142,14 + 1,123 \cdot 10^{-3} (100000 - x_*)$, из которого находим $x_* \cong 81845$ м или $\approx 81,845$ км. Таким образом, в рассматриваемом трубопроводе существует самотечный участок начало которого находится в сечении 75 км, а конец, в сечении 81,845 км.

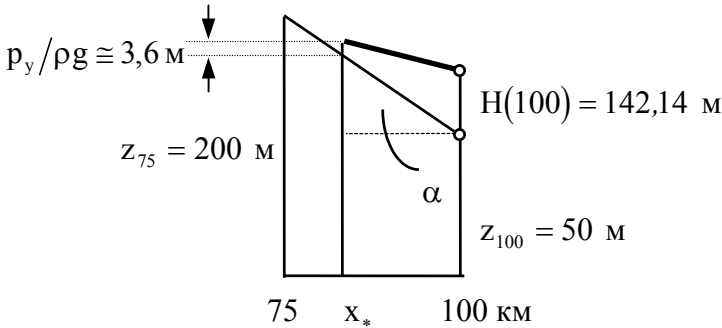


Рис. 2.2. К решению задачи № 38.

Далее проверяем оставшиеся сечения:

$$H(50) = H(75) + 25 \cdot i = 200 + 3,6 + 1,123 \cdot 25 \cong 231,68 > 150 + 3,6 \text{ м,}$$

$$H(25) = H(50) + 25 \cdot i = 231,68 + 1,123 \cdot 25 \cong 259,76 > 100 + 3,6 \text{ м,}$$

$$H(0) = H(25) + 25 \cdot i = 259,76 + 1,123 \cdot 25 \cong 287,84 > 100 + 3,6 \text{ м.}$$

Следовательно, других самотечных участков в трубопроводе нет. Теперь рассчитаем давление p_n в начале участка трубопровода:

$$p_n = \rho g \cdot [H(0) - z_0] = 850 \cdot 9,81 \cdot 187,84 \cong 1,57 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

39. Сначала определяем гидравлический уклон i участка трубопровода. Имеем:

$$d = 0,513 \text{ мм, } v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 500 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,513^2) \cong 0,672 \text{ м/с,}$$

$$Re = 0,672 \cdot 0,513 / (3 \cdot 10^{-6}) = 114912, \quad \varepsilon = 0,2 / 513 \cong 0,39 \cdot 10^{-3},$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,39 \cdot 10^{-3} + 68/114912)^{0,25} \cong 0,0195,$$

$$i = 0,0195 \cdot 1/0,513 \cdot 0,672^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 0,875 \cdot 10^{-3}$$

или 0,875 м/км.

Можно заметить, что потери напора на участке между концом трубопровода ($x = 120$ км) и сечением $x = 80$ км составляют: $H(80) - H(120) = i \cdot 40 = 0,875 \cdot 40 = 35$ м. Если учесть, что напор $H(120)$ в конце трубопровода равен примерно 52,8 м ($40 + 1,0 \cdot 98100 / (780 \cdot 9,81) \cong 52,82$), то напор $H(80)$ составлял бы $52,8 + 35 = 87,8$ м. Однако одна только высотная отметка сечения $x = 80$ км, согласно условию, составляет 200 м, поэтому на сегменте $[80;120]$ км имеется самотечный участок, а сечение $x = 80$ км является перевальной точкой. При этом следует заметить, что разность высот начала самотечного участка ($z_{80} = 200$ м) и его конца больше, чем $200 - 87,8 = 112,2$ м. Таким образом, очевидно, что увеличение давления в конце участка на 5 атм., что составляет $5 \cdot 98100 / (780 \cdot 9,81) \cong 64,1$ м, не способно ликвидировать самотечный участок полностью, а лишь сокращает его длину. Поэтому расход перекачки от увеличения давления в конце участка на 5 атм. не изменится.

40. Гидравлический уклон i на полностью заполненных сегментах участка трубопровода, данного в условии предыдущей задачи № 39, составляет 0,875 м/км. Найдём напор $H(80)$ в сечении $x = 80$ км:

$$H(80) = z_{80} + p_y / \rho g = 200 + 20000 / (780 \cdot 9,81) \cong 202,61 \text{ м.}$$

Теперь можно рассчитать напор $H(0)$ и давление p_n в начале участка:

$$H(0) = H(80) + 0,875 \cdot 80 = 202,61 + 70 \cong 272,6 \text{ м,}$$

$$p_n = \rho g \cdot [H(0) - z_n] = 780 \cdot 9,81 \cdot (272,6 - 50) = 1,703 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Для того чтобы самотечного участка в трубопроводе не стало, нужно, чтобы гидравлический уклон составил:

$$i_{\otimes} = \frac{H(80) - H(120)}{40000} = \frac{202,61 - 52,82}{40000} \cong 3,745 \cdot 10^{-3}$$

или 3,745 м/км. Это означает, что напор $H(0)$ и давление p_n в начале участка должны быть равны:

$$H(0) = H(120) + i_{\otimes} \cdot L = 52,82 + 3,745 \cdot 120 \cong 502,2 \text{ м,}$$

$$p_n = \rho g \cdot [H(0) - z_n] = 780 \cdot 9,81 \cdot (502,2 - 50) \cong 3,460 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

то есть давление p_n должно быть увеличено примерно на $3,460 - 1,703 = 1,757$ МПа (или $\approx 17,9$ атм.).

41. Вычислим сначала напоры H_1 и H_2 в начале и конце участка, соответственно:

$$H_1 = z_1 + p_1 / \rho g = 75 + 3,2 \cdot 10^6 / (735 \cdot 9,81) \cong 518,8 \text{ м,}$$

$$H_2 = z_2 + p_2 / \rho g = 50 + 0,3 \cdot 10^6 / (735 \cdot 9,81) \cong 91,6 \text{ м.}$$

Если бы самотечные участки в трубопроводе отсутствовали, то гидравлический уклон i составил бы

$$i = \frac{518,8 - 91,6}{100} = 4,272 \text{ м/км.}$$

Это означает, что на первых 20 км трубопровода терялось бы $4,272 \cdot 20 = 85,44$ м напора; на 40 км. - 170,88 м; на 60 км - 256,32 м, поэтому напоры в соответствующих сечениях были бы равны:

$$H(20) = 518,8 - 85,44 = 433,36 > 180 \text{ м;}$$

$$H(40) = 518,8 - 170,88 = 347,92 > 250 \text{ м;}$$

$$H(60) = 518,8 - 256,32 = 262,48 < 350 \text{ м.}$$

Отсюда видно, что если в первых двух сечениях линия гидравлического уклона проходит значительно выше профиля трубопровода (во всяком случае, больше, чем на величину $p_y / \rho g = 7000 / (735 \cdot 9,81) \cong 9,7$ м), то в третьем сечении она проходит уже ниже профиля трубопровода. Следо-

вательно, линия гидравлического уклона построена не правильно; в трубопроводе имеется самотечный участок и его начало (перевальная точка) находится в сечении $x_1 = 60$ км.

Находим напор $H(60)$ в сечении $x_1 = 60$ км:

$$H(60) = z_{60} + p_y / \rho g = 350 + 9,7 = 359,7 \text{ м.}$$

Вычисляем гидравлический уклон:

$$i = (518,8 - 359,7) / 60000 \cong 2,652 \cdot 10^{-3} \text{ или } 2,652 \text{ м/км.}$$

Теперь можно вычислить напоры и давления в сечениях 20 и 40 км: $H(20) = 518,8 - 20 \cdot 2,652 \cong 465,76$ м;

$$p(20) = 735 \cdot 9,81 \cdot (465,76 - 180) \cong 2,060 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

$$H(40) = 518,8 - 40 \cdot 2,652 \cong 412,72 \text{ м;}$$

$$p(40) = 735 \cdot 9,81 \cdot (412,72 - 250) \cong 1,173 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Поскольку гидравлический уклон на всех заполненных сечениях трубопровода одинаков, то далее линию гидравлического уклона строим с конца трубопровода, то есть с сечения, в котором напор известен. Если бы на участке трубопровода между сечениями $x = 80$ и $x = 100$ км самотечных участков не было, то $H(80) = 91,6 + 20 \cdot 2,652 = 144,64$ м. Однако эта величина существенно меньше $z_{80} = 230$ м, поэтому на участке (80-100 км) также есть самотечный участок. Поскольку $z_{80} = 230 < z_{60} = 350$ м, то речь идет о продолжении самотечного участка, начавшегося в сечении $x = 60$ км.

Найдем конец самотечного участка. Обозначим координату конца самотечного участка через x_* , рис. 2.3. Поскольку тангенс угла α наклона профиля трубопровода на сегменте (80-100) км известен: $(230 - 50) / 20000 = 9 \cdot 10^{-3}$, то можно составить уравнение:

$$50 + 9 \cdot 10^{-3} \cdot (100000 - x_*) + 9,7 = 91,6 + 2,652 \cdot 10^{-3} \cdot (100000 - x_*),$$

из которого находим $x_* \cong 94974,8$ м или $\approx 94,975$ км. Та-

ким образом, в рассматриваемом трубопроводе существует один самотечный участок, начало которого находится в сечении 60 км, а конец - в сечении 94,975 км.

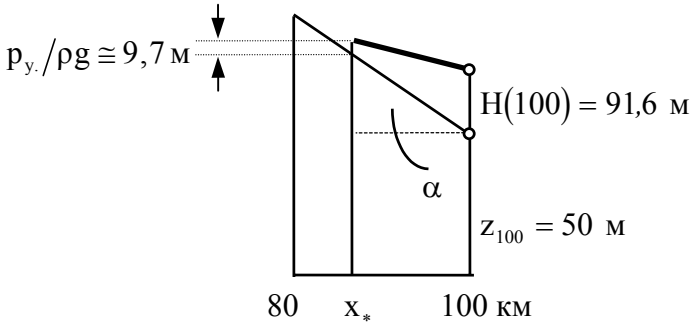


Рис. 2.3. К решению задачи № 41.

42. Рассчитаем параметры перекачки на участке трубопровода, в котором нефть течет полным сечением:

$$v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 2000 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,7^2) \cong 1,444 \text{ м/с},$$

$$Re = 1,444 \cdot 0,7 / (25 \cdot 10^{-6}) \cong 40432,$$

$$\lambda_0 = 0,3164 / \sqrt[4]{40432} \cong 0,0223,$$

$$i = \lambda_0 \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0223 \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1,444^2}{2 \cdot 9,81} = 3,386 \cdot 10^{-3}, \quad \text{tg}^0 = 0,0175,$$

$$\gamma = i / \text{tg} \beta = 3,386 \cdot 10^{-3} / 0,0175 \cong 0,193.$$

Поскольку $4,87 \cdot \lambda_0 = 4,87 \cdot 0,0223 \cong 1,109 < \gamma = 0,193$, то согласно (29), степень σ заполнения сечения трубы находится по формуле:

$$\sigma = 9,39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,193 / 0,0223} + 0,113 = 0,504$$

или 50,4 %.

43. Если бы сечение трубопровода было заполнено полностью, то скорость v перекачки равнялась бы

$$v = 4 \cdot 700 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 0,938 \text{ м/с}.$$

Далее находим:

$$Re=0,938 \cdot 0,514 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 803553,$$

$$\lambda_0 = 0,11 \cdot (0,3/514)^{0,25} \cong 0,0171,$$

$$i = \lambda_0 \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0171 \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{0,938^2}{2 \cdot 9,81} = 1,492 \cdot 10^{-3}, \quad \operatorname{tg} 5^0 = 0,0875,$$

$$\gamma = i / \operatorname{tg} \beta = 1,492 \cdot 10^{-3} / 0,0875 \cong 0,01705.$$

Используя формулу (29) для расчета степени σ заполнения сечения трубы, находим:

$$\sigma = 0,1825 \cdot (2\gamma/\lambda_0)^{0,356} = 0,1825 \cdot (2 \cdot 0,01705/0,0171)^{0,356} \cong 0,233.$$

Таким образом, площадь S сечения, занятого жидкостью составляет 23,3 % от площади S_0 сечения нефтепровода, а объем $V_{\text{п.}}$ пустот находится следующим расчетом:

$$V_{\text{п.}} = (S_0 - S) \cdot 2000 = 0,767 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2 / 4 \cdot 2000 \cong 318 \text{ м}^3.$$

44. Существующий режим перекачки характеризуется следующими параметрами:

$$v_0 = 4Q / \pi \cdot d^2 = 4 \cdot 1000 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,516^2) \cong 1,329 \text{ м/с},$$

$$Re = v_0 d / \nu = 1,329 \cdot 0,516 / (8 \cdot 10^{-6}) \cong 85721,$$

$$\lambda_0 = 0,11 \cdot (\varepsilon + 68/Re)^{0,25} = 0,11 \cdot (0,2/516 + 68/85721)^{0,25} \cong 0,0204,$$

$$h_{\text{А-С}} = \lambda_0 \cdot L / d \cdot v_0^2 / 2g = 0,0204 \cdot 125000 / 0,516 \cdot 1,329^2 / 2 \cdot 9,81 \cong 445 \text{ м}.$$

Итак, располагаемый на перекачку напор составляет 445 м.

Пусть искомая вставка имеет длину x м, а новый расход составляет 1200 м³/ч. Тогда скорости v_1 и v_2 течения нефти в основной магистрали и вставке будут соответственно равны:

$$v_1 = 4 \cdot 1200 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,516^2) \cong 1,595 \text{ м/с},$$

$$Re_1 = 102878, \quad \lambda_1 \cong 0,0198,$$

$$v_2 = 4 \cdot 1200 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,7^2) \cong 0,867 \text{ м/с},$$

$$Re_2 = 75863, \quad \lambda_2 \cong 0,0201.$$

На основе второго равенства (30) составляем уравнение:

$$445 = 0,0198 \cdot \frac{125000 - x}{0,516} \cdot \frac{1,595^2}{2 \cdot 9,81} + 0,0201 \cdot \frac{x}{0,7} \cdot \frac{0,867^2}{2 \cdot 9,81},$$

из которого находим: $x \cong 45655$ м или $\approx 45,7$ км.

45. Параметры существующего режима таковы:

$$d = 0,313 \text{ мм}, \quad \varepsilon = 4,792 \cdot 10^{-4}, \quad v \cong 1,084 \text{ м/с},$$

$$Re = 135717, \quad \lambda \cong 0,11 \cdot \left(4,792 \cdot 10^{-4} + 68/135717\right)^{0,25} \cong 0,0195,$$

$$h_\tau = 0,0195 \cdot 120000 / 0,313 \cdot 1,084^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 447,75 \text{ м}.$$

После реконструкции участка параметры режима должны стать:

$$d = 0,313 \text{ мм}, \quad \varepsilon = 4,792 \cdot 10^{-4}, \quad 1,354 \text{ м/с},$$

$$Re = 169521, \quad \lambda \cong 0,11 \cdot \left(4,792 \cdot 10^{-4} + 68/169521\right)^{0,25} \cong 0,0189$$

на старой части участка трубопровода, и

$$d = 0,363 \text{ мм}, \quad \varepsilon = 5,510 \cdot 10^{-4}, \quad v \cong 1,007 \text{ м/с},$$

$$Re = 146222, \quad \lambda \cong 0,11 \cdot \left(5,510 \cdot 10^{-4} + 68/146222\right)^{0,25} \cong 0,0196 -$$

на новой части участка.

Обозначим длину вставки через x (м). Тогда имеет место уравнение:

$$447,75 = 0,0189 \cdot \frac{120000 - x}{0,313} \cdot \frac{1,354^2}{2 \cdot 9,81} + 0,0196 \cdot \frac{x}{0,363} \cdot \frac{1,007^2}{2 \cdot 9,81},$$

откуда находим: $x \cong 80420$ м или $80,42$ км.

46. По определению, эквивалентные параметры d_3, λ_3 трубопровода вводятся согласно равенству

$$\begin{aligned} \lambda_1 \cdot \frac{L_1}{2gd_1} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d_1^2}\right)^2 + \lambda_2 \cdot \frac{L_2}{2gd_2} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d_2^2}\right)^2 + \lambda_3 \cdot \frac{L_1}{2gd_3} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d_3^2}\right)^2 = \\ = \lambda_3 \cdot \frac{L}{2gd_3} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d_3^2}\right)^2, \end{aligned}$$

где $L = L_1 + L_2 + L_3$. Отсюда получаем:

$$\frac{\lambda_1 L_1}{d_1^5} + \frac{\lambda_2 L_2}{d_2^5} + \frac{\lambda_3 L_3}{d_3^5} = \frac{\lambda_3 L}{d_3^5}.$$

Нетрудно проверить, что режим течения на всех участках трубопровода соответствует области квадратичного трения, то есть коэффициент λ гидравлического сопротивления зависит не от скорости течения жидкости, а от относительной шероховатости внутренней поверхности. Поэтому все λ , согласно формуле (27) Шифринсона, пропорциональны $d^{-0,25}$, откуда получаем:

$$\frac{L_1}{d_1^{5,25}} + \frac{L_2}{d_2^{5,25}} + \frac{L_3}{d_3^{5,25}} = \frac{L}{d_3^{5,25}}.$$

Далее находим эквивалентный диаметр d_3 трубопровода:

$$d_3 = \left(\frac{L}{L_1/d_1^{5,25} + L_2/d_2^{5,25} + L_3/d_3^{5,25}} \right)^{4/21}.$$

Подставляя в эту формулу исходные данные, находим:
 $d_3 \cong 502$ мм.

47. Воспользуемся формулой (35):

$$d_3 = 700 \cdot [1 + (514/700)^{19/7}]^{7/19} \cong 799 \text{ мм.}$$

48. Сначала вычислим потери h_{1-2} напора на участке нефтепровода:

$$v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 2000 / (3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 3600) \cong 1,106 \text{ м/с,}$$

$$Re = vd/\nu = 1,106 \cdot 0,8 / (25 \cdot 10^{-6}) = 35392,$$

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{35392} \cong 0,0231,$$

$$h_{1-2} = \lambda \cdot L/d \cdot u^2 / 2g = 0,0231 \cdot 120000 / 0,8 \cdot 1,106^2 / 2 \cdot 9,81 \cong 216 \text{ м.}$$

Таким образом, располагаемый напор для обоих вариантов равен 216 м.

Новый расход перекачки должен составлять 2400 м³/ч, что соответствует скоростям 1,327 м/с на участке без лупинга и 0,663 м/с в каждой из ветвей лупинга.

Вычисляем коэффициенты λ_0 и λ_1 гидравлического сопротивления на участке нефтепровода без лупинга и с лупингом, соответственно:

$$Re_0 = v_0 d / \nu = 1,327 \cdot 0,8 / (25 \cdot 10^{-6}) = 42464,$$

$$\lambda_0 = 0,3164 / \sqrt[4]{42464} \cong 0,0220,$$

$$Re_1 = 21232; \lambda_1 = 0,3164 / \sqrt[4]{21232} \cong 0,0262.$$

Вычисляем гидравлические уклоны на этих участках:

$$i_0 = \lambda_0 \cdot 1/d \cdot v_0^2 / 2g = 0,022 \cdot 1,327^2 / (0,8 \cdot 19,62) \cong 2,468 \cdot 10^{-3},$$

$$i_1 = \lambda_1 \cdot 1/d \cdot v_1^2 / 2g = 0,0262 \cdot 0,663^2 / (0,8 \cdot 19,62) \cong 0,734 \cdot 10^{-3}.$$

Обозначив длину лупинга через x , составим следующее уравнение:

$$h_{1-2} = i_0 \cdot (L - x) + i_1 \cdot x;$$

$$216 = 2,468 \cdot 10^{-3} (120000 - x) + 0,734 \cdot 10^{-3} \cdot x,$$

откуда $x \cong 46228$ м.

49. Запишем уравнение Бернулли для сегментов участка до сечения подкачки и после этого сечения:

$$\left(z_H + \frac{p_H}{\rho g} \right) - \left(z_{от} + \frac{p_{от}}{\rho g} \right) = \lambda_1(Q) \frac{40000}{2gd} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d^2} \right)^2,$$

$$\left(z_{от} + \frac{p_{от}}{\rho g} \right) - \left(z_K + \frac{p_K}{\rho g} \right) = \lambda_2(Q+q) \frac{80000}{2gd} \cdot \left[\frac{4(Q+q)}{\pi d^2} \right]^2.$$

Сложив эти уравнения почленно, получим:

$$\left(z_H + \frac{p_H}{\rho g} \right) - \left(z_K + \frac{p_K}{\rho g} \right) = \lambda_1 v_1^2 \frac{40000}{2gd} + \lambda_2 v_2^2 \frac{80000}{2gd},$$

где индекс (1) относится к параметрам потока до сечения подкачки, а индекс (2) - к параметрам после него.

Далее находим:

$$v_1 = 4 \cdot 2000 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,8^2) \cong 1,106 \text{ м/с}, \quad Re = 35392,$$

$$\lambda_1 = 0,0231;$$

$$v_2 = 4 \cdot 2500 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,8^2) \cong 1,382 \text{ м/с}, \quad Re = 44224,$$

$$\lambda_2 = 0,0218.$$

Подставляя эти результаты в уравнение Бернулли, получаем:

$$\frac{p_n}{900 \cdot 9,81} = \frac{0,5 \cdot 10^6}{900 \cdot 9,81} + 0,0231 \cdot \frac{1,106^2 \cdot 40000}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,8} + 0,0218 \cdot \frac{1,382^2 \cdot 80000}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,8},$$

откуда находим: $p_n \cong 30,1 \text{ МПа}$.

50. Запишем уравнение Бернулли для 3-х участков трубопровода, рис 2.4:

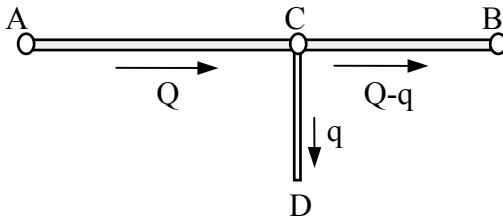


Рис. 2.4. К решению задачи № 50

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\rho g} \right) - \left(z_C + \frac{p_C}{\rho g} \right) = \lambda(Q) \cdot \frac{AC}{2gd} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d^2} \right)^2,$$

$$\left(z_C + \frac{p_C}{\rho g} \right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\rho g} \right) = \lambda(Q-q) \cdot \frac{CB}{2gd} \cdot \left[\frac{4(Q-q)}{\pi d^2} \right]^2, \quad (*)$$

$$\left(z_C + \frac{p_C}{\rho g} \right) - \left(z_D + \frac{p_D}{\rho g} \right) = \lambda_0(q) \cdot \frac{CD}{2gd_0} \cdot \left(\frac{4q}{\pi d_0^2} \right)^2,$$

где Q, q – расходы жидкости в начале основной магистрали и в отводе, соответственно; $\lambda(Q), \lambda(Q-q), \lambda_0(q)$ – коэффициенты гидравлического сопротивления в соответствующих трубопроводах. В этой системе из 3 уравнений 3 неизвестные величины: Q, q и p_C – давление в узле разветвления..

Будем решать систему уравнений (*) методом последовательных приближений.

Положим сначала $q = 0$. Тогда из исходной системы уравнений можно найти Q . Имеем:

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\rho g}\right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\rho g}\right) = \lambda(Q) \cdot \frac{AB}{2gd} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d^2}\right)^2,$$

$$\left(25 + \frac{5,5 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) - \left(100 + \frac{0,3 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) = \lambda v^2 \cdot \frac{125000}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,514^2},$$

откуда находим: $\lambda v^2 \cong 0,04486$. Решая это уравнения итерациями, находим $v \cong 1,61$ м/с или $Q \cong 1200$ м³/ч, $i \cong 4,45 \cdot 10^{-3}$.

Теперь можно вычислить напор H_C в узле разветвления:

$$H_C = \left(z_A + \frac{p_A}{\rho g}\right) - i_{AC} \cdot AC = \left(25 + \frac{5,5 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) - 4,45 \cdot 80 \cong 336,4 \text{ м.}$$

Записав уравнение Бернулли для отвода CD, получим:

$$H_C - \left(z_D + \frac{p_D}{\rho g}\right) = \lambda_0 \frac{l_0}{d_0} \cdot \frac{v_0^2}{2g},$$

$$336,4 - \left(75 + \frac{0,2 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) = \lambda_0 v_0^2 \cdot \frac{4000}{0,146 \cdot 2 \cdot 9,81} \Rightarrow \lambda_0 v_0^2 \cong 0,1698.$$

Решив это уравнение так же, как и предыдущее, методом итераций, найдем: $v_0 \cong 2,84$ м/с или $q \cong 171$ м³/ч. В трубопроводе $D = 530 \times 8$ мм этот расход дает изменение скорости течения на $4 \cdot 171 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2) \cong 0,23$ м/с.

В качестве второго приближения положим $q \cong 171$ м³/ч. Тогда из исходной системы уравнений (*) имеем:

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\rho g}\right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\rho g}\right) = \lambda(v) \cdot v^2 \frac{AC}{2gd} + \lambda(v - 0,23) \cdot (v - 0,23)^2 \frac{CB^2}{2gd}$$

или

$$\begin{aligned} & \left(25 + \frac{5,5 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) - \left(100 + \frac{0,3 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) = \\ & = \lambda_{AC} v_{AC}^2 \cdot \frac{80000}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,514} + \lambda_{CB} v_{CB}^2 \cdot \frac{45000}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,514} \text{ или} \\ & 1,1215 = 16 \cdot \lambda_{AC} v_{AC}^2 + 9 \cdot \lambda_{CB} v_{CB}^2, \end{aligned}$$

где $v_{CB} = v_{AC} - 0,23$ м/с.

Решив это уравнение методом итераций, найдем второе приближение:

$$\begin{aligned} v_{AC}^{(2)} & \cong 1,675 \text{ м/с}, \lambda_{AC}^{(2)} \cong 0,0173, i_{AC}^{(2)} \cong 4,813 \cdot 10^{-3}; \\ v_{CB}^{(2)} & \cong 1,445 \text{ м/с}, \lambda_{CB}^{(2)} \cong 0,0176, i_{CB}^{(2)} \cong 3,644 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Теперь можно вычислить напор $H_C^{(2)}$ в узле разветвления:

$$H_C^{(2)} = \left(z_A + \frac{p_A}{\rho g}\right) - i_{AC}^{(2)} \cdot AC = \left(25 + \frac{5,5 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) - 4,813 \cdot 80 \cong 307,4 \text{ м.}$$

Записав уравнение Бернулли для отвода CD, получим:

$$\begin{aligned} H_C^{(2)} - \left(z_D + \frac{p_D}{\rho g}\right) & = \lambda_0^{(2)} \frac{l_0}{d_0} \cdot \frac{v_0^{(2)2}}{2g}, \\ 307,4 - \left(75 + \frac{0,2 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81}\right) & = \lambda_0^{(2)} v_0^{(2)2} \cdot \frac{4000}{0,146 \cdot 2 \cdot 9,81} \Rightarrow \\ \lambda_0^{(2)} v_0^{(2)2} & \cong 0,1490. \end{aligned}$$

Решив это уравнение так же, как и предыдущее, методом итераций, найдем: $v_0^{(2)} \cong 2,65$ м/с или $q \cong 160$ м³/ч.

Попутно заметим, что первое приближение, в котором расход в отвод рассчитывался по распределению давления, существующему в трубопроводе с закрытым отводом, дало завышенное значение расхода на $(171 - 160)/160 \times 100 \cong 7\%$.

2.4. Гидравлические характеристики работы насосов и насосных станций

51. Сначала вычисляем суммы:

$$\sum_{i=1}^5 Q_i^2 = 3,4375 \cdot 10^6, \quad \sum_{i=1}^5 Q_i^4 = 3,8242 \cdot 10^{12},$$

$$\sum_{i=1}^5 H_i = 1499, \quad \sum_{i=1}^5 H_i Q_i^2 = 0,964 \cdot 10^9.$$

Затем подставляем значения вычисленных сумм в формулы (45) для аппроксимационных коэффициентов. В результате находим: $a \cong 331$, $b \cong 0,451 \cdot 10^{-4}$, так что $(Q - H)$ – характеристика насоса может быть представлена зависимостью $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$. Сопоставляя полученный результат с таблицей 2, видим, что мы имеем дело с центробежным нефтяным насосом НМ 1250-260.

Аналогично вычисляем суммы:

$$\sum_{i=1}^5 Q_i^3 = 3,516 \cdot 10^9; \quad \sum_{i=1}^5 \eta_i Q_i = 2,77 \cdot 10^3; \quad \sum_{i=1}^5 \eta_i Q_i^2 = 2,65 \cdot 10^6.$$

Подставляя найденные значения в аппроксимационные формулы (45), находим: $k \cong 1,62 \cdot 10^{-3}$, $k_1 \cong 0,81 \cdot 10^{-6}$, так что $(Q - \eta)$ – характеристика насоса НМ 1250-260 может быть представлена зависимостью $\eta = 1,62 \cdot 10^{-3} Q - 0,81 \cdot 10^{-6} Q^2$.

52. Решается аналогично предыдущей. Сначала вычисляем суммы:

$$\sum_{i=1}^5 Q_i^2 = 0,316 \cdot 10^9, \quad \sum_{i=1}^5 Q_i^3 = 3,544 \cdot 10^{12}; \quad \sum_{i=1}^5 Q_i^4 = 44,08 \cdot 10^{15};$$

$$\sum_{i=1}^5 H_i = 1570, \quad \sum_{i=1}^5 H_i Q_i^2 = 74,64 \cdot 10^9.$$

Затем подставляем значения вычисленных сумм в формулы (45) для аппроксимационных коэффициентов. В ре-

зультате находим: $a \cong 378$, $b \cong 1,02 \cdot 10^{-6}$, так что $(Q - H)$ – характеристика насоса может быть представлена зависимостью $H = 378 - 1,02 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2$.

Аналогично вычисляем суммы:

$$\sum_{i=1}^{i=5} \eta_i Q_i = 26,06 \cdot 10^3; \quad \sum_{i=1}^{i=5} \eta_i Q_i^2 = 254,2 \cdot 10^6.$$

Подставляя найденные значения в аппроксимационные формулы (45), находим: $k \cong 0,181 \cdot 10^{-3}$, $k_1 \cong 0,88 \cdot 10^{-8}$, так что $(Q - \eta)$ – характеристика насоса может быть представлена зависимостью $\eta = 0,181 \cdot 10^{-3} Q - 0,88 \cdot 10^{-8} Q^2$.

53. Гидравлическая $(Q - H)$ – характеристика насоса НМ 2500-230, рассчитанного на подачу $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$, согласно таблице 2, имеет вид $H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$, где Q измеряется в $\text{м}^3/\text{ч}$. Развиваемый насосом напор H представляется в следующем виде:

$$H = \frac{p_n - p_v}{\rho g} = \frac{20 \cdot 98100}{880 \cdot 9,81} \cong 227,3 \text{ м.}$$

Составляя и решая уравнение $227,3 = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$, находим: $Q \cong 1708 \text{ м}^3/\text{ч}$.

54. Согласно таблице 2, характеристика данного насоса имеет вид: $H = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$. Отсюда получаем:

$$p_n - p_v = \rho g \cdot (331 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2),$$

где Q измеряется в $\text{м}^3/\text{ч}$. Подставляя сюда исходные данные, имеем: $p_n = 0,3 \cdot 10^6 + 840 \cdot 9,81 \cdot (331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot 900^2)$.

Выполнив вычисления, получим: $p_n \cong 2,73 \text{ МПа}$.

55. Согласно формуле (46), имеем:

$$H = (331 + 301) - (0,451 + 0,387) \cdot 10^{-4} Q^2 = 632 - 0,838 \cdot Q^2.$$

56. Последовательно соединенные насосы имеют одинаковую подачу, а развиваемые ими напоры суммируются. Отсюда имеем уравнение $420/2 = 272 - 0,260 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$, из которого находим: $Q \cong 4883 \text{ м}^3/\text{ч}$.

57. Обозначим подачи первого и второго насосов через q_1 и q_2 , соответственно. Тогда $H_1 = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot q_1^2$ и $H_2 = 301 - 0,387 \cdot 10^{-4} \cdot q_2^2$. Поскольку при параллельном соединении насосов $H_1 = H_2 = H$, а $q_1 + q_2 = Q$, имеем:

$$\sqrt{\frac{H-331}{0,451 \cdot 10^{-4}}} + \sqrt{\frac{H-301}{0,387 \cdot 10^{-4}}} = Q.$$

Это и есть характеристика системы двух параллельно соединенных насосов.

58. При параллельном соединении насосов развиваемый ими напор одинаков, а подачи суммируются, поэтому имеем:

$$240 = 270 - 0,465 \cdot 10^{-4} \cdot q_1^2 \Rightarrow q_1 \cong 803 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$240 = 260 - 0,430 \cdot 10^{-4} \cdot q_2^2 \Rightarrow q_2 \cong 682 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$Q = q_1 + q_2 = 803 + 682 = 1485 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

59. При параллельном соединении насосов общая подача Q складывается из подач q_1 и q_2 отдельных насосов, а напоры, развиваемые насосами, одинаковы:

$$H = 330 - 0,415 \cdot 10^{-4} \cdot q_1^2 = 280 - 0,315 \cdot 10^{-4} \cdot q_2^2.$$

Поскольку $q_2 = Q - q_1 = 2000 - q_1$, получаем квадратное уравнение

$$330 - 0,415 \cdot 10^{-4} \cdot q_1^2 = 280 - 0,315 \cdot 10^{-4} \cdot (2000 - q_1)^2$$

для определения подачи q_1 первого насоса. Далее имеем:

$$0,1 \cdot q_1^2 + 1260 \cdot q_1 - 1760000 = 0$$

или

$$q_1^2 + 12600 \cdot q_1 - 17600000 = 0,$$

откуда находим: $q_1 \cong 1269 \text{ м}^3/\text{ч}$. После этого вычисляем подачу второго насоса: $q_2 = 2000 - 1269 = 731 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Напор, развиваемый системой насосов, можно найти, подставив либо q_1 в выражение характеристики 1-го насоса, либо q_2 – в характеристику 2-го насоса. Имеем:

$$H = 330 - 0,415 \cdot 10^{-4} \cdot 1269^2 \cong 263,2 \text{ м.}$$

60. Решается аналогично предыдущей задаче. Обозначая подачи насосов соответственно через q_1 и $q_2 = 8000 - q_1$, получаем уравнение:

$$272 - 0,260 \cdot 10^{-5} \cdot q_1^2 = 250 - 0,203 \cdot 10^{-5} \cdot (8000 - q_1)^2$$

для определения подачи q_1 первого насоса. Преобразуя это уравнение, получаем:

$$0,057 \cdot q_1^2 + 3248 \cdot q_1 - 15192000 = 0,$$

откуда находим: $q_1 \cong 4346 \text{ м}^3/\text{ч}$. После этого вычисляем подачу второго насоса: $q_2 = 8000 - 4346 = 3654 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Напор, развиваемый системой насосов, можно найти, подставив либо q_1 в выражение характеристики 1-го насоса, либо q_2 – в характеристику 2-го насоса. Имеем:

$$H = 272 - 0,260 \cdot 10^{-5} \cdot 4346^2 \cong 222,9 \text{ м.}$$

61. Суммарная мощность двух насосов, соединенных последовательно, определяется равенствами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho g H Q}{\eta} = \frac{\rho g H_1 q_1}{\eta_1} + \frac{\rho g H_2 q_2}{\eta_2}, \\ H = H_1 + H_2, \quad q_1 = q_2 = Q. \end{array} \right.$$

Отсюда находим:

$$\eta = \frac{H_1 + H_2}{H_1/\eta_1 + H_2/\eta_2}.$$

При $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ развиваемые насосами напоры H_1 и H_2 рассчитываются по характеристикам:

$$H_1 = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot 1800^2 \cong 232,5 \text{ м},$$

$$H_2 = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot 1800^2 \cong 224,7.$$

Отсюда имеем:

$$\eta = \frac{232,5 + 224,7}{232,5/0,78 + 224,7/0,83} \cong 0,80.$$

62. Суммарная мощность двух насосов, соединенных параллельно, определяется равенствами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho g H Q}{\eta} = \frac{\rho g H_1 q_1}{\eta_1} + \frac{\rho g H_2 q_2}{\eta_2}, \\ H_1 = H_2 = H, \quad q_1 + q_2 = Q. \end{array} \right.$$

Отсюда находим:

$$\eta = \frac{Q}{q_1/\eta_1 + q_2/\eta_2} = \frac{Q}{q_1/\eta_1 + (Q - q_1)/\eta_2}.$$

Для определения заранее неизвестных подач q_1 и q_2 каждого из насосов системы, составляем квадратное уравнение:

$$245 - 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot q_1^2 = 295 - 0,363 \cdot 10^{-4} \cdot (Q - q_1)^2.$$

После упрощений имеем:

$$q_1^2 - 6437q_1 + 3330000 = 0.$$

Отсюда находим два значения: $(q_1)_1 \cong 567,5$ и $(q_1)_2 \cong 5869,5$. Поскольку, однако, $q_1 \leq Q = 1800 \text{ м}^3/\text{ч}$, то следует взять только первый корень уравнения, то есть $q_1 = 567,5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Теперь можно вычислить суммарный коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{1800}{567,5/0,72 + (1800 - 567,5)/0,8} \cong 0,733.$$

63. Гидравлическую ($Q - H$) – характеристику насоса НМ 3600-230 с подачей на $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диаметром рабочего колеса 450 мм находим в таблице 2:

$$H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

Затем находим напор, развиваемый насосом:

$$H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot 1650^2 \cong 239 \text{ м.}$$

Наконец, согласно (42) вычисляем мощность на валу насоса:

$$N_{\text{в}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{в}}} = \frac{890 \cdot 9,81 \cdot (1650/3600) \cdot 239}{0,80} \cong 1195,5 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

64. Сначала определяем напор, развиваемый насосом:

$$H = 295 - 0,363 \cdot 10^{-4} \cdot 900^2 \cong 265,6 \text{ м.}$$

Согласно формуле (43) имеем:

$$N_{\text{н}} = \frac{N_{\text{в}}}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{пр}}} = \frac{840 \cdot 9,81 \cdot (900/3600) \cdot 265,6}{0,82 \cdot 0,95} \cong 702,4 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

или $702,4 \text{ кВт}$.

65. При подаче $400 \text{ м}^3/\text{ч}$ напоры и коэффициенты полезного действия насосов таковы:

$$\text{НМ 360-460: } H \cong 441,3 \text{ м, } \eta = 0,8112;$$

$$\text{НМ 500-300: } H \cong 343,2 \text{ м, } \eta = 0,7872.$$

Таким образом, по напору к условиям перекачки лучше подходит второй насос, но у него при заданной подаче относительно низкий коэффициент полезного действия. У первого насоса этот коэффициент значительно выше, но он дает излишек напора, который придется дросселировать более чем на 115 м . Поэтому оба насоса, строго говоря, не подходят к условиям перекачки.

Выберем, однако, из двух насосов лучший. Для этого вычислим мощности на валу насосов. Согласно (42), для первого насоса эта мощность составляет:

$$N_1 = \frac{\rho g Q H_1}{\eta_1(Q)} = \frac{\rho g \cdot (400/3600) \cdot 441,3}{0,8112},$$

для второго:

$$N_2 = \frac{\rho g Q H_2}{\eta_2(Q)} = \frac{\rho g \cdot (400/3600) \cdot 343,2}{0,7872}.$$

Составив отношение N_1/N_2 , получим:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{441,3/0,8112}{343,2/0,7872} \cong 1,25, \text{ то есть } N_1 > N_2.$$

Следовательно, второй насос НМ 500-300 в данном случае более экономичен, чем первый - НМ 360-460.

66. В общем случае гидравлическая характеристика насоса с диаметром D_0 рабочего колеса, определяемая функцией $H = F(Q)$, при замене этого колеса на рабочее колесо с другим диаметром D'_k изменяется и приобретает вид $H = (D'_k/D_0)^2 \cdot F(D_0/D'_k \cdot Q)$. В частном случае, когда гидравлическая характеристика насоса определяется квадратичной зависимостью вида $H = a - b \cdot Q^2$, измененная форма характеристики имеет вид: $H = a \cdot (D'_k/D_0)^2 - b \cdot Q^2$ - см. формулу (48). Поэтому имеем:

$$H = 331 \cdot (418/441)^2 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$$

$$\text{или } H = 299 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

67. Аналогично решению предыдущей задачи имеем:

$$273 \cdot (D'_k/450)^2 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 = 273 - 25 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

откуда находим: $D'_k \cong 428,9$ мм. Это означает, что рабочее колесо насоса следует обточить примерно на 21 мм.

68. Согласно второй из формул (48) имеем:

$$1) H = 280 \cdot \left(\frac{2900}{3200} \right)^2 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 \cong 230 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2,$$

$$2) H = 280 \cdot \left(\frac{2600}{3200} \right)^2 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 \cong 185 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

69. В общем случае гидравлическая характеристика насоса с частотой ω_0 вращения рабочего колеса, определяемая функцией $H = F(Q)$, при изменении частоты вращения вала на другую частоту ω' изменяется и приобретает вид $H = (\omega'/\omega_0)^2 \cdot F(\omega_0/\omega' \cdot Q)$. Поэтому имеем:

$$1) H = 280 \cdot \left(\frac{2900}{3200} \right)^2 - 0,775 \cdot 10^{-2} \cdot \left(Q \cdot \frac{3200}{2900} \right)^{1,75} \text{ или}$$

$$H = 230 - 0,756 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{1,75};$$

$$2) H = 280 \cdot \left(\frac{2600}{3200} \right)^2 - 0,775 \cdot 10^{-2} \cdot \left(Q \cdot \frac{3200}{2600} \right)^{1,75} \text{ или}$$

$$H = 185 - 0,736 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{1,75}.$$

70. Используя формулу (48), можно составить уравнение:

$$280 \cdot \left(\frac{\omega}{3200} \right)^2 - 0,795 \cdot 10^{-4} \cdot 1000^2 = 220.$$

Решив уравнение, найдем: $\omega \cong 3310$ об/мин., то есть число оборотов нужно увеличить примерно на 110.

2.5. Совместная работа нефтеперекачивающих станций и трубопровода

71. Запишем уравнение баланса напоров (49'):

$$[z_n + h_n + F(Q)] - [z_k + h_k] = h_{n-k} = \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Подставляя в него исходные данные, получаем:

$$\begin{aligned} & \left[50 + 30 + 2 \cdot (331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2) \right] - \left[100 + \frac{0,3 \cdot 10^6}{830 \cdot 9,81} \right] = \\ & = \lambda \cdot \frac{120000}{0,514} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}. \end{aligned}$$

Если при этом учесть, что $Q \text{ (м}^3\text{/ч)} = 3600 \cdot v \cdot (\pi \cdot 0,514^2 / 4)$, где v – в м/с, то полученное уравнение можно представить в виде:

$$605,2 = v^2 \cdot (11899,2 \cdot \lambda + 50,3).$$

Уравнение решаем методом последовательных приближений (итераций). Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,449$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,449 \cdot 0,514 / (9 \cdot 10^{-6}) = 82754;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/514 + 68/82754)^{0,25} \cong 0,0205 > 0,02.$$

Можно было бы ограничиться этим приближением, но можно найти и более точный результат. В качестве второго приближения принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0205$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,434$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,434 \cdot 0,514 / (9 \cdot 10^{-6}) \cong 81897;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/514 + 68/81897)^{0,25} \cong 0,0206 \approx \lambda^{(2)} = 0,0205.$$

Таким образом, $v \cong 1,434$ м/с или $Q \cong 1071$ м³/ч.

Давление p_n в начале трубопровода находим по формуле:

$$\begin{aligned} p_n = \rho g \cdot [h_n + F(Q)] &= 830 \cdot 9,81 \cdot \left[30 + 2 \cdot (331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot 1071^2) \right] = \\ &\cong 4,79 \cdot 10^6 \text{ Па или } 4,79 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

72. Составим уравнение баланса напоров (49'):

$$\left[0 + h_n + 2 \cdot (365 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2)\right] - [0 + h_k] = \lambda \cdot \frac{140000}{0,311} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}.$$

Учитывая, что Q (м³/ч) = $3600 \cdot v \cdot (\pi \cdot 0,311^2 / 4)$, где v – в м/с, и что $h_n = h_k$, полученное уравнение можно представить в виде:

$$730 = v^2(22944 \cdot \lambda + 119).$$

Это уравнение решаем методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,124$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,124 \cdot 0,311 / (5 \cdot 10^{-6}) = 69913,$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,1/311 + 68/69913)^{0,25} \cong 0,0209 > 0,02.$$

В качестве второго приближения принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0209$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,104$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,104 \cdot 0,311 / (5 \cdot 10^{-6}) \cong 68669;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,1/311 + 68/68669)^{0,25} \cong 0,0209 \approx \lambda^{(2)}.$$

Таким образом, $v \cong 1,104$ м/с или $Q \cong 301,8$ м³/ч.

Если один из насосов отключить, то уравнение баланса напоров примет вид:

$$365 = v^2(22944 \cdot \lambda + 59,5).$$

Решив его аналогично предыдущему уравнению, получим: $v \cong 0,799$ м/с, $Q = 0,799 \cdot 3,14 \cdot 0,311^2 / 4 \cdot 3600 \cong 218,4$ м³/ч.

Таким образом, при отключении одного из насосов расход перекачки уменьшится с 301,8 до 218,4 м³/ч.

73. Составим уравнение баланса напоров (49'):

$$\left[75 + 40 + 2 \cdot (285 - 0,644 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)\right] - [140 + 30] = \lambda \cdot \frac{125000}{0,800} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}$$

Учитывая, что Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) $= 3600 \cdot v \cdot (\pi \cdot 0,311^2/4)$, где v – в м/с, полученное уравнение можно представить в виде:

$$515 = v^2(7964 \cdot \lambda + 42,1).$$

Это уравнение решаем методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,599$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,599 \cdot 0,8 / (9 \cdot 10^{-6}) = 142133,$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/800 + 68/142133)^{0,25} \cong 0,0181 < 0,02.$$

В качестве второго приближения принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0181$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,663$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,663 \cdot 0,800 / (9 \cdot 10^{-6}) \cong 147822;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/800 + 68/147822)^{0,25} \cong 0,0180 \approx \lambda^{(2)}.$$

Таким образом, $v \cong 1,663$ м/с или $Q \cong 3008$ $\text{м}^3/\text{ч}$.

74. Если Q – расход перекачки, то подача каждого из одинаковых насосов, соединенных параллельно, составляет $Q/2$, поэтому характеристика системы двух параллельно включенных насосов имеет вид:

$$H = 280 - 0,253 \cdot 10^{-3} \cdot (Q/2)^2 = 280 - 0,0635 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2.$$

Составляем уравнение баланса напоров:

$$\left[25 + 40 + 280 - 0,0635 \cdot 10^{-3} Q^2\right] - \left[117 + \frac{0,22 \cdot 10^6}{735 \cdot 9,81}\right] = \lambda \cdot \frac{130000}{0,516} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}$$

Будучи преобразованным, это уравнение имеет вид:

$$197,5 = v^2 \cdot (12841 \cdot \lambda + 36).$$

Как и в предыдущих задачах, решаем уравнение методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v = 0,821$ м/с. Проверяем, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 0,821 \cdot 0,516 / (0,6 \cdot 10^{-6}) = 706060;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/516 + 68/706060)^{0,25} \cong 0,0154 < 0,02.$$

В качестве второй итерации принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0154$. Тогда из уравнения находим: $v = 0,919$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 0,919 \cdot 0,516 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 790340;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/516 + 68/790340)^{0,25} \cong 0,0153 \approx \lambda^{(2)} = 0,0154.$$

Таким образом, $v \cong 0,919$ м/с или $Q \cong 691,5$ м³/ч.

75. Уравнение баланса напоров имеет вид:

$$\begin{aligned} [80 + 70 + (251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2) + (273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2) - 0,15 \cdot 10^{-4} Q^2] - \\ - [120 + 40] = 1,02 \cdot \lambda \cdot \frac{150000}{0,800} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}. \end{aligned}$$

После упрощений это уравнение можно представить следующим образом: $514 = v^2 \cdot (9748 \cdot \lambda + 116,6)$.

Уравнение решаем методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,284$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,284 \cdot 0,8 / (25 \cdot 10^{-6}) = 41088,$$

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{41088} \cong 0,0222 > \lambda^{(1)} = 0,02.$$

В качестве второго приближения принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0222$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,242$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,242 \cdot 0,8 / (25 \cdot 10^{-6}) = 39744;$$

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{39744} \cong 0,0224 \approx \lambda^{(2)} = 0,0222.$$

Итак, $v = 1,242$ м/с, что эквивалентно $Q \cong 2246$ м³/ч.

76. Предположим сначала, что самотечных участков в трубопроводе нет (хотя сечение $x = 80$ км имеет довольно высокую геодезическую отметку). Тогда уравнение баланса напоров дает:

$$[50 + 40 + (331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2)] - [40 + 30] = \lambda \cdot \frac{120000}{0,514} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}$$

После упрощений ($Q = v \cdot 3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2 / 4$) получаем уравнение $351 = v^2 \cdot (11899 \cdot \lambda + 25,1)$, которое решаем методом итераций.

Сначала выбираем $\lambda^{(1)} = 0,02$ и находим скорость $v^{(1)}$ в первом приближении: 1,155 м/с. Затем проверяем правильность сделанного выбора:

$$Re = 1,155 \cdot 0,514 / (3 \cdot 10^{-6}) \cong 197890;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/197890)^{0,25} \cong 0,0175 < 0,02.$$

В качестве второго приближения полагаем $\lambda^{(2)} = 0,0175$.

Находим скорость перекачки: $v^{(2)} \cong 1,226$ м/с и проверяем правильность сделанного выбора:

$$Re = 1,226 \cdot 0,514 / (3 \cdot 10^{-6}) \cong 210055;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/514 + 68/210055)^{0,25} \cong 0,0173 \approx 0,0175.$$

Итак, $v \cong 1,226$ м/с. Рассчитываем гидравлический уклон: $i = 0,0173 \cdot 1/0,514 \cdot 1,226^2 / (2 \cdot 9,81) \cong 2,578 \cdot 10^{-3}$. Это означает, что если бы в трубопроводе не было самотечных участков, то напор уменьшался бы на 2,578 м каждый километр протяженности трубопровода.

Определим, какой напор будет в наивысшей точке профиля трубопровода, то есть в сечении $x = 80$ км. Имеем:

$$H_{80} = H_{120} + i \cdot 40 = 40 + 30 + 2,578 \cdot 40 = 173,12 \text{ м.}$$

Выясняется, что это значение меньше высотной отметки $z = 200$ м исследуемого сечения, следовательно, исходное предположение об отсутствии в трубопроводе самотечного участка неверно. В сечении $x = 80$ км находится перевальная точка и начинается самотечный участок. Следовательно, расчетная длина трубопровода равна не 120, а 80 км.

Составляем новое уравнение баланса напоров:

$$\left[50+40+(331-0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2)\right] - \left[200 + \frac{15000}{820 \cdot 9,81}\right] = \lambda \cdot \frac{80000}{0,514} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}$$

в котором учитываем расчетную длину трубопровода и упругость насыщенных паров керосина. После упрощений получаем:

$$219,1 = v^2 \cdot (7933 \cdot \lambda + 25,1).$$

Решив новое уравнение так же, как и предыдущее, методом итераций, получим $v = 1,157$ м/с. Это означает, что расход перекачки составляет ≈ 864 м³/ч.

77. Запишем уравнение баланса напоров:

$$\left[40 + 2 \cdot (565 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2)\right] - 20 = \lambda \cdot \frac{114000}{0,311} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}$$

После упрощений это уравнение принимает вид:

$$1150 = v^2 \cdot (18683 \cdot \lambda + 119,1).$$

Уравнение решаем методом итераций. Сначала выбираем $\lambda^{(1)} = 0,02$ и находим скорость $v^{(1)}$ в первом приближении: 1,528 м/с. Затем проверяем правильность сделанного выбора:

$$Re = 1,528 \cdot 0,311 / (3 \cdot 10^{-6}) \cong 158403;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/311 + 68/158403)^{0,25} \cong 0,0191 < 0,02.$$

В качестве второго приближения полагаем $\lambda^{(2)} = 0,0191$.

Находим скорость перекачки: $v^{(2)} \cong 1,554$ м/с и проверяем правильность сделанного выбора:

$$Re = 1,554 \cdot 0,311 / (3 \cdot 10^{-6}) \cong 161098 ;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15/311 + 68/161098)^{0,25} \cong 0,0191 .$$

Итак, $v \cong 1,554$ м/с ($Q \cong 425$ м³/ч).

Если проложить лупинг ($D_{л} = 325 \times 7$ мм, $\Delta = 0,15$ мм, $L_{л} = x$ км), то расход в неразветвленной части трубопровода должен составить $1,2 \cdot 425 = 510$ м³/ч ($v \cong 1,866$ м/с), а в каждой из ветвей лупинга - по 255 м³/ч ($v \cong 0,933$ м/с). Отсюда можно рассчитать коэффициенты λ_1 и λ_2 гидравлического сопротивления в неразветвленной и разветвленной частях трубопровода, соответственно:

$$Re_1 = 1,866 \cdot 0,311 / (3 \cdot 10^{-6}) = 193442, \lambda_1 = 0,0187 ;$$

$$Re_2 = 0,933 \cdot 0,311 / (3 \cdot 10^{-6}) = 96721, \lambda_2 = 0,0204 .$$

Уравнение баланса напоров дает:

$$\begin{aligned} & \left[40 + 2 \cdot (565 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot 510^2) \right] - 20 = \\ & = \lambda_1 \cdot \frac{(114 - x) \cdot 10^3}{0,311} \cdot \frac{1,866^2}{2 \cdot 9,81} + \lambda_2 \cdot \frac{x \cdot 10^3}{0,311} \cdot \frac{0,933^2}{2 \cdot 9,81} \end{aligned}$$

или после упрощения: $735,4 = 10,67 \cdot (114 - x) + 2,91 \cdot x$.

Отсюда находим: $x = 61,98$ км.

78. Пусть расход q в отводе составляет 120 м³/ч. Тогда должно выполняться уравнение материального баланса жидкости:

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot v_1 - \frac{\pi d^2}{4} \cdot v_2 = \frac{q}{3600} \text{ или}$$

$$v_1 - v_2 = \frac{4 \cdot 120}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2} \cong 0,1607 \text{ м/с.}$$

Здесь v_1 – скорость бензина в трубопроводе до точки подключения отвода; v_2 – скорость бензина *после* этой точки.

Составим уравнение баланса напоров для участка трубопровода:

$$\begin{aligned} & [20 + 30 + 2 \cdot (331 - 0,451 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2)] - [60 + 30] = \\ & = \lambda_1 \cdot \frac{80000}{0,514} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot 9,81} + \lambda_2 \cdot \frac{45000}{0,514} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot 9,81}. \end{aligned}$$

После упрощений получаем:

$$622 - 50,3 \cdot v_1^2 \cong 7933 \cdot \lambda_1 v_1^2 + 4462 \cdot \lambda_2 v_2^2.$$

Если подставить сюда выражение v_2 через v_1 согласно уравнению $v_2 = v_1 - 0,1607$, то получим уравнение относительно v_1 , близкое к квадратному:

$$v_1^2 \cdot (7933 \cdot \lambda_1 + 4462 \cdot \lambda_2 + 50,3) - 1434 \cdot \lambda_2 \cdot v_1 + (115 \cdot \lambda_2 - 622) = 0.$$

Поскольку бензин имеет относительно небольшую вязкость, то числа Рейнольдса перекачки весьма велики, поэтому естественно предположить, что течение жидкости происходит в режиме *квадратичного трения*, то есть коэффициенты λ_1 и λ_2 гидравлического сопротивления определяются исключительно шероховатостью внутренней поверхности трубопровода, см. формулу Шифринсона (27):

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0,11 \cdot (0,15/514)^{0,25} \cong 0,0144.$$

Полагая $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,015$, получаем квадратное уравнение $236,2 \cdot v_1^2 - 21,5 \cdot v_1 - 620,3 = 0$, из которого находим: $v_1 \cong 1,667$ м/с. Следовательно, $v_2 = 1,667 - 0,1607 = 1,506$ м/с. Проверяем правильность выбора λ :

$$Re_1 = 1,667 \cdot 0,514 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 1428063,$$

$$Re_2 = 1,506 \cdot 0,514 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 1290140,$$

$$\lambda_1 = 0,11(0,15/514 + 68/1428063)^{0,25} \cong 0,0149,$$

$$\lambda_2 = 0,11(0,15/514 + 68/1290140)^{0,25} \cong 0,0150,$$

то есть эти значения весьма близки к выбранному значению 0,015.

Найдем теперь напор H_{80} в сечении $x_0 = 80$ км подключения отвода. Для этого определим сначала гидравлический уклон i на участке *после* отвода:

$$i = 0,015 \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{1,506^2}{2 \cdot 9,81} \cong 3,337 \cdot 10^{-3} \text{ (3,373 м/км)}.$$

Затем находим напор H_{80} :

$$H_{80} = H_{125} + i \cdot 45 = 60 + 30 + 3,373 \cdot 45 \cong 241,8 \text{ м.}$$

Теперь стали известны напоры в начале (241,8 м) и в конце (10 + 30=40 м) отвода.

Для выбора минимально необходимого диаметра d_0 отвода составляем уравнение баланса напоров для отвода:

$$241,8 - 40 = \lambda_0 \cdot 6000 / d_0 \cdot v_0^2 / (2 \cdot 9,81),$$

где $v_0 = 4q / (\pi d_0^2) = 4 \cdot 120 / (3,14 \cdot 3600 \cdot d_0^2)$ – скорость течения бензина в отводе. Получаем уравнение:

$$\frac{\lambda_0}{d_0^5} = 18,685,$$

которое решаем методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,015$. Тогда находим: $d_0 = 0,240$ м. Ближайший из существующих типоразмеров трубопровода - $D = 273 \times 6$ мм, внутренний диаметр d_0 которого равен 261 мм. Проверяем правильность выбора λ :

$$v = 4q / \pi d_0^2 = 4 \cdot 120 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,261^2) \cong 0,623 \text{ м/с,}$$

$$Re = 0,623 \cdot 0,261 / (0,6 \cdot 10^{-6}) \cong 271005,$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,15 / 261 + 68 / 271005)^{0,25} \cong 0,0186.$$

Далее полагаем $\lambda^{(2)} = 0,0186$. Тогда $d_0^{(2)} = 0,251$ м, то есть диаметр $d_0 = 261$ мм удовлетворяет и этому условию. Итак, $D = 273 \times 6$ мм.

79. Уравнения баланса напоров для первого и второго участков трубопровода, соответственно, имеют вид:

$$\begin{aligned} [130 + 60 + 2 \cdot (251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)] - [200 + h_{n2}] &= \lambda \cdot \frac{10^5}{0,7} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}, \\ [200 + h_{n2} + 2 \cdot (273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2)] - [100 + 30] &= \lambda \cdot \frac{1,5 \cdot 10^5}{0,7} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}. \end{aligned}$$

Здесь учтено, что вследствие неизменности диаметра трубопровода при переходе от одного участка к другому, скорость перекачки и коэффициенты гидравлического сопротивления на обоих участках одинаковы; h_{n2} – подпор промежуточной станции, заранее неизвестный и подлежащий определению.

Сложив почленно исходные уравнения, получим:

$$1108 - 4,124 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \cong 18203 \cdot \lambda v^2 \text{ или}$$

$$1108 = v^2 \cdot (18203 \cdot \lambda + 79,1).$$

Это уравнение решаем методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v^{(1)} = 1,581$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,581 \cdot 0,7 / (25 \cdot 10^{-6}) = 44268,$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/700 + 68/44268)^{0,25} \cong 0,0227 > 0,02.$$

В качестве второго приближения принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0227$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,500$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,5 \cdot 0,7 / (25 \cdot 10^{-6}) = 42000 ;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,2/700 + 68/42000)^{0,25} \cong 0,0230 > 0,0227.$$

В качестве третьего приближения принимаем $\lambda^{(3)} = 0,0230$. Тогда $v^{(3)} \cong 1,492$ м/с или $Q \cong 2066$ м³/ч.

Из первого уравнения баланса напоров вычисляем подпор h_{n2} промежуточной станции. Имеем:

$$[130+60+2 \cdot (251-0,812 \cdot 10^{-5} \cdot 2066^2)] - [200+h_{n2}] = 0,023 \cdot \frac{10^5}{0,7} \cdot \frac{1,492^2}{2 \cdot 9,81}$$

Отсюда находим: $h_{n2} \cong 49,9$ м, что больше кавитационного запаса насосов почти на 10 м.

80. Уравнения баланса напоров для участков трубопровода имеют вид:

$$[50+50+2 \cdot (251-0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)] - [60+h_{n2}] = \lambda \cdot \frac{150000}{0,704} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81},$$

$$[60+h_{n2}+2 \cdot (285-0,640 \cdot 10^{-5} Q^2)] - [70+h_{n3}] = \lambda \cdot \frac{180000}{0,704} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81},$$

$$[70+h_{n3}+2 \cdot (236-0,480 \cdot 10^{-5} Q^2)] - [180+30] = \lambda \cdot \frac{120000}{0,704} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}$$

Здесь учтено, что вследствие неизменности диаметра трубопровода при переходе от одного участка к другому, скорость перекачки и коэффициенты гидравлического сопротивления участков одинаковы; h_{n2}, h_{n3} – подпоры промежуточных станций, заранее неизвестные и подлежащие определению.

Сложив почленно исходные уравнения, получим:

$$1434 - 3,864 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \cong 32579 \cdot \lambda v^2 \text{ или}$$

$$1434 = v^2 \cdot (32579 \cdot \lambda + 75,8).$$

Это уравнение решаем методом итераций. Сначала полагаем $\lambda^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения находим: $v^{(1)} = 1,404$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,404 \cdot 0,704 / (30 \cdot 10^{-6}) \cong 32947,$$

$$\lambda = 0,3164/\sqrt[4]{32947} \cong 0,0234 > 0,02.$$

В качестве второго приближения принимаем $\lambda^{(2)} = 0,0234$. Тогда из уравнения находим: $v = 1,308$ м/с. Проверим, правильно ли взят коэффициент λ :

$$Re = 1,308 \cdot 0,704 / (30 \cdot 10^{-6}) \cong 30694 ;$$

$$\lambda = 0,3164/\sqrt[4]{30694} \cong 0,0239 \approx 0,0234.$$

Итак, $v = 1,308$ м/с или $Q \cong 1832$ м³/ч.

Из первого уравнения определяем h_{n2} . Имеем:

$$[50 + 50 + 2 \cdot (251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot 1832^2)] - [60 + h_{n2}] = 0,0234 \cdot \frac{150000}{0,704} \cdot \frac{1,308^2}{2 \cdot 9,81},$$

откуда находим: $h_{n2} \cong 52,7$ м.

Из второго уравнения баланса напоров находим h_{n3} :

$$[60 + 52,7 + 2 \cdot (285 - 0,640 \cdot 10^{-5} \cdot 1832^2)] - [70 + h_{n3}] = 0,0234 \cdot \frac{180000}{0,704} \cdot \frac{1,308^2}{2 \cdot 9,81},$$

или $h_{n3} \cong 48,0$ м.

Оба найденных подпора промежуточных нефтеперекачивающих станций удовлетворяют требованиям кавитационного запаса, поэтому найденный режим перекачки реализуем.

2.6. Истечение жидкости из трубопровода при его повреждении

81. Предположим сначала, что истечение бензина происходило при постоянном напоре, то есть пренебрежем изменением уровня бензина над отверстием за счет его вытекания. Тогда в формуле (53) для расхода q утечки следует положить $\Delta H = 8 - 1 = 7$ м. Имеем:

$$q = 0,62 \cdot 3,14 \cdot 0,005^2 / 4 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 7} \cong 1,426 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Это означает, что за 28 ч вытечет $28 \cdot 3600 \cdot 1,426 \cdot 10^{-4}$ м, что составляет $14,374 \text{ м}^3$; $735 \cdot 14,374 \cong 10565$ кг или 10,57 т.

Этот результат можно уточнить, если учесть, что истечение бензина происходило не при постоянном, а при переменном напоре над отверстием, то есть если принять, что $\Delta H = z(t) - 1$, где $z(t)$ – переменный во времени уровень зеркала жидкости в резервуаре. Учитывая, что $q = -S \cdot dz/dt$, где S – площадь дна резервуара, получаем обыкновенное дифференциальное уравнение

$$-S \frac{dz}{dt} = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot (z - 1)}$$

для определения неизвестной функции $z(t)$.

Решение полученного уравнения с начальным условием $z(0) = 8$ дает:

$$2 \cdot (\sqrt{z-1} - \sqrt{7}) = -\mu s \sqrt{2g} \cdot t/S \text{ или}$$

$$z(t) = 1 + (\sqrt{7} - \mu s \sqrt{2g} \cdot t/2S)^2.$$

Отсюда находим, что при $t = 28 \cdot 3600$ с,

$$z = 1 + \left[\sqrt{7} - 0,62 \cdot 1,9625 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 28 \cdot 3600 / (2 \cdot 176,625) \right]^2 \text{ м}$$

или $z \cong 7,9189$ м, то есть уровень бензина в резервуаре понизился всего на 8,11 см. Объем V вытекшего бензина определяется равенством:

$$V = S \cdot (8 - 7,9189) = 176,625 \cdot 0,0811 \cong 14,324 \text{ м}^3,$$

что дает результат, примерно на $0,05 \text{ м}^3$ меньший, чем в упомянутом варианте расчета. При этом общая масса потерянного бензина составляет:

$$14,324 \cdot 735 = 10528,14 \text{ кг или } \approx 10,53 \text{ т.}$$

82. Обозначим $z(t)$ – уровень топлива в резервуаре, считая от дна. Поскольку площадь отверстия мала, то рас-

пределение давления по высоте резервуара можно принять гидростатическим. Тогда

$$q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot z(t)} = -S(t) \cdot \frac{dz}{dt}, \quad z(0) = D = 8 \text{ м.}$$

Здесь $S(t) = L \cdot 2\sqrt{z \cdot (D-z)}$ – площадь зеркала опускающегося топлива. Таким образом, получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\mu s \sqrt{2g}}{2L} \cdot \frac{1}{\sqrt{D-z}}$$

для определения функции $z(t)$, которое нужно решить с начальным условием $z(0) = D$.

Решение полученного уравнения имеет вид:

$$\frac{4L(D-z)^{3/2}}{3\mu s \sqrt{2g}} = t,$$

где t – время, прошедшее с начала процесса истечения. Из найденного решения следует $z(t) = D - (3\mu s \sqrt{2g} \cdot t / 4L)^{2/3}$, откуда подстановкой исходных данных ($t = 24 \cdot 3600$ с) находим:

$$z = 8 - \left(\frac{3 \cdot 0,62 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 24 \cdot 3600}{4 \cdot 50} \right)^{2/3} \cong 7,498 \text{ м,}$$

то есть дизельное топливо в резервуаре опустилось примерно на 0,502 м от верхней образующей резервуара.

Вычисляем объем V вытекшего топлива как объем освободившейся части резервуара: $V = S_c \cdot L$, где S_c – площадь кругового сегмента, выражающегося, как известно, формулой $S_c = 0,5 \cdot R^2 (\alpha - \sin \alpha)$, в которой $R = D/2$, а α – центральный угол сегмента. Имеем:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{D/2 - \Delta z}{D/2} = \frac{8/2 - 0,502}{8/2} \cong 0,875 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \alpha = 2 \arccos 0,875 \cong 1,011 \Rightarrow \sin \alpha \cong 0,847.$$

Следовательно, $S_c = 0,5 \cdot 4^2 \cdot (1,011 - 0,847) \cong 1,312 \text{ м}^2$. Далее находим: $V = 1,312 \cdot 50 = 65,6 \text{ м}^3$, или с учетом плотности топлива - $840 \cdot 65,6 = 55104 \text{ кг}$ ($\approx 55,1 \text{ т}$).

83. Для решения задачи используем формулу (57), представляющую время, за которое уровень жидкости в трубопроводе опустится на определенную величину ($z_1 - z_2$):

$$t_{1-2} = \frac{2S_0}{\mu s \sqrt{2g}} \cdot (\sqrt{z_1 - p_b / \rho g} - \sqrt{z_2 - p_b / \rho g}).$$

В данном случае площадь сечения трубы необходимо удвоить, поскольку истечение происходит из двух симметричных сегментов: $S_0 = 2 \cdot (3,14 \cdot 0,207^2 / 4) \cong 0,06727 \text{ м}^2$. Далее имеем:

$$s = 3,14 \cdot 0,001^2 / 4 = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \mu = 0,62;$$

$$p_b / \rho g = (98100 - 70000) / (740 \cdot 9,81) \cong 3,87 \text{ м};$$

$$z_1 = 1000 \cdot \sin 3^0 \cong 52 \text{ м}; t_{1-2} = 24 \cdot 3600 = 86400 \text{ с}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (57), получаем:

$$86400 = \frac{2 \cdot 0,06727}{0,62 \cdot 0,785 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \cdot 9,81}} (\sqrt{52 - 3,87} - \sqrt{z_2 - 3,87}),$$

откуда находим: $z_2 \cong 34,71 \text{ м}$. Это означает, что в конце суток уровень бензина в отводе снизится с 52 до 34,71 м. При этом отвод останется заполненным бензином на 667,5 ($34,71 / \sin 3^0 = 34,71 / 0,052 = 667,5$) м вправо и влево от отверстия. Это означает, что из трубопровода вытекло:

$$V = (1000 - 667,5) \cdot 0,06727 \cong 22,37 \text{ м}^3 \text{ топлива}.$$

84. Поскольку отверстие в стенке трубопровода невелико, то образовавшаяся течь не изменяет режим перекачки и для расчета потерь нефти можно воспользоваться формулой (53), в которой $\Delta H = (p_* - p_a) / \rho g$, а избыточное давление

$p_* - p_a$ в сечении утечки рассчитывается так, как если бы ее не было. Имеем:

$$H_H = 150 + \frac{4,5 \cdot 10^6}{870 \cdot 9,81} \cong 677,26 \text{ м}, \quad H_K = 100 + \frac{0,3 \cdot 10^6}{870 \cdot 9,81} \cong 135,15 \text{ м},$$

$$i = \frac{H_H - H_K}{L} = \frac{677,26 - 135,15}{120000} \cong 4,5176 \cdot 10^{-3},$$

$$H_* = H_H - i \cdot L_* = 677,26 - 4,5176 \cdot 10^{-3} \cdot 80000 \cong 315,85 \text{ м},$$

$$\Delta H = H_* - z_* = 315,85 - 50 = 265,85 \text{ м},$$

$$q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H} = 0,62 \cdot 0,0001 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 265,85} \cong 4,478 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объем V вытекшей за 6 часов нефти составляет:

$$4,478 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 3600 \cong 96,7 \text{ м}^3.$$

85. В данной задаче в отличие от предыдущей разность ΔH напоров, входящую в формулу $q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H}$, нельзя вычислять предполагая, что появившаяся утечка не изменяет режима перекачки, ведь площадь отверстия в стенках трубопровода ($s = 25 \text{ см}^2$) достаточно велика и истечение жидкости через отверстие делает скорости v_1 течения нефти до сечения утечки и v_2 — после нее не равными друг другу. Для решения задачи необходимо составить и решить полную систему уравнений, получающуюся на основе уравнения Бернулли, примененного к двум сегментам участка — до и после сечения утечки:

$$\begin{cases} \left(150 + \frac{4,5 \cdot 10^6}{870 \cdot 9,81}\right) - (50 + \Delta H) = \lambda_1 \frac{80000}{0,7} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot 9,81}, \\ (50 + \Delta H) - \left(100 + \frac{0,3 \cdot 10^6}{870 \cdot 9,81}\right) = \lambda_2 \frac{40000}{0,7} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot 9,81}, \\ (v_1 - v_2) \cdot \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4} = 0,62 \cdot 0,0025 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \Delta H}. \end{cases}$$

Таким образом, имеется система трех нелинейных алгебраических уравнений для определения трех неизвестных: v_1, v_2 и ΔH .

Полученные уравнения решаем методом последовательных приближений. Сложив друг с другом первые два уравнения системы, получим:

$$5285 \cdot \lambda_1 v_1^2 + 2912,5 \cdot \lambda_2 v_2^2 = 542,1,$$

а из третьего уравнения -

$$v_1 - v_2 = 0,01785 \cdot \sqrt{\Delta H}.$$

Первое приближение. Сначала разность напоров ΔH в сечении утечки находим так, как если бы возникшая утечка не изменила режим течения в трубопроводе (см. решение предыдущей задачи): $\Delta H = 265,85$ м. Тогда

$$v_1 - v_2 = 0,291 \Rightarrow v_2 = v_1 - 0,291 \text{ м/с.}$$

$$5285 \cdot \lambda_1 v_1^2 + 2912,5 \cdot \lambda_2 (v_1 - 0,291)^2 = 542,1.$$

1) Положим $\lambda_1^{(1)} = \lambda_2^{(1)} = 0,02$. Тогда из квадратного уравнения $5285 \cdot 0,02 \cdot v_1^2 + 2912,5 \cdot 0,02 \cdot (v_1 - 0,291)^2 = 542,1$ или $3v_1^2 - 0,582 \cdot v_1 - 9,22 = 0$ находим: $v_1 \cong 1,853$ м/с. И далее: $v_2 \cong 1,562$ м/с. Проверяем, правильно ли выбраны λ_1 и λ_2 :

$$v_1 = 1,853; Re_1 = 1,853 \cdot 0,7 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 86473; \lambda_1 \cong 0,0185;$$

$$v_2 = 1,562; Re_2 = 1,562 \cdot 0,7 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 72893; \lambda_2 \cong 0,0193;$$

Полученные результаты говорят о том, что необходима коррекция.

2) Положим теперь $\lambda_1^{(2)} = 0,0185$, $\lambda_2^{(2)} = 0,0193$ Тогда из квадратного уравнения

$$5285 \cdot 0,0185 \cdot v_1^2 + 2912,5 \cdot 0,0193 \cdot (v_1 - 0,291)^2 = 542,1$$

или $3,043 \cdot v_1^2 - 0,607 \cdot v_1 - 9,973 = 0$ находим: $v_1 \cong 1,913$

м/с. И далее: $v_2 \cong 1,622$ м/с. Проверяем, правильно ли выбраны λ_1 и λ_2 :

$$v_1 = 1,913; Re_1 = 1,913 \cdot 0,7 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 89273; \lambda_1 \cong 0,0183;$$

$$v_1 = 1,622; Re_2 = 1,622 \cdot 0,7 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 75693; \lambda_2 \cong 0,0191.$$

Видим, что достигнута достаточная точность.

Итак, $v_1 = 1,913$ м/с, $v_1 = 1,622$ м/с.

Подставив полученный результат в исходную систему уравнений, получим:

$$\left(150 + \frac{4,5 \cdot 10^6}{870 \cdot 9,81}\right) - (50 + \Delta H) = 0,0183 \cdot \frac{80000}{0,7} \cdot \frac{1,913^2}{2 \cdot 9,81},$$

откуда найдем: $\Delta H \cong 237,2$ м. Этот результат меньше принятого $\Delta H = 265,85$ м. Найдем второе приближение.

Второе приближение. Полагаем $\Delta H \cong 237,2$ м. Тогда

$$v_1 - v_2 = 0,01785 \cdot \sqrt{237,2} \Rightarrow v_2 = v_1 - 0,275 \text{ м/с.}$$

$$5285 \cdot \lambda_1 v_1^2 + 2912,5 \cdot \lambda_2 (v_1 - 0,275)^2 = 542,1.$$

Положим $\lambda_1^{(1)} = 0,0183$, $\lambda_2^{(2)} = 0,0191$. Тогда из квадратного уравнения

$$5285 \cdot 0,0183 \cdot v_1^2 + 2912,5 \cdot 0,0191 \cdot (v_1 - 0,275)^2 = 542,1$$

или $3,043 \cdot v_1^2 - 0,574 \cdot v_1 - 9,982 = 0$ находим: $v_1 \cong 1,908$ м/с. И далее: $v_2 \cong 1,633$ м/с. Проверяем, правильно ли выбраны λ_1 и λ_2 :

$$v_1 = 1,908; Re_1 = 1,908 \cdot 0,7 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 89040; \lambda_1 \cong 0,0183;$$

$$v_1 = 1,633; Re_2 = 1,633 \cdot 0,7 / (15 \cdot 10^{-6}) \cong 76207; \lambda_2 \cong 0,0190.$$

Полученные результаты говорят о том, что имеется достаточная точность.

Итак, $v_1 - v_2 \cong 0,275$ м/с. Это означает, что расход q утечки равен: $S_0 \cdot (v_1 - v_2) = 3,14 \cdot 0,7^2 / 4 \cdot 0,275 \cong 0,1058 \text{ м}^3/\text{с.}$

За 6 часов из трубопровода вытечет: $0,1058 \cdot 6 \cdot 3600 \cong 2285 \text{ м}^3$, то есть более чем в 20 раз больше, чем в предыдущей задаче.

86. Чертеж к задаче представлен на рис. 2.5.

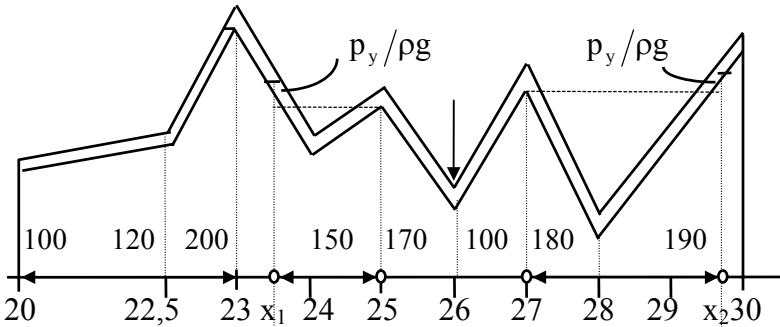


Рис. 2.5. К решению задачи № 86

Между сечениями $x = 23$ и $x = 24$ км находится сечение x , чья высота равна 170 м плюс вакуумметрическая высота h_b , соответствующая разрежению, возникающему в трубопроводе:

$$h_b = \frac{(0,1 - 0,03) \cdot 10^6}{730 \cdot 9,81} \cong 9,77 \text{ м.}$$

Для определения x_1 составляем пропорцию:

$$\frac{x_1 - 23}{24 - 23} = \frac{170 + 9,77 - 200}{730 \cdot 9,81} \Rightarrow x_1 = 23,405 \text{ км.}$$

Последнее означает, что между этими километрами опорожнилось 405 м трубы.

Между сечениями 28 и 30 км также имеется сечение x_2 , чья геодезическая высота равна 180 м плюс h_b . Для определения x_2 составляем пропорцию:

$$\frac{x_2 - 28}{30 - 28} = \frac{180 + 9,77 - 75}{190 - 75} \Rightarrow x_2 = 29,996 \text{ км.}$$

Это означает, здесь опорожнилось всего 4 м трубы.

Кроме того, опорожняются 2 км трубопровода от 25 до 27 км, т.е. 2000 м.

Таким образом, всего опорожнилось 2409 м. Объем $V_{\text{п}}$ образовавшейся полости

$$V_{\text{п}} = (3,14 \cdot 0,361^2 / 4) \cdot 2409 = 246,45 \text{ м}^3.$$

87. Если бы отвод к нефтебазе был заполнен полностью, то избыточное давление перед нефтебазой было бы не меньше давления, определяемого столбом жидкости между наивысшей точкой ($x = 1,5$ км) отвода и его концом, то есть

$$p_{\text{в}} \geq \rho g(z_{1,5} - z_6) = 735 \cdot 9,81 \cdot (180 - 50) \cong 0,937 \text{ МПа}.$$

Однако по условию задачи избыточное давление в конце отвода составило 0,45 МПа, что свидетельствует о наличии в отводе пустот, рис. 2.6.

Образовавшиеся в отводе пустоты заполнены парами бензина с давлением 70 кПа, то есть в них существует вакуум. Согласно формуле гидростатического распределения давления имеем (см. рис. 2.6):

$$p_{\text{к}} = 70000 + 735 \cdot 9,81 \cdot h_{\text{к}} = 98100 + 450000 \cdot h_{\text{к}}.$$

Отсюда находим: $h_{\text{к}} \cong 66,31$ м. Следовательно, уровень z_2 бензина в отводе имеет отметку $50 + 66,31 = 116,31$ м.

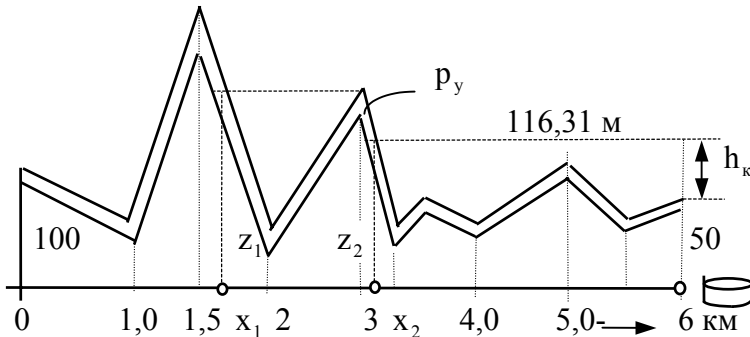


Рис. 2.6. К решению задачи № 87

Найдем соответствующую z_2 координату x_2 зеркала бензина в отводе. Для этого составим пропорцию:

$$\frac{x_2 - 3,0}{3,2 - 3,0} = \frac{116,31 - 150}{70 - 150} \Rightarrow x_2 \cong 3,084 \text{ км.}$$

Следовательно, здесь опорожнилось примерно 84 м трубы.

Кроме того, опорожнилась часть трубы на участке между сечениями 1,5 и 2,0 км. По закону сообщающихся сосудов $z_1 = 150$ м. Для определения соответствующей этой высоте координаты x_1 составляем пропорцию:

$$\frac{x_1 - 1,5}{2,0 - 1,5} = \frac{150 - 180}{70 - 180} \Rightarrow x_1 \cong 1,636 \text{ км.}$$

Следовательно, здесь опорожнилось примерно 136 м трубы.

Итого, за счет несанкционированного отбора топлива из отвода в нем опорожнилось $84 + 136 = 220$ м. Это составляет примерно $220 \cdot (3,14 \cdot 0,144^2 / 4) \cong 3,58 \text{ м}^3$.

88. Сначала находим гидравлический уклон i на рассматриваемом участке. Имеем:

$$H_n = 100 + 4,5 \cdot 10^6 / (840 \cdot 9,81) \cong 646,1 \text{ м,}$$

$$H_k = 60 + 0,3 \cdot 10^6 / (840 \cdot 9,81) \cong 96,4 \text{ м,}$$

$$i = (H_n - H_k) / L = (646,1 - 96,4) / 125000 \cong 4,4 \cdot 10^{-3}$$

или 4,4 м/км.

Затем рассчитываем напор H_* в месте аварии:

$$H_* = 646,1 - 4,4 \cdot 56 = 399,7 \text{ м,}$$

и противонапор $H_0 = z_* + p_{\text{атм}} / \rho g$:

$$H_0 = 180 + 101300 / (840 \cdot 9,81) \cong 192,3 \text{ м.}$$

Таким образом, на отверстии имеется перепад ΔH напоров, равный $399,7 - 192,3 = 207,4$ м.

По формуле (53) рассчитываем расход q утечки:

$$q = 0,62 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 207,4} = 1,582 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с.}$$

За 20 суток вытечет $1,582 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 20 = 273,37 \text{ м}^3$.

89. Чертеж к этой задаче представлен на рис. 2.7.

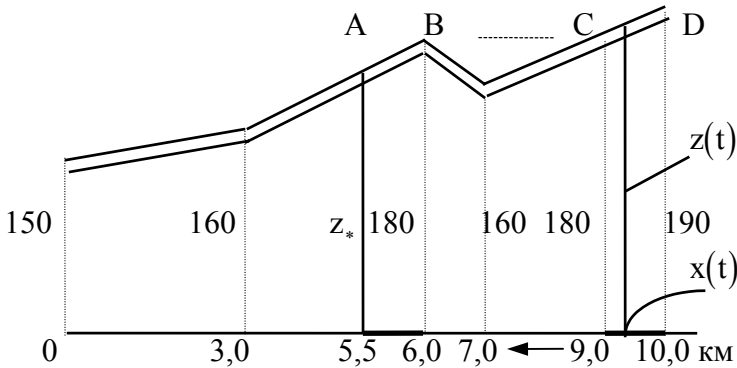


Рис. 2.7. К решению задачи № 89

Судя по профилю рассматриваемого трубопровода, топливо могло вытекать только из двух участков: 1) $5,5 \leq x \leq 6,0$ км и 2) $9,0 \leq x \leq 10,0$ км.

Высотная отметка z_* пробитого сечения находится линейной интерполяцией точек профиля:

$$\frac{z_* - 180}{160 - 180} = \frac{5,5 - 6,0}{3,0 - 6,0}, \text{ откуда } z_* \cong 176,7 \text{ м.}$$

Найдем сначала объем дизельного топлива, которое вытекло из трубопровода за первые 20 мин, в течение которых ПНУ еще работала. Расход q_1 через отверстие можно рассчитать по формуле (5.3):

$$q_1 = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{p_* - p_{\text{атм}}}{\rho g}},$$

в которой p_* – давление в месте аварии. Записав уравнение Бернулли для участка трубопровода между ПНУ и местом аварии, получим:

$$\left[150 + \frac{1,6 \cdot 10^6}{840 \cdot 9,81} \right] - \left[176,7 + \frac{p_* - p_{\text{атм}}}{\rho g} \right] = \lambda \cdot \frac{5,5 \cdot 10^3}{0,146} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81},$$

где $v = 4Q/\pi d^2 = 4 \cdot 80 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,146^2) \cong 1,328$ м/с. Поскольку число Рейнольдса $Re = 1,328 \cdot 0,146 / 6 \cdot 10^{-6} \cong 32315$, то коэффициент λ гидравлического сопротивления находится по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{32315}} \cong 0,0236.$$

Подставив значения λ и v в уравнение Бернулли, сначала найдем: $(p_* - p_{\text{атм}}) / \rho g \cong 87,55$ м, а затем и расход q_1 :

$$q_1 = 0,62 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,008^2}{4} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 87,55} \cong 0,00129 \text{ м}^3/\text{с}.$$

За 20 мин (или 1200 с) вытекло $1200 \cdot 0,00129 \cong 1,548$ м³ топлива.

Чтобы определить, как вытекало дизельное топливо после остановки ПНУ, используем ту же формулу (53), только в качестве движущего напора возьмем разность $z(t) - z_*$, где $z(t)$ – уровень жидкости на участке CD, а затем – на участке АВ. Имеем:

$$q_2 = \mu s \cdot \sqrt{2g \cdot [z(t) - z_*]} = -S \cdot \frac{dx}{dt} = -S \cdot \text{ctg} \alpha \cdot \frac{dz}{dt},$$

где $S = 3,14 \cdot 0,146^2 / 4 = 0,0167$ м² – площадь сечения трубопровода; $\text{ctg} \alpha = 1000 / (190 - 180) = 100$ – котангенс угла α наклона трубопровода на участке CD. В итоге получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\mu s \sqrt{2g}}{S \cdot \text{ctg} \alpha} \cdot \sqrt{z - z_*},$$

решение которого определяется интегралом

$$\int_{190}^{z(t)} \frac{dz}{\sqrt{z-z_*}} = -\frac{\mu s \sqrt{2g}}{S \cdot \text{ctg} \alpha} \cdot t.$$

Вычисляя интеграл в левой части этого равенства, получаем:

$$\sqrt{z(t)-z_*} - \sqrt{190-z_*} = -\frac{\mu s \sqrt{2g}}{2S \cdot \text{ctg} \alpha} \cdot t,$$

то есть зависимость $z = z(t)$. Подставляя в полученную зависимость $t = 3600 \cdot 6 = 2160$ с, $z_* = 176,7$ м, $\mu = 0,62$, $S = 0,0167$ м², $s = 5,024 \cdot 10^{-5}$ м², находим, что $z(2160) = 184,29$ м. Поскольку $184,29 > z(C) = 180$ м, то можно заключить, что зеркало опускающейся жидкости в трубопроводе не выходит за пределы участка CD.

Координата x зеркала находится из уравнения:

$$\frac{1000-x}{190-184,29} = \text{ctg} \alpha = 100.$$

Отсюда находим: $x = 9429$ м, то есть опорожнилось 571 м трубы на участке CD.

Объем опорожненной части трубопровода составляет: $0,0167 \cdot 571 = 9,5$ м³. Таким образом, из трубы вытекло: $1,54 + 9,54 = 11,08$ м³ топлива.

90. Профиль сегмента нефтепродуктопровода приведен на рис. 2.8. Сразу же после аварии в наивысшей точке профиля ($x = 20$ км) происходит разрыв сплошности столба жидкости и в вершине образуется вакуум (упругостью насыщенных паров керосина пренебрегаем). Воздух не может проникнуть в трубу через образовавшееся отверстие, поскольку на участке между 12 и 13 км имеется спуск.

Уравнение Бернулли, записанное для двух сечений нефтепродуктопровода: $x_1 = 12$ км и $x = x(t)$, с учетом условий

при $x_1 = 12$ км: $z_1 = 56$ м, $p_1 = 0,10$ МПа,

при $x = x(t)$: $z = z(t)$, $p = 0,0$ МПа

дает следующее уравнение:

$$\left(\frac{100000}{780 \cdot 9,81} + 56 \right) - [0 + z(t)] = \lambda \cdot \frac{x - 12000}{0,205} \cdot \frac{v \cdot |v|}{2 \cdot 9,81},$$

в котором v – скорость столба нефтепродукта ($v < 0$),
 $|v| = -v$.

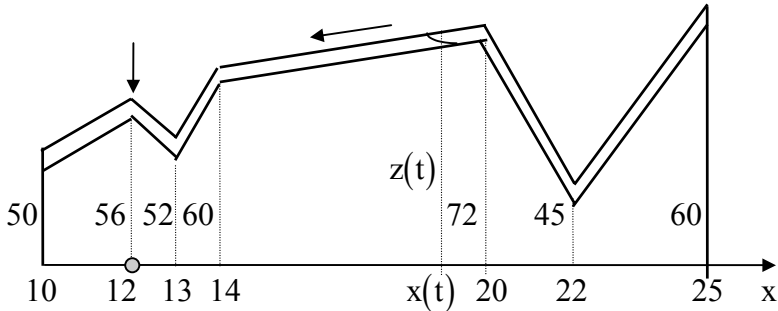


Рис. 2.8. К решению задачи № 90

Для того, чтобы определить высотную отметку $z(t)$, соответствующую свободной поверхности керосина в сечении $x(t)$ учитывается, что наклон трубопровода на участке между 14-м и 20-м километрами равен 0,002, вследствие чего уравнение его оси имеет вид:

$$z = 0,002 \cdot (x - 14000) + 60.$$

Исключив z из уравнения Бернулли для разности напоров, получим исходное расчетное уравнение:

$$\frac{0,008x - 147,87}{x - 12000} = \lambda \cdot v^2. \quad (*)$$

а. Сначала рассчитываем скорость жидкости в начальный момент времени, когда ее свободная поверхность находится в точке $x = 20000$ м. Из (*) следует, что $\lambda \cdot v^2 = 0,0015$, откуда методом последовательных прибли-

жений находим, что $v = 0,244$ м/с. Это означает, например, что за полчаса (1800 с) поверхность жидкости продвинется на $0,244 \cdot 1800 = 439$ м влево вдоль трубопровода и достигнет сечения $x = 20000 - 439 = 19561$ м.

б. Затем рассчитываем, как движется поверхность жидкости в следующие полчаса. Для этого определяем ее скорость при $t = 1800$ с и $x = 19561$ м. Из (*) следует, что $\lambda \cdot v^2 = 0,0011$, откуда тем же методом находим, что $v = 0,205$ м/с. Это означает, что за полчаса поверхность жидкости продвинется еще на $0,205 \cdot 1800 = 369$ м влево по трубопроводу и достигнет сечения $x = 19561 - 369 = 19192$ м.

Точно таким же образом рассчитывается движение свободной поверхности нефтепродукта в следующие получасовые интервалы времени. Результаты этих расчетов таковы:

$3600 < t < 5400$: $v = 0,168$ м/с; $\Delta x = 302,4$; $x = 18890$ м;

$5400 < t < 7200$: $v = 0,126$ м/с; $\Delta x = 226,8$; $x = 18663$ м.

Таким образом, за 2 часа истечения свободная поверхность нефтепродукта переместится влево от сечения 20 км примерно на 1337 м. Это означает, что из трубопровода вытечет

$$\frac{3,14 \cdot 0,205^2}{4} \cdot 1337 \approx 44 \text{ м}^3 \text{ керосина.}$$

2.7. Неустановившиеся режимы работы трубопроводов

91. Скорость c распространения волн давления в трубопроводе, полностью заполненном упругой жидкостью, находится по формуле (62) Н.Е. Жуковского:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0}{K} + \frac{\rho_0 d}{E \delta}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{880}{1,32 \cdot 10^9} + \frac{880 \cdot 0,7}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,01}}} \approx 1013 \text{ м/с.}$$

92. Согласно формуле (62) Н.Е. Жуковского имеем:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{730}{1,06 \cdot 10^9} + \frac{730 \cdot 0,514}{1,8 \cdot 10^{11} \cdot 0,008}}} \cong 1026 \text{ м/с.}$$

93. Согласно формуле (62) Н.Е. Жуковского имеем:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{780}{0,9 \cdot 10^9} + \frac{780 \cdot 0,024}{0,7 \cdot 10^{11} \cdot 0,003}}} \cong 1023 \text{ м/с.}$$

94. Сначала находим скорость v перекачки нефти:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 2200/3600}{3,14 \cdot (0,720 - 2 \cdot 0,1)^2} \cong 1,59 \text{ м/с.}$$

Затем по формуле (62) вычисляем скорость c распространения волн давления:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{875}{1,35 \cdot 10^9} + \frac{875 \cdot 0,7}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,01}}} \cong 1031,5 \text{ м/с.}$$

Наконец, по формуле (63) находим скачок Δp давления на фронте волны гидравлического удара:

$\Delta p = \rho_0 c \cdot \Delta v = 875 \cdot 1031,5 \cdot 1,59 \cong 1,435 \cdot 10^6 \text{ Па,}$
что составляет 1,435 МПа или $\approx 14,63 \text{ атм.}$

95. Определим сначала по формуле (62) скорость c распространения волн давления в трубопроводе. Имеем:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{840}{1,2 \cdot 10^9} + \frac{840 \cdot 0,311}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,007}}} \cong 1062 \text{ м/с.}$$

Затем найдем скорости v_0 и v_1 течения топлива до и после аварийного отключения насоса:

$$v_0 = \frac{4Q_0}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 350/3600}{3,14 \cdot (0,325 - 2 \cdot 0,007)^2} \cong 1,28 \text{ м/с,}$$

$$v_1 = \frac{4Q_1}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 220/3600}{3,14 \cdot 0,311^2} \cong 0,80 \text{ м/с.}$$

Наконец, по формуле (63) вычисляем скачок Δp давления на фронте волны гидравлического удара:

$$\Delta p = \rho_0 c \cdot \Delta v = 840 \cdot 1062 \cdot (1,28 - 0,80) \cong 0,428 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

96. Схема к решению данной задачи представлена на рис. 2.9.

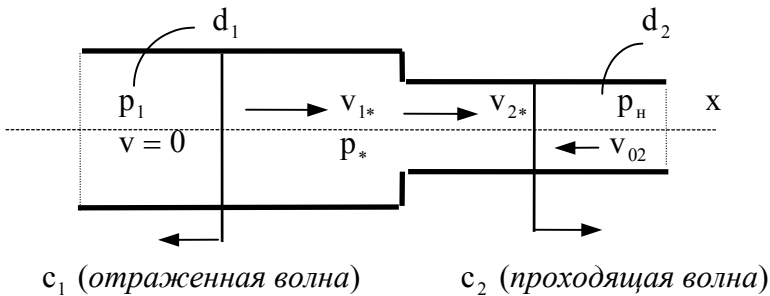


Рис. 2.9. К решению задачи № 96.

Обозначим через p_n первоначальное давление в еще невозмущенной области второй трубы, а через p_1 - давление за падающей на стык двух трубопроводов волны, так что $\Delta p_{пад} = p_1 - p_n$. Используя формулу (63) Н.Е. Жуковского, составляем несколько алгебраических уравнений, связывающих давления и скорости жидкости по разные стороны от ударных фронтов:

$$p_1 - p_n = \rho_0 c_1 \cdot v_{01},$$

$$p_1 - p_* = \rho_0 c_1 \cdot v_{1*},$$

$$p_* - p_n = \rho_0 c_2 \cdot (v_{2*} - v_{02}),$$

$$v_{02} \cdot \frac{\pi d_2^2}{4} = v_{01} \cdot \frac{\pi d_1^2}{4},$$

$$v_{2*} \cdot \frac{\pi d_2^2}{4} = v_{1*} \cdot \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

Здесь p_* – давление в области между отраженной и проходящей волнами; v_{1*}, v_{2*} – скорости жидкости в этой области в первой и второй трубах, соответственно; v_{01}, v_{02} – те же скорости в трубах до прихода падающей волны ($v_{01} < 0, v_{02} < 0$). Кроме того, $\Delta p_{\text{прох.}} = p_* - p_n$ и $\Delta p_{\text{от.}} = p_1 - p_*$.

Разрешив 5 полученных линейных уравнений относительно 5 неизвестных $p_*, v_{01}, v_{02}, v_{1*}$ и v_{2*} , получим искомые формулы:

$$\Delta p_{\text{прох.}} = \Delta p_{\text{пад.}} \cdot \frac{2 \cdot d_2^2 / c_2}{d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2},$$

$$\Delta p_{\text{от.}} = \Delta p_{\text{пад.}} \cdot \frac{d_2^2 / c_2 - d_1^2 / c_1}{d_1^2 / c_1 + d_2^2 / c_2}.$$

97. Решение этой задачи можно получить как частный случай формул, полученных при решении предыдущей задачи. Для этого достаточно положить $d_2 = 0$. Тогда $\Delta p_{\text{прох.}} = 0$, $\Delta p_{\text{от.}} = -\Delta p_{\text{пад.}}$. Отсюда следует, что отраженная от закрытого конца трубопровода волна давления удваивает свою амплитуду. Однако можно привести и независимое решение.

После входа волны гидравлического удара в тупиковое ответвление, в последнем генерируется течение жидкости

со скоростью $v = \Delta p / \rho_0 c$, где ρ_0 – плотность жидкости; c – скорость распространения волн давления.

Вслед за отражением волны от закрытого конца ответвления возникает волна остановки, фронт которой движется в обратном направлении - от закрытого конца к входу в ответвления, причем скорость жидкости за фронтом волны равна 0. Обозначив давление за фронтом волны, то есть у закрытого конца, через p_* , согласно (63), будем иметь:

$$p_* - \Delta p = -\rho_0 c \cdot (0 - \Delta p / \rho_0 c).$$

Знак минус здесь взят потому, что волна давления движется в отрицательном направлении.

Из полученного равенства имеем:

$$p_* - \Delta p = \Delta p \text{ или } p_* = 2 \cdot \Delta p.$$

98. Чертеж к решению этой задачи дан на рис. 2.10.

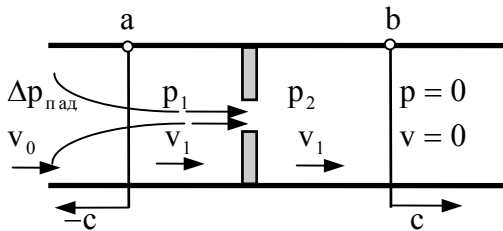


Рис. 2.10. К решению задачи № 98.

На этом рисунке: $\Delta p_{\text{пад}}$ – амплитуда падающей волны; v_0 – скорость потока жидкости, набегающего на местное сопротивление; v_1 – скорость жидкости между фронтами отраженной и проходящей волн; p_1, p_2 – давления до и после местного сопротивления.

Согласно (63), имеем следующие уравнения:

$$\Delta p_{\text{пад}} = \rho_0 c \cdot v_0, \quad p_2 = \rho_0 c \cdot (v_1 - 0),$$

$$p_1 - \Delta p_{\text{пад}} = -\rho_0 c(v_1 - v_0), p_1 - p_2 = \zeta \cdot \rho_0 v_1^2 / 2.$$

Из этих уравнений находим: $p_1 - \Delta p_{\text{пад}} = \Delta p_{\text{пад}} - \rho_0 c \cdot v_1$.

Используя третье уравнение, получаем: $p_1 = 2 \cdot \Delta p_{\text{пад}} - p_2$ или $p_1 + p_2 = 2 \cdot \Delta p_{\text{пад}}$.

Комбинируя последнее соотношение с остальными уравнениями, системы получаем квадратное уравнение для определения $v_1: 2 \cdot \Delta p_{\text{пад}} - 2\rho_0 c \cdot v_1 = \zeta \cdot \rho_0 v_1^2 / 2$, из которого находим:

$$\frac{v_1}{c} = -\frac{2}{\zeta} + \sqrt{\frac{4}{\zeta^2} + \frac{4 \cdot \Delta p_{\text{пад}}}{\zeta \cdot \rho_0 c^2}}, \text{ следовательно:}$$

$$\Delta p_{\text{пр.}} = \rho_0 c \cdot v_1 = \frac{2\rho_0 c^2}{\zeta} \left(\sqrt{1 + \frac{\zeta \cdot \Delta p_{\text{пад}}}{\rho_0 c^2}} - 1 \right);$$

$$\Delta p_{\text{от.}} = p_1 - \Delta p_{\text{пад}} = \Delta p_{\text{пад}} - \Delta p_{\text{пр.}}$$

99. Чертеж к решению этой задачи дан на рис. 2.11. Не нарушая общности можно считать первоначальные скорости жидкости в трубопроводе и обоих ответвлениях равными 0. Равным 0 можно принять также первоначальное давление в месте разветвления.

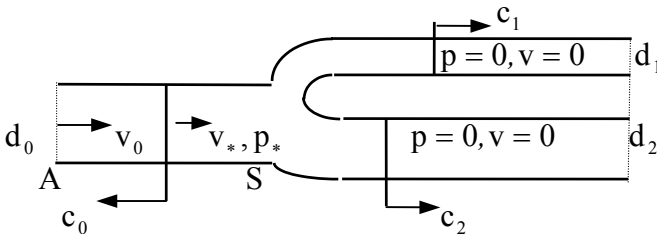


Рис. 2.11. К решению задачи № 99

Пусть в основной трубопровод AS начали закачивать жидкость со скоростью v_0 , тогда в нем возникает волна

гидравлического удара, амплитуда $\Delta p_{\text{пад}}$ которой связана со скоростью v_0 закачки формулой (63) Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p_{\text{пад}} = \rho_0 c_0 v_0,$$

где ρ_0 – невозмущенная плотность жидкости; c_0 – скорость волны. После падения этой волны на стык S труб в каждой из них возникает движение жидкости со скоростями v_1 и v_2 .

Если обозначить через p_* давление, устанавливающееся в узле S после прохождения волны гидравлического удара, а через v_* – скорость набегающего на узел S потока, то можно написать следующие соотношения:

$$\Delta p_1 = p_* - 0 = \rho_0 c_1 v_1,$$

$$\Delta p_2 = p_* - 0 = \rho_0 c_2 v_2,$$

$$v_* \cdot \frac{\pi d_0^2}{4} = v_1 \cdot \frac{\pi d_1^2}{4} + v_2 \cdot \frac{\pi d_2^2}{4},$$

где c_1, c_2 – скорости волн гидравлического удара в первой и второй трубах, соответственно. Отсюда видно, что $\Delta p_1 = \Delta p_2 = p_*$; $v_* \cdot d_0^2 = v_1 \cdot d_1^2 + v_2 \cdot d_2^2$.

Применим далее формулу (63) к волнам гидравлического удара, отраженной от места стыка трубопроводов и распространяющейся в обратном направлении со скоростью $(-c_0)$: $\Delta p_{\text{от}} = \Delta p_{\text{пад}} - p_* = -\rho_0 c_0 \cdot (v_0 - v_*)$.

Учитывая, что $\rho_0 c_0 v_0 = \Delta p_{\text{пад}}$, получаем:

$$v_* = 2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{пад}}}{\rho_0 c_0} - \frac{p_*}{\rho_0 c_0}.$$

Исключив из уравнения баланса расходов скорости v_1, v_2 и v_* с помощью остальных соотношений, получим

$$\left(2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{пад}}}{\rho_0 c_0} - \frac{p_*}{\rho_0 c_0} \right) \cdot d_0^2 = \frac{\Delta p_1}{\rho_0 c_1} \cdot d_1^2 + \frac{\Delta p_2}{\rho_0 c_2} \cdot d_2^2,$$

$$2\Delta p_{\text{пад}} \cdot \frac{d_0^2}{\rho_0 c_0} - p_* \cdot \frac{d_0^2}{\rho_0 c_0} = p_* \cdot \left(\frac{d_1^2}{\rho_0 c_1} + \frac{d_2^2}{\rho_0 c_2} \right)$$

или

$$p_* = 2\Delta p_{\text{пад}} \cdot \frac{d_0^2/c_0}{d_0^2/c_0 + d_1^2/c_1 + d_2^2/c_2}. \quad (*)$$

Это означает, что найдены значения $\Delta p_1 = \Delta p_2 = p_*$.

Далее вычисляем амплитуду $\Delta p_{\text{от.}}$ отраженной от стыка труб волны гидравлического удара:

$$\Delta p_{\text{от.}} = \Delta p_{\text{пад}} - p_* = \Delta p_{\text{пад}} - 2\Delta p_{\text{пад}} \cdot \frac{d_0^2/c_0}{d_0^2/c_0 + d_1^2/c_1 + d_2^2/c_2}$$

или

$$\Delta p_{\text{от.}} = \Delta p_{\text{пад}} \cdot \frac{d_1^2/c_1 + d_2^2/c_2 - d_0^2/c_0}{d_0^2/c_0 + d_1^2/c_1 + d_2^2/c_2}, \quad (**)$$

то есть решение задачи найдено полностью.

Попутно заметим, что если $d_0 = d_1 = d_2$ и $c_0 = c_1 = c_2$, то $\Delta p_1 = \Delta p_2 = 2/3 \cdot \Delta p_{\text{пад}}$ и $\Delta p_{\text{от.}} = 1/3 \cdot \Delta p_{\text{пад}}$.

100. Используем формулу, полученную при решении предыдущей задачи:

$$p_* = 2\Delta p_{\text{пад}} \cdot \frac{d_0^2/c_0}{d_0^2/c_0 + d_1^2/c_1 + d_2^2/c_2},$$

где $\Delta p_{\text{пад}}$ – амплитуда ударной волны, возникающей в отводе при его перекрытии; эта величина вычисляется по формуле (63) Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p_{\text{пад}} = \rho_0 c v_0 = 840 \cdot 10^3 \cdot \frac{4 \cdot 100}{3600 \cdot 3,14 \cdot (0,219 - 2 \cdot 0,006)} \cong 693692 \text{ Па.}$$

Подставляя в формулу для p_* исходные данные: $d_0 = 0,207$ м, $d_1 = d_2 = 0,325 - 2 \cdot 0,007 = 0,311$ м и учитывая условие $c_0 = c_1 = c_2$, получаем:

$$p_* = 2 \cdot 0,693692 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,207^2}{0,207^2 + 2 \cdot 0,311^2} \cong 0,252 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

то есть 0,252 МПа, что составляет $\approx 2,57$ атм.

101. Воспользуемся формулой для распределения амплитуд давления при набегании волны гидравлического удара на разветвление трубопровода, полученной при решении задачи № 99. Для амплитуды Δp волны давления, возбужденной в ответвлении ($d_1 = 0,207$ м) эта формула дает:

$$\Delta p = 2 \cdot 0,8 \cdot \frac{0,514^2}{0,514^2 + 0,514^2 + 0,207^2} \cong 0,74 \text{ МПа}.$$

Эта волна движется к концу тупикового ответвления и, отражаясь от закрытого конца, удваивает свою амплитуду (см. решение задачи № 97): $\Delta p_{max} = 2 \cdot 0,74 = 1,46$ МПа.

Таким образом, максимальное повышение давления у закрытого конца ответвления составляет 1,46 МПа ($\approx 14,9$ атм.), что представляет собой существенную опасность для целостности трубопровода.

102. Очевидно, что давление p_- до задвижки возрастает, а давление p_+ после нее убывает. Вычислим эти изменения.

Скорость c распространения волн давления в трубопроводе находится по формуле (62):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{735}{10^9} + \frac{735 \cdot 0,361}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,008}}} \cong 1054 \text{ м/с}.$$

Скорость v перекачки находится через расход:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 600/3600}{3,14 \cdot 0,361^2} \cong 1,629 \text{ м/с}.$$

Амплитуда Δp волны гидравлического удара рассчитывается по формуле (62) Н.Е. Жуковского

$$\Delta p = \rho_0 c v = 735 \cdot 1054 \cdot 1,629 \cong 1,262 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Отсюда следует, что давление до задвижки повысится на $\delta p_- = 1,262$ МПа и станет равным $0,5 + 1,262 = 1,762$ МПа, то есть ≈ 18 атм.

Однако давление p_+ после задвижки не может снизиться на $1,262$ МПа, поскольку при снижении давления до значения $p_y = 70$ кПа бензин вскипает и в трубопроводе возникает парогазовая полость. Следовательно, давление после задвижки снизится всего на $\delta p_+ = 0,5 - 0,07 = 0,43$ МПа и станет равным 70 кПа, то есть в трубе образуется вакуум $\cong 0,29$ атм.

103. Если кран мгновенно открыть, то первоначально покоившаяся жидкость придет в движение, причем влево (вверх по потоку) будет распространяться волна разгрузки, а вправо (вниз по потоку) - волна сжатия. Скорость c этих волн определяется формулой (62):

$$c = \frac{1}{\sqrt{1,3 \cdot 10^9 + \frac{870 \cdot 0,311}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,007}}} \cong 1077 \text{ м/с.}$$

Обозначим через p_* и v_* значения давления и скорости течения нефти, соответственно, которые установятся в сечении крана сразу же вслед за его открытием. Имеют место следующие уравнения:

$$p_l - p_* = -\rho_0 c \cdot (0 - v_*),$$

$$p_* - p_p = \rho_0 c \cdot (v_* - 0),$$

где p_l, p_p - значения давлений в левой и правой полостях нефтепровода, соответственно. Сложив эти равенства почленно, получим:

$$v_* = \frac{p_l - p_p}{2\rho_0 c}.$$

Отсюда находим:

$$v_* = \frac{(2,0 - 0,2) \cdot 10^6}{2 \cdot 870 \cdot 1077} \cong 0,96 \text{ м/с.}$$

Следовательно, расход Q , который установится в месте расположения крана сразу же после открытия последнего, составит:

$$Q = 0,96 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,311^2}{4} 3600 = 262,4 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

104. Решение этой задачи основывается на использовании формулы, полученной при решении задачи № 99 о распаде волны давления в месте разветвлении трубопровода.

При открытии отвода жидкость мгновенно приобретает скорость v :

$$v = \frac{4 \cdot 80 / 3600}{3,14 \cdot 0,146^2} \cong 1,328 \text{ м/с.},$$

вызывающую скачок давления $\Delta p = -\rho_0 v \cdot c_0$, где c_0 – скорость распространения волны давления:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{735}{10^9} + \frac{735 \cdot 0,146}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,005}}} \cong 1090 \text{ м/с.}$$

Отсюда $\Delta p = -735 \cdot 1,328 \cdot 1090 \cong 1,064 \text{ МПа.}$

Волна разгрузки, вызванная истечением жидкости через отвод, доходит до основной магистрали и вызывает в ней две новые волны разгрузки с амплитудами $\Delta p_1 = \Delta p_2$, распространяющиеся вверх и вниз по потоку. Согласно решению задачи № 99, амплитуды этих волн рассчитываются по формуле

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = -2 \cdot \Delta p \cdot \frac{d_0^2 / c_0}{d_0^2 / c_0 + 2 \cdot d^2 / c}, \quad (*)$$

где $\Delta p = 1,064 \text{ МПа}$ – амплитуда падающей волны; d_0 – внутренний диаметр отвода ($d_0 = 0146 \text{ м}$); d – внутренний

диаметр трубопровода ($d = 0,313$ м); $c_0 = 1090$ м/с; c – скорость волны давления в основной магистрали.:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{735}{10^9} + \frac{735 \cdot 0,313}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,006}}} \cong 1039 \text{ м/с.}$$

Подставив в формулу (*) численные значения величин, получим:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = -2 \cdot 1,064 \cdot \frac{0,146^2 / 1090}{0,146^2 / 1090 + 2 \cdot 0,313^2 / 1039} \cong -0,2 \text{ МПа.}$$

Таким образом, мгновенное открытие отвода приводит к возникновению в основной магистрали двух волн разгрузки с амплитудами 0,2 МПа, распространяющихся вверх и вниз по потоку от места врезки отвода. Та из волн, которая движется по направлению к последующей перекачивающей станции и достигает ее примерно за $5000/1039 \cong 4,8$ с, не успевает затухнуть и снижает давление в линии всасывания насосов станции на 0,2 МПа, то есть до значения 0,2 МПа. По условию задачи, кавитационный запас насосов составляет 40 м или $40 \cdot 735 \cdot 9,81 \cong 0,288 \cdot 10^6$ Па, что выше того значения (0,2 МПа), до которого может упасть давление в линии всасывания. Следовательно, мгновенное включение отвода с указанным расходом ($80 \text{ м}^3/\text{ч}$) отбора представляет опасность нормальному функционированию участка. Возможный выход - уменьшить расход отбора путем частичного прикрытия входной задвижки на нефтебазе или открывать эту задвижку достаточно медленно.

105. Скорость v жидкости за фронтом волны давления равна Q/S , а амплитуда волны определяется формулой (63):

$$\Delta p = \rho_0 c v = \rho_0 c \cdot Q/S,$$

в которой Q – расход жидкости; S – площадь поперечного сечения трубопровода; c – скорость распространения волны давления.

После отражения волны от резервуара она движется в обратном направлении со скоростью $-c$, давление *за* ней остается первоначальным, а скорость w жидкости неизвестна. Согласно той же формуле (63) Н.Е. Жуковского,

$$-\Delta p = -\rho_0 c \cdot (w - v).$$

Учитывая, что $\Delta p = \rho_0 c v$, получаем:

$$w = 2 \cdot v,$$

то есть расход истечения сразу же после отражения волны станет равным $2Q$.

106. Умножая второе уравнение системы на c и складывая результат с первым уравнением, получаем:

$$\left[\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + c \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right] + \rho_0 c \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial x} \right] = 0.$$

Аналогично, умножая второе уравнение системы на c и вычитая результат из первого уравнения, получаем:

$$\left[\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} - c \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right] - \rho_0 c \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial t} - c \frac{\partial v}{\partial x} \right] = 0.$$

Если учесть формулы дифференцирования *по направлению* на плоскости переменных (x, t) :

$$\frac{\partial(\quad)}{\partial t} + c \frac{\partial(\quad)}{\partial x} = \frac{d}{dt}(\quad) \text{ вдоль направления } \frac{dx}{dt} = +c,$$

$$\frac{\partial(\quad)}{\partial t} - c \frac{\partial(\quad)}{\partial x} = \frac{d}{dt}(\quad) \text{ вдоль направления } \frac{dx}{dt} = -c,$$

то первое из полученных уравнений

$$\left[\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + c \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right] + \rho_0 c \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial x} \right] = \frac{d}{dt}(\hat{p} + \rho_0 c \cdot v) = 0$$

можно трактовать как равенство 0 производной по направлению $dx/dt = +c$ на плоскости переменных (x, t) или *вдоль*

линии $x = c \cdot t + \text{const.}$ Последнее означает, что комбинация $I_1 = \hat{p} + \rho_0 c \cdot v$ неизвестных функций \hat{p} и v сохраняется *вдоль* прямых линий $x - ct = \text{const.}$ на плоскости (x, t) .

Аналогично второе уравнение

$$\left[\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} - c \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right] - \rho_0 c \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial t} - c \frac{\partial v}{\partial x} \right] = \frac{d}{dt} (\hat{p} - \rho_0 c \cdot v) = 0$$

можно трактовать как равенство 0 производной по направлению $dx/dt = -c$ на плоскости переменных (x, t) или *вдоль* линии $x = -c \cdot t + \text{const.}$ Последнее означает, что комбинация $I_2 = \hat{p} - \rho_0 c \cdot v$ неизвестных функций \hat{p} и v сохраняется *вдоль* прямых линий $x + ct = \text{const.}$ на плоскости (x, t) .

Таким образом,

если $\eta = x - ct = \text{const.}$, то $I_1 = \hat{p}(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t) = \text{const.}$,

если $\xi = x + ct = \text{const.}$, то $I_2 = \hat{p}(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t) = \text{const.}$

Прямые $x - ct = \text{const.}$ и $x + ct = \text{const.}$ называются *характеристиками* системы (64) дифференциальных уравнений с частными производными, а величины $I_1(x, t)$ и $I_2(x, t)$ - инвариантами Римана.

107. Из решения предыдущей задачи (№ 106) следует, что плоскость переменных (x, t) можно покрыть двумя семействами параллельных прямых: одно из них - прямые положительного наклона $x - ct = \text{const.}$, вдоль них сумма $I_1 = \hat{p}(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t)$ остается постоянной; другое - прямые отрицательного наклона $x + ct = \text{const.}$, вдоль них остается постоянной сумма: $I_2 = \hat{p}(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t)$.

На рис. 2.12. изображены линии $x - ct = \text{const.}$ и линии $x + ct = \text{const.}$, проходящие через точку $M(x, t)$ и пересекающие ось x (то есть прямую $t = 0$) в точках $A(x_1, 0)$ и $B(x_2, 0)$.

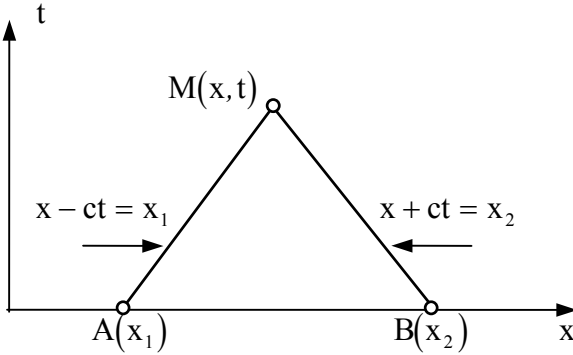


Рис. 2.12. К решению задачи № 107

Уравнения этих прямых таковы: МА: $x - c \cdot t = x_1$ и МВ: $x + c \cdot t = x_2$. Таким образом, справедливы следующие равенства:

$$\begin{cases} p_M + \rho_0 c \cdot v_M = p_A + \rho_0 c \cdot v_A, \\ p_M - \rho_0 c \cdot v_M = p_B - \rho_0 c \cdot v_B, \\ p(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t) = p(x_1, 0) + \rho_0 c \cdot v(x_1, 0), \\ p(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t) = p(x_2, 0) - \rho_0 c \cdot v(x_2, 0). \end{cases}$$

Отсюда получаем:

$$\begin{cases} p(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t) = p(x - ct, 0) + \rho_0 c \cdot v(x - ct, 0), \\ p(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t) = p(x + ct, 0) - \rho_0 c \cdot v(x + ct, 0) \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} p(x, t) + \rho_0 c \cdot v(x, t) = \varphi(x - ct) + \rho_0 c \cdot \psi(x - ct), \\ p(x, t) - \rho_0 c \cdot v(x, t) = \varphi(x + ct) - \rho_0 c \cdot \psi(x + ct). \end{cases}$$

Складывая и вычитая эти уравнения, получаем выражение для давления $\hat{p}(x, t)$ и скорости $v(x, t)$ в точке М (x, t):

$$\hat{p}(x,t) = \frac{1}{2} \cdot [\varphi(x-ct) + \varphi(x+ct)] + \frac{\rho_0 c}{2} \cdot [\psi(x-ct) - \psi(x+ct)],$$

$$v(x,t) = \frac{1}{2\rho_0 c} \cdot [\varphi(x-ct) - \varphi(x+ct)] + \frac{1}{2} \cdot [\psi(x-ct) + \psi(x+ct)].$$

Эти формулы полностью определяют течение, возникающее в бесконечном трубопроводе из начального состояния. Формулы, как уже было сказано, называются формулами Даламбера.

108. Рассмотрим плоскость переменных (x, t) рис. 2.13. Через начало координат проведем прямую $x = ct$, отделяю-

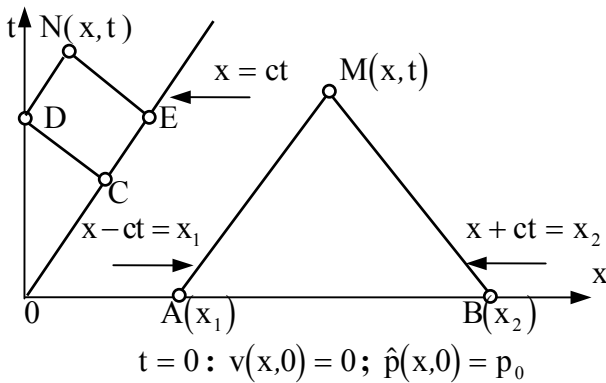


Рис. 2.13. К решению задачи № 108

щую *возмущенную* область $(0 < x < ct)$ трубопровода, то есть область, захваченную возмущением, связанным с началом закачки жидкости через сечение $x = 0$, от невозмущенной области $(x > ct)$, в которой жидкость еще покоится. В любой точке $M(x, t)$ невозмущенной области $v = 0, \hat{p} = p_0$: Действительно, согласно формулам Даламбера (см. решение задачи № 107), получаем:

$$\hat{p}_M(x,t) = \frac{\hat{p}_A + \hat{p}_B}{2} + \rho_0 c \frac{v_A - v_B}{2} = \frac{p_0 + p_0}{2} + \rho_0 c \frac{0 - 0}{2} = p_0,$$

$$v_M(x,t) = \frac{\hat{p}_A - \hat{p}_B}{2\rho_0 c} + \frac{v_A + v_B}{2} = \frac{p_0 - p_0}{2\rho_0 c} + \rho_0 c \frac{0 - 0}{2} = 0.$$

Следовательно, при $x > ct$: $v = 0, \hat{p} = p_0$.

Теперь обратимся к возмущенной области трубопровода $0 < x < ct$. Вдоль прямой CD, имеющей наклон $-c$, имеет место равенства

$$\hat{p}_D - \rho_0 c \cdot v_D = \hat{p}_C - \rho_0 c \cdot v_C = p_0 - \rho_0 c \cdot 0 = p_0.$$

Поскольку величина $v_D = v(0,t) = \psi(t)$ известна по условию задачи, то находим: $\hat{p}_D = \hat{p}(0,t) = p_0 + \rho_0 c \cdot \psi(t)$. Таким образом, давления и скорости в начальном сечении трубопровода известны.

Найдем теперь давление и скорость течения в произвольной точке N(x,t) возмущенной области. Имеем:

$$\hat{p}_N(x,t) = \frac{\hat{p}_D + \hat{p}_E}{2} + \rho_0 c \frac{v_D - v_E}{2},$$

$$v_N(x,t) = \frac{\hat{p}_D - \hat{p}_E}{2\rho_0 c} + \frac{v_D + v_E}{2}.$$

Поскольку $\hat{p}_E = p_0, v_E = 0, \hat{p}_D = p_0 + \rho_0 c \cdot v_D$, то

$$\hat{p}_N(x,t) = \frac{p_0 + \rho_0 c \cdot v_D + \hat{p}_0}{2} + \rho_0 c \frac{v_D - 0}{2},$$

$$v_N(x,t) = \frac{p_0 + \rho_0 c \cdot v_D - \hat{p}_0}{2\rho_0 c} + \frac{v_D + 0}{2}$$

или $\hat{p}_N(x,t) = p_0 + \rho_0 c \cdot v_D, v(x,t) = v_D$.

Заметим далее, что момент времени, к которому относится точка D, равен $t - x/c$, где t – момент времени, в который ищется решение, поэтому:

$$\hat{p}_N(x,t) = p_0 + \rho_0 c \cdot v_D = p_0 + \rho_0 c \cdot v(0, t - x/c) = p_0 + \rho_0 c \cdot \psi(t - x/c).$$

$$v(x,t) = v_D = v(0, t - x/c) = \psi(t - x/c).$$

Полученное решение показывает, что возмущение скорости распространяется в виде бегущей волны вправо по трубопроводу от начального сечения со скоростью c , вызывая при этом бегущую волну давления, превышающего первоначальное его значение p_0 на величину $\rho_0 c v_D$, где v_D – скорость закачки, в начальном сечении трубопровода.

109. Значения скорости v_ϕ и давления p_ϕ за фронтом волны связаны со значениями тех же параметров до фронта волны формулой Н.Е. Жуковского

$$p_\phi - p_0 = \rho_0 c \cdot (v_0 - v_\phi). \quad (*)$$

Помимо этого, состояние за фронтом волны удовлетворяет условию на характеристике $dx/dt = -c$ дифференциальных уравнений (64) движения жидкости (см. решение задачи № 106):

$$\frac{d}{dt}(p_\phi - \rho_0 c \cdot v_\phi) = \lambda_\phi \frac{c}{d} \cdot \frac{\rho_0 v_\phi^2}{2}. \quad (**)$$

Наконец, в невозмущенном потоке до волны имеет место уравнение

$$\frac{dp}{dx} = -\lambda_0 \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_0 v_0^2}{2}$$

или, если брать производную по времени в точках перед фронтом волны:

$$-c \frac{dp_0}{dx} = \frac{dp_0}{dt} = -\lambda_0 \frac{c}{d} \cdot \frac{\rho_0 v_0^2}{2}. \quad (***)$$

Комбинируя уравнения (*), (**) и (***) , получаем уравнения для определения скорости v_ϕ :

$$\frac{dv_\phi}{dt} = \frac{\lambda_0 v_0^2 - \lambda_\phi v_\phi^2}{4d}.$$

Учитывая условия задачи $\lambda_0 v_0 = \lambda_\phi v_\phi$, имеем:

$$\frac{dv_{\phi}}{dt} = \frac{\lambda_0 v_0^2}{4d} \left(1 - \frac{v_{\phi}}{v_0} \right),$$

откуда, принимая во внимание начальное условие $v_{\phi} = 0$ при $t = 0$, находим:

$$v_{\phi}(t) = v_0 [1 - \exp(-\lambda_0 v_0 t / 4d)]$$

или

$$v_0 - v_{\phi} = v_0 \cdot \exp(-\lambda_0 v_0 t / 4d).$$

Амплитуда волны есть $p(t) - p_0 = \rho_0 c \cdot (v_0 - v_{\phi})$, поэтому

$$\Delta p(t) = \rho_0 c v_0 \cdot \exp(-\lambda_0 v_0 t / 4d) = \Delta p_0 \cdot \exp(-\lambda_0 v_0 t / 4d).$$

110. Рассчитаем сначала исходный, невозмущенный, режим движения жидкости в трубопроводе. Для этого составим уравнение баланса напоров

$$h_n + (565 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2) = h_k + \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где h_n, h_k – напоры перед насосом и в конце трубопровода; L – длина трубопровода; $d = D - 2\delta$ – его внутренний диаметр; Q – расход перекачки; v – средняя скорость. В терминах скорости это уравнение имеет вид:

$$565 - 59,54 \cdot v^2 = 8194 \cdot \lambda \cdot v^2.$$

Решая его методом итераций (последовательных приближений), находим: $\lambda_0 = 0,0214$, $v = 1,55$ м/с. Эта скорость соответствует расходу $Q_0 = 423,7$ м³/ч. Из $(Q - H)$ – характеристики насоса находим соответствующий напор H_0 :

$$H_0 = 30 + (565 - 0,797 \cdot 10^{-3} \cdot 423,7^2) = 451,9 \text{ м.}$$

Наконец, определяем давление p_0 в начале трубопровода: $p_0 = \rho_0 g H_0 = 840 \cdot 9,81 \cdot 451,9 = 3,724$ МПа.

Скорость c распространения волн давления в трубопроводе находится из первой формулы (62) Н.Е. Жуковского:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{840}{1,32 \cdot 10^9} + \frac{840 \cdot 0,311}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,007}}} \cong 1102 \text{ м/с.}$$

Следовательно, волна пониженного давления дойдет до станции за $35000/1102 \cong 31,8$ с.

Чтобы определить амплитуду распространяющейся волны, нужно найти ее начальное значение Δp_0 , определяемое разностью давлений в месте аварии *до* и *после* нее. Давление p_* в месте аварии было $p_* = \rho_0 g H_*$, где H_* – напор в месте аварии. Имеем:

$$H_* = H_0 - \lambda_0 \frac{L_*}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2g} = 451,9 - 0,0214 \cdot \frac{35000}{0,311} \cdot \frac{1,55^2}{2 \cdot 9,81} \cong 157 \text{ м.}$$

$$p_* = \rho_0 g H_* = 840 \cdot 9,81 \cdot 157 \cong 1,294 \text{ МПа.}$$

Если принять атмосферное давление $\approx 0,1$ МПа, то разрыв трубопровода вызвал возникновение скачка разряжения величиной $p_* - p_{\text{атм.}} = 1,194$ МПа.

По мере движения волны разряжения к насосной станции скачок давления затухает и его амплитуда определяется формулой

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \cdot \exp(-\lambda_0 v_0 t / 4d),$$

см. решение задачи № 109. Подставив в эту формулу числовые данные, получим, что через 31,8 с скачок давления станет равным:

$$\Delta p(t=31,8\text{с}) = 1,194 \cdot \exp[-0,0214 \cdot 1,55 \cdot 31,8 / (4 \cdot 0,311)] \cong 0,51 \text{ МПа.}$$

По второй формуле (63) Н.Е. Жуковского можно определить, на сколько возрастает скорость жидкости непосредственно *за* фронтом волны. Обозначив это возрастание через Δv , получим:

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{\rho_0 c} = \frac{0,51 \cdot 10^6}{840 \cdot 1102} \cong 0,55 \text{ м/с.}$$

Таким образом, в момент прихода волны на насосную станцию скорость v_ϕ течения за фронтом волны станет равной $1,55 + 0,55 = 2,1$ м/с, а давление: $p_\phi = (3,724 - 0,51) = 3,214$ МПа.

Обозначим через p_1 и v_1 давление и скорость жидкости на входе насосной станции после того, как волна разрежения отразится от нее и пойдет в обратном направлении. Тогда, с одной стороны, эти величины удовлетворяют условию на (Q – H) – характеристике станции:

$$1. \frac{p_1}{\rho_0 g} - 30 = 565 - 59,54 \cdot v_1^2,$$

а с другой - условию на фронте волны: $p_1 - p_\phi = \rho_0 c \cdot (v_1 - v_\phi)$, которое можно записать так:

$$2. \frac{p_1}{\rho_0 g} - \frac{p_\phi}{\rho_0 g} = \frac{c}{g} \cdot (v_1 - v_\phi).$$

Получаем систему 2-х уравнений для определения p_1 и v_1 .

$$\begin{cases} \frac{p_1}{\rho_0 g} = 595 - 59,54, \\ \frac{p_1}{\rho_0 g} = 112,33 \cdot v_1 + 154,1. \end{cases}$$

Исключив из этой системы $p_1/\rho_0 g$, получим квадратное уравнение для определения скорости v_1 :

$$59,54 \cdot v_1^2 + 112,33 \cdot v_1 - 440,9 = 0.$$

Отсюда находим, что $v_1 = 1,94$ м/с ($Q = 530$ м³/ч).

Из первого уравнения системы находим давление p_1 :

$$p_1 = \rho_0 g \cdot (595 - 59,54 \cdot v_1^2) = 840 \cdot 9,81 \cdot (595 - 59,54 \cdot 1,94^2) \cong 3,056 \text{ МПа.}$$

Таким образом, давление на станции упадет с 3,724 до 3,056 МПа, то есть уменьшится на 0,668 МПа, а расход увеличится с 423,7 до 530 м³/ч, то есть на 106,3 м³/ч.

111. Поскольку интерес представляют моменты времени, далекие от начального, то используем уравнения (68) с представлением (69) скорости через градиент давления

$$\frac{\partial \bar{p}(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{p}(x,t)}{\partial x^2}, \quad (*)$$

где $a^2 = c^2/b$ – постоянный коэффициент. При этом скорость $v(x,t)$ течения определяется выражением:

$$v(x,t) = -1/b\rho_0 \cdot \partial p(x,t)/\partial x. \quad (**)$$

Дифференцируя уравнение (*) по x и учитывая выражение (**), находим, что скорость $v(x,t)$ течения также удовлетворяет уравнению типа теплопроводности:

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2}. \quad (***)$$

Сначала оценим коэффициент b , для чего определим начальную v_n и конечную v_k скорости течения жидкости:

$$v_n = \frac{4Q_0}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 2200/3600}{3,14 \cdot 0,704^2} \cong 1,57 \text{ м/с,}$$

$$v_k = \frac{4Q_0}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1600/3600}{3,14 \cdot 0,704^2} \cong 1,14 \text{ м/с.}$$

Соответственно этому вычисляем коэффициенты $\lambda_0 = \lambda_n$ и $\lambda_1 = \lambda_k$ гидравлического сопротивления, убедившись предварительно, что течение происходит в режиме *гладкого* трения:

$$Re_n = \frac{1,57 \cdot 0,704}{25 \cdot 10^{-6}} \cong 44211, \lambda_n = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{44211}} \cong 0,0218;$$

$$Re_k = \frac{1,14 \cdot 0,704}{25 \cdot 10^{-6}} \cong 32100, \lambda_k = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{32100}} \cong 0,0236.$$

Можно также вычислить скорость c распространения волн давления в трубопроводе:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{900}{1,3 \cdot 10^9} + \frac{900 \cdot 0,704}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,008}}} \cong 959 \text{ м/с.}$$

После этого можно рассчитать параметры b и a линеаризации:

$$b_n = \frac{\lambda_n v_n}{2d} = \frac{0,0218 \cdot 1,57}{2 \cdot 0,704} \cong 0,0243 \text{ с}^{-1},$$

$$b_k = \frac{\lambda_k v_k}{2d} = \frac{0,0218 \cdot 1,14}{2 \cdot 0,704} \cong 0,0177 \text{ с}^{-1},$$

$$b = 0,5 \cdot (b_n + b_k) = 0,5 \cdot (0,0243 + 0,0177) = 0,021 \text{ с}^{-1}.$$

$$a = c/\sqrt{b} = 959/\sqrt{0,021} \cong 0,66 \cdot 10^4 \text{ м}/\sqrt{\text{с}}.$$

Обратимся теперь к решению уравнения. Поскольку участок трубопровода имеет длину 200 км, то волна возмущения достигнет сечения $x = 75$ км примерно за 75 с, а отраженная от конца участка она вернется в это сечение не ранее, чем через 250 с, при этом $75 + 250 = 325 > 300$ с. Эта оценка дает основание рассматривать нестационарный процесс на участке $0 < x < 75000$ трубопровода в течение первых 5 мин как происходящий в полубесконечном трубопроводе, то есть в трубопроводе, неограниченно простирающемся вправо от начального сечения. Отсюда решение уравнения (***) ищем при следующих начальных и краевых условиях:

$$v(x, 0) = v_n, \quad v(0, t) = v_k, \quad v(\infty, t) = v_n.$$

Аналогично формуле (72) находим:

$$v(x, t) = v_n + (v_k - v_n) \cdot \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x/2a\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}} e^{-\zeta^2} d\zeta \right],$$

или в терминах расходов:

$$Q(x,t) = Q_n + (Q_k - Q_n) \cdot \operatorname{erfc}(x/2a\sqrt{t}),$$

где $\operatorname{erfc}Z = 1 - 2/\sqrt{\pi} \cdot \int_0^Z e^{-\zeta^2} d\zeta$ - так называемая функция *эрфикс*, выражающаяся через *интеграл ошибок*, часто встречающийся в математической статистике; для этой функции имеются специальные таблицы.

Итак, имеем:

$$Q(x,t) = 2200 + (1600 - 2200) \cdot \operatorname{erfc}(x/2a\sqrt{t}).$$

Для сечения $x = 75000$ м находим:

$$Q(t) = 2200 - 600 \cdot \operatorname{erfc}\left[75000 / (2 \cdot 0,66 \cdot 10^4 \sqrt{t})\right] \text{ или}$$

$$Q(t) = 2200 - 600 \cdot \operatorname{erfc}(5,68/\sqrt{t}).$$

Полагая последовательно $t = 120, 180, 240, \dots, 900$ и 1200 с, находим (см. таблицы специальных функций):

$t, \text{ с}$	$\operatorname{erfc}(5,68/\sqrt{t})$	$Q(t), \text{ м}^3/\text{ч}$
120	0,46	1924
180	0,54	1876
240	0,60	1840
300	0,64	1816
600	0,74	1756
900	0,80	1720
1200	0,84	1696

Таким образом, $Q(5\text{мин}) = 1816 \text{ м}^3/\text{ч}$.

112. Поскольку интерес представляют моменты времени, достаточно удаленные от начального ($t \geq L/c = 100$ с), то для расчета давления можно использовать уравнение (68)

$$\frac{\partial \bar{p}(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{p}(x,t)}{\partial x^2}.$$

Это уравнение нужно решать в области $x > 0$. Если же под $\hat{p}(x, t)$ понимать *отклонение* давления от начального распределения, то начальное условие для рассматриваемого уравнения следует принять в виде: $\hat{p}(x, 0) = 0$. Кроме того, нужно использовать краевое условие (то есть условие при $x = 0, t > 0$), отражающая понижение давления $\Delta p_0 = -0,7$ МПа в начальном сечении трубопровода. Тогда решение такой задачи имеем вид:

$$\hat{p}(x, t) = \Delta p_0 \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2a\sqrt{t}} e^{-\zeta^2} d\zeta \right) = \Delta p_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right).$$

где $\operatorname{erfc}Z = 1 - 2/\sqrt{\pi} \cdot \int_0^Z e^{-\zeta^2} d\zeta$ - функция, так называемый *эрффикс*, выражающаяся через *интеграл ошибок*, встречающийся в математической статистике. Для этой функции составлены специальные таблицы.

Подставляя в полученное решение исходные данные $\Delta p_0 = -0,7$ МПа и $\hat{p}(10^5, t) = -0,25$ при $x = 10^5$ м, имеем уравнение: $-0,25 = -0,7 \cdot \operatorname{erfc}(10^5/2a\sqrt{t})$ для определения искомого момента t времени. Однако для решения этого уравнения необходимо вычислить значения коэффициента a , см. формулы (67)–(69).

Сначала определяем скорость v_n течения жидкости:

$$v_n = \frac{4 \cdot 600 / 3600}{3,14 \cdot 0,361^2} \cong 1,63 \text{ м/с.}$$

Затем находим соответствующее ей значение коэффициента λ_n гидравлического сопротивления:

$$Re_n = \frac{1,63 \cdot 0,361}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 65380, \lambda_n = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{65380}} \cong 0,0198.$$

Рассчитываем скорость c распространения волн давления в трубопроводе:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{840}{1,1 \cdot 10^9} + \frac{840 \cdot 0,361}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,008}}} \cong 1024 \text{ м/с.}$$

После этого вычисляем коэффициент b :

$$b = \frac{\lambda_n v_n}{2d} = \frac{0,0198 \cdot 1,63}{2 \cdot 0,361} \cong 0,0447.$$

И, наконец, учитывая, что скорость v_n течения изменяется незначительно, находим значение коэффициента a :

$$a = \sqrt{1024^2 / 0,0447} \cong 0,484 \cdot 10^4 \text{ м}/\sqrt{\text{с}}.$$

После этого имеем:

$$-0,25 = -0,7 \cdot \operatorname{erfc}\left[10^5 / (2 \cdot 0,484 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{t})\right],$$

откуда, используя таблицы значений функции $\operatorname{erfc}Z$, находим, что $t \cong 250$ с.

2.8. Последовательная перекачка нефтепродуктов

115. Плотность ρ_c смеси находится по формуле (74)

$$\rho_c = \rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2,$$

в которой концентрации $c_1 = 30/100 = 0,3$ и $c_2 = 70/100 = 0,7$.

Таким образом:

$$\rho_c = 735 \cdot 0,3 + 840 \cdot 0,7 = 808,5 \text{ кг/м}^3.$$

116. Объем V_k керосина в смеси равен $400/\rho_1$ м³, объем V_d дизельного топлива - $100/\rho_2$ м³. Объем V_c их смеси находится как сумма этих величин:

$$V_c = V_k + V_d = 400/780 + 100/835 \cong 0,633 \text{ м}^3.$$

Плотность ρ_c смеси равна ее массе ($400 + 100 = 500$ кг), деленной на объем V_c :

$$\rho_c = 500/0,633 \cong 790 \text{ кг/м}^3.$$

117. Вычисляем сначала массу M смеси:

$$M = 0,4 \cdot 780 + (0,5 - 0,4) \cdot 840 = 396 \text{ кг}.$$

Затем находим плотность ρ_c смеси:

$$\rho_c = 396/0,5 = 792 \text{ кг/м}^3.$$

118. Согласно формуле (75) имеем:

$$c_1 = \frac{810 - 840}{735 - 840} \cong 0,29 \text{ и } c_2 = \frac{810 - 735}{840 - 735} \cong 0,71.$$

119. Согласно формуле (75) имеем:

$$c_1 = \frac{750 - 730}{780 - 730} \cong 0,4.$$

120. Концентрация c дизельного топлива в смеси находится по формуле (75):

$$c = \frac{780 - 735}{840 - 735} \cong 0,429.$$

Это означает, в 150 м^3 смеси содержится $150 \cdot 0,429 = 64,35 \text{ м}^3$ дизельного топлива. Следовательно, концентрация θ дизельного топлива в резервуаре с бензином после добавления в него смеси определяется равенством:

$$\theta = \frac{64,35}{8000 + 150} \cong 0,0079 \text{ или } 0,79 \text{ \%}.$$

121. Обозначим искомый объем смеси через V_c и определим концентрацию c бензина в смеси:

$$c = \frac{800 - 840}{730 - 840} \cong 0,364.$$

После этого найдем, сколько бензина содержится в объеме V_c смеси. Очевидно, что это количество представляется выражением $0,364 \cdot V_c$. Поскольку далее известно, что концентрация бензина в резервуаре не должна превысить $0,2 \text{ \%}$, составим неравенство

$$\frac{0,364 \cdot V_c}{12000 + V_c} \leq 0,002 \Rightarrow V_c \leq 66,3 \text{ м}^3.$$

122. Обозначим максимально возможный объем смеси, который можно добавить в резервуар с бензином, через V_c . Концентрация C дизельного топлива в смеси находится по формуле (75):

$$c = \frac{780 - 730}{835 - 730} \cong 0,476.$$

После этого найдем, сколько дизельного топлива содержится в объеме V_c смеси. Очевидно, что это количество представляется выражением $0,476 \cdot V_c$. Поскольку далее известно, что концентрация дизельного топлива в резервуаре не должна превысить 0,12 %, составим неравенство

$$\frac{0,476 \cdot V_c}{17000 + V_c} \leq 0,0012 \Rightarrow V_c \leq 43,0 \text{ м}^3.$$

Ответ. 43 м³.

123. Предельно допустимая концентрация $\theta_{\text{д/б}}$ рассчитывается по формуле (76):

$$\theta_{\text{д/б}} = \frac{(185 - 180) \cdot (185 + 180 - 248)}{28 \cdot (840 - 753)} \cong 0,24 \text{ \%}.$$

124. Предельно допустимая концентрация $\theta_{\text{б/д}}$ рассчитывается по формуле (77):

$$\theta_{\text{б/д}} = \frac{11,37}{45 + 55} \cdot \lg \frac{45}{40} \cdot 100 \cong 0,58 \text{ \%}.$$

125. Сначала определяем предельно допустимую концентрацию $\theta_{\text{д/б}}$ дизельного топлива в бензине:

$$\theta_{\text{д/б}} = \frac{(185 - 181) \cdot (185 + 181 - 248)}{28 \cdot (835 - 753)} \cong 0,206 \text{ \%}.$$

Затем вычисляем концентрацию C дизельного топлива в смеси:

$$c = \frac{760 - 730}{835 - 730} \cong 0,286.$$

После этого, обозначив добавляемый объем смеси через V_c , составляем неравенство:

$$\frac{0,286 \cdot V_c}{8000 + V_c} \leq 0,00206 \Rightarrow V_c \leq 58,0 \text{ м}^3.$$

Следовательно, максимальный объем смеси бензина с дизельным топливом, который можно добавить в резервуар с бензином, составляет 58 м^3 .

126. Сначала определяем предельно допустимую концентрацию $\theta_{\text{б/д}}$ бензина в дизельном топливе:

$$\theta_{\text{б/д}} = \frac{11,37}{68 + 55} \cdot \lg \frac{68}{62} \cdot 100 \cong 0,37 \text{ \%}.$$

Затем вычисляем концентрацию C бензина в смеси:

$$c = \frac{805 - 840}{730 - 840} \cong 0,318.$$

После этого, обозначив добавляемый объем смеси через V_c , составляем неравенство:

$$\frac{0,318 \cdot V_c}{10000 + V_c} \leq 0,0037 \Rightarrow V_c \leq 212 \text{ м}^3.$$

Следовательно, максимальный объем смеси бензина с дизельным топливом, который можно добавить в резервуар с дизельным топливом, составляет 212 м^3 .

127. Объем V_c смеси в симметричных пределах концентрации (от 1 до 99 %) рассчитывается по формуле (82), поэтому найдем сначала коэффициенты $\lambda_{\text{б}}$ и $\lambda_{\text{д}}$ гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам перекачки бензина и дизельного топлива, соответственно. Имеем:

$$Q = 1100 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,25}{514} \cong 0,0005; \quad v = \frac{4 \cdot 1100/3600}{3,14 \cdot 0,514^2} \cong 1,47 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,47 \cdot 0,514}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 1259300, \quad \lambda_B = 0,11 \cdot 0,0005^{0,25} \cong 0,0164,$$

$$Re_D = \frac{1,47 \cdot 0,514}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 83953,$$

$$\lambda_D = 0,11 \cdot (0,0005 + 68/83953)^{0,25} \cong 0,0209,$$

$$V = 750000 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2 / 4 \cong 155545 \text{ м}^3,$$

$$(0,514/750000)^{0,43} \cong 2,236 \cdot 10^{-3},$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0164^{1,8} + 0,0209^{1,8}) \cdot 2,236 \cdot 10^{-3} \cdot 155545 \cong 542 \text{ м}^3.$$

128. Объем V_c смеси в симметричных пределах концентрации (от 1 до 99 %) рассчитывается по формуле (82), поэтому найдем сначала коэффициенты λ_B и λ_D гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам перекачки бензина и дизельного топлива, соответственно. Имеем:

$$Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,377 - 2 \cdot 0,007 = 0,361 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,19}{361} \cong 0,00053; \quad v = \frac{4 \cdot 500/3600}{3,14 \cdot 0,361^2} \cong 1,358 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,358 \cdot 0,361}{0,8 \cdot 10^{-6}} \cong 612798, \quad \lambda_B = 0,11 \cdot 0,00053^{0,25} \cong 0,0167,$$

$$Re_D = \frac{1,358 \cdot 0,361}{10 \cdot 10^{-6}} \cong 49024,$$

$$\lambda_D = 0,11 \cdot (0,00053 + 68/49024)^{0,25} \cong 0,0230,$$

$$V = 420000 \cdot 3,14 \cdot 0,361^2 / 4 \cong 42967 \text{ м}^3,$$

$$(0,361/420000)^{0,43} \cong 2,465 \cdot 10^{-3},$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0167^{1,8} + 0,023^{1,8}) \cdot 2,465 \cdot 10^{-3} \cdot 42967 \cong 186 \text{ м}^3.$$

129. Объем V_c смеси в симметричных пределах концентрации (от 1 до 99 %) рассчитывается по формуле (82),

поэтому найдем сначала коэффициенты λ_B и λ_D гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам перекачки бензина и дизельного топлива, соответственно. Имеем:

$$Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,325 - 2 \cdot 0,007 = 0,311 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{311} \cong 0,0006; \quad v = \frac{4 \cdot 400/3600}{3,14 \cdot 0,311^2} \cong 1,463 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,463 \cdot 0,311}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 758320, \quad \lambda_B = 0,11 \cdot 0,0006^{0,25} \cong 0,0172,$$

$$Re_D = \frac{1,463 \cdot 0,311}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 50555,$$

$$\lambda_D = 0,11 \cdot (0,0006 + 68/50555)^{0,25} \cong 0,0231,$$

$$V = 650000 \cdot 3,14 \cdot 0,311^2/4 \cong 49352 \text{ м}^3,$$

$$(0,311/650000)^{0,43} \cong 1,916 \cdot 10^{-3},$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0172^{1,8} + 0,0231^{1,8}) \cdot 1,916 \cdot 10^{-3} \cdot 49352 \cong 170 \text{ м}^3.$$

130. Отношение объемов смеси в *новом* и *старом* режимах равно $(\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8})_{\text{нов}} / (\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8})_{\text{ст}}$, поэтому вычисляем сначала коэффициенты гидравлического сопротивления в этих режимах. В старом режиме имеем:

$$Q = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 1,607 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 1376663, \quad \lambda_B \cong 0,0159,$$

$$Re_D \cong 103250, \quad \lambda_D \cong 0,0198,$$

$$\kappa_{\text{ст}} = (0,0159^{1,8} + 0,0198^{1,8}) = 1,4378 \cdot 10^{-3}.$$

В *новом* режиме имеем:

$$Q = 800 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 1,0715 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 917918, \quad \lambda_B \cong 0,0161,$$

$$Re_D \cong 68844, \quad \lambda_D \cong 0,0212,$$

$$\kappa_{\text{нов}} = (0,0161^{1,8} + 0,0212^{1,8}) = 1,5634 \cdot 10^{-3}.$$

Отношение объемов смеси составляет:

$$\kappa_{\text{нов.}}/\kappa_{\text{ст.}} = (1,5634 \cdot 10^{-3}) / (1,4378 \cdot 10^{-3}) \cong 1,087,$$

то есть объем смеси увеличится примерно на 8,7 % независимо от протяженности нефтепродуктопровода.

131. Отношение объемов смеси в *новом* и *старом* режимах равно $(\lambda_{\text{Б}}^{1,8} + \lambda_{\text{Д}}^{1,8})_{\text{нов.}} / (\lambda_{\text{Б}}^{1,8} + \lambda_{\text{Д}}^{1,8})_{\text{ст.}}$, поэтому вычисляем сначала коэффициенты гидравлического сопротивления в этих режимах. В старом режиме имеем:

$$Q = 140 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 0,512 \text{ м/с},$$

$$Re_{\text{Б}} \cong 199040, \quad \lambda_{\text{Б}} \cong 0,0168,$$

$$Re_{\text{Д}} \cong 19904, \quad \lambda_{\text{Д}} \cong 0,0270,$$

$$\kappa_{\text{ст.}} = (0,0168^{1,8} + 0,027^{1,8}) = 2,1403 \cdot 10^{-3}.$$

В новом режиме имеем:

$$Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 1,0976 \text{ м/с},$$

$$Re_{\text{Б}} \cong 426676, \quad \lambda_{\text{Б}} \cong 0,0151,$$

$$Re_{\text{Д}} \cong 42668, \quad \lambda_{\text{Д}} \cong 0,0226,$$

$$\kappa_{\text{нов.}} = (0,0151^{1,8} + 0,0226^{1,8}) = 1,617 \cdot 10^{-3}.$$

Отношение объемов смеси составляет:

$$\kappa_{\text{нов.}}/\kappa_{\text{ст.}} = (1,617 \cdot 10^{-3}) / (2,1403 \cdot 10^{-3}) \cong 0,756,$$

то есть объем смеси уменьшится примерно в 1,324 раза независимо от протяженности нефтепродуктопровода.

132. Объем смеси в трубопроводе с переменным диаметром находится по формуле (83), имеющей для данного случая вид:

$$V_{\text{с}} = (V_{\text{с1}}^{1/0,57} + V_{\text{с2}}^{1/0,57})^{0,57},$$

поэтому найдем объемы $V_{\text{с1}}$ и $V_{\text{с2}}$ смеси для каждого из участков трубопровода, имеющих постоянный диаметр.

$$1) \quad Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 0,815 \text{ м/с},$$

$$Re_{\text{Б}} \cong 490107, \quad \lambda_{\text{Б}} \cong 0,0149,$$

$$Re_{\text{Д}} \cong 36777, \quad \lambda_{\text{Д}} \cong 0,0234,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0149^{1,8} + 0,0234^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,361}{3 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 30691 \cong 146,4 \text{ м}^3.$$

$$2) Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 1,0836 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 565267, \lambda_B \cong 0,0147,$$

$$Re_D \cong 42396, \lambda_D \cong 0,0227,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0147^{1,8} + 0,0227^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,313}{2 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 15381 \cong 78,5 \text{ м}^3.$$

Теперь можно вычислить общий объем V_c смеси:

$$V_c = (146,4^{1/0,57} + 78,5^{1/0,57})^{0,57} \cong 173 \text{ м}^3.$$

133. Объем смеси в трубопроводе с переменным диаметром находится по формуле (83), имеющей для данного случая вид:

$$V_c = (V_{c1}^{1/0,57} + V_{c2}^{1/0,57} + V_{c3}^{1/0,57})^{0,57},$$

поэтому найдем объемы V_{c1} , V_{c2} и V_{c3} смеси для каждого из участков трубопровода, имеющих постоянный диаметр.

$$1) Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 0,536 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 459173, \lambda_B \cong 0,0150,$$

$$Re_D \cong 68876, \lambda_D \cong 0,0204,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0150^{1,8} + 0,0204^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,514}{3 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 62218 \cong 294,5 \text{ м}^3.$$

$$2) Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 1,086 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 653476, \lambda_B \cong 0,0145,$$

$$Re_D \cong 98011, \lambda_D \cong 0,0190,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0145^{1,8} + 0,0190^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,361}{2 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 20460 \cong 89,3 \text{ м}^3.$$

$$3) Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 1,463 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 758322, \lambda_B \cong 0,0144,$$

$$Re_D \cong 113748, \lambda_D \cong 0,0185,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0144^{1,8} + 0,0185^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,311}{2,5 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 18981 \cong 68,2 \text{ м}^3.$$

Теперь можно вычислить общий объем V_c смеси:

$$V_c = (294,5^{1/0,57} + 89,3^{1/0,57} + 68,2^{1/0,57})^{0,57} \cong 327 \text{ м}^3.$$

134. Для того чтобы учесть влияние первичной технологической смеси на общий объем V_c образующейся смеси, увеличим длину трубопровода на некоторую величину L_ϕ такую, чтобы при тех же условиях перекачки, но с мгновенной сменой нефтепродукта на станции, в нем образовалось 75 м^3 смеси на расстоянии L_ϕ от начала трубопровода. Для этого составим уравнение:

$$75 = 10^3 \cdot (\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L_\phi} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \cdot L_\phi \right).$$

Для его решения вычислим λ_B и λ_D . Имеем:

$$v = \frac{4 \cdot (1100/3600)}{3,14 \cdot 0,516^2} \cong 1,462 \text{ м/с},$$

$$Re_B = 1257320, \quad Re_D = 188598,$$

$\lambda_B = 0,0159$, $\lambda_D = 0,0182$ и далее:

$$75 = 10^3 \cdot (0,0159^{1,8} + 0,0182^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,516}{L_\phi} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,516^2}{4} \cdot L_\phi \right).$$

Решив это уравнение, найдем: $L_\phi \cong 30853 \text{ м}$.

Будем теперь считать, что рассматриваемый нефтепродуктопровод имеет протяженность не 250 км , а $250 + 30,853 = 280,853 \text{ км}$. Рассчитаем объем V_c образующейся смеси:

$$V_c = 10^3 \cdot (\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L + L_\phi} \right)^{0,43} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot (L + L_\phi),$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0159^{1,8} + 0,0182^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,516}{280853} \right)^{0,43} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,516^2}{4} \cdot 280853,$$

откуда находим: $V_c \cong 264 \text{ м}^3$.

135. Сначала вычисляем объем V_c смеси, образующейся в одном контакте партий бензина и дизельного топлива:

$$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}, d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,3}{514} \cong 0,00058; v = \frac{4 \cdot 1000/3600}{3,14 \cdot 0,514^2} \cong 1,34 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,34 \cdot 0,514}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 1147396, \lambda_B \cong 0,0175,$$

$$Re_D = \frac{1,34 \cdot 0,514}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 76529, \lambda_D \cong 0,0215,$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0175^{1,8} + 0,0215^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,514}{7,5 \cdot 10^5} \right)^{0,43} 155545 \cong 586 \text{ м}^3.$$

При запасе качества 3⁰С соотношения между минимально допустимыми объемами партий бензина и дизельного топлива и объемом смеси даются формулами (85):

$$V_{пБ} = 100 \cdot V_c \text{ и } V_{пД} = 85 \cdot V_c,$$

следовательно, $V_{пБ} = 58600 \text{ м}^3$, $V_{пД} = 49810 \text{ м}^3$.

Годовое число N циклов перекачки рассчитываем по формуле (86). Поскольку на конец трубопровода приходит 2,0 млн. т бензина и 4,0 млн. т дизельного топлива, то имеем:

$$N = \min \left\{ \frac{2 \cdot 10^9 / 735}{58600}, \frac{4 \cdot 10^9 / 840}{49810} \right\} = \{46,4; 95,6\} = 46.$$

Таким образом, перекачку можно вести с 46-ю циклами в год.

Вместимость резервуарного парка ГПС рассчитываем по формуле (87):

$$W_{ГПС} = \frac{1,2}{46} \cdot \left[\frac{2,5 \cdot 10^9 / 735}{0,82} \cdot \left(1 - \frac{2,5 \cdot 10^9 / 735}{8760 \cdot 1000} \right) + \frac{5 \cdot 10^9 / 840}{0,82} \cdot \left(1 - \frac{5 \cdot 10^9 / 735}{8760 \cdot 1000} \right) \right] \cong 127000 \text{ м}^3.$$

136. Если бы запас качества бензина по температуре конца кипения был бы равен не 3, а 6 °С, то предельно допустимая концентрация дизельного топлива в бензине была бы больше. В соответствии с формулой (76) находим:

$$\theta_{д/б} = \frac{(195-189) \cdot (195+189-248)}{2800 \cdot (840-753)} \cong 0,00335,$$

а соотношение между минимально допустимым объемом партии бензина и объемом образующейся смеси было бы таково (84):

$$V_{пб} = \frac{0,171}{\theta_{д/б}} \cdot V_c = \frac{0,171}{0,00335} \cdot V_c \approx 51 \cdot V_c.$$

Поскольку, см. решение задачи №135, объем V_c смеси, образующейся в рассматриваемом трубопроводе равен 586 м³, то минимальный объем $V_{пб}$ партии бензина, допустимый к перекачке, равен $51 \cdot 586 = 29886$ м³, а объем $V_{пб}$ партии дизельного топлива остается прежним - 49810 м³.

Годовое число N циклов перекачки находится в соответствии с формулой (86):

$$N = \min \left\{ \frac{2 \cdot 10^9 / 735}{29886}, \frac{4 \cdot 10^9 / 840}{49810} \right\} = \{91,0; 95,6\} = 91.$$

Отсюда можно найти вместимость резервуарного парка на ГПС, уменьшив ее в $46/91 = 0,505$ раз:

$$W_{ГПС} = 127 \cdot 0,505 \approx 64,2 \text{ тыс. м}^3.$$

137. Сначала определяем объем V_c смеси, образующейся в одном контакте перекачиваемых бензинов:

$$Q = 280 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,273 - 2 \cdot 0,006 = 0,261 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,15}{261} \cong 0,00057; \quad v = \frac{4 \cdot 280 / 3600}{3,14 \cdot 0,261^2} \cong 1,454 \text{ м/с},$$

$$Re = \frac{1,454 \cdot 0,261}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 632490, \quad \lambda_B \cong 0,0177,$$

$$V_c = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,0177^{1,8} \cdot \left(\frac{0,261}{180000} \right)^{0,43} \cdot 9625,5 \cong 41,7 \text{ м}^3.$$

Затем определяем предельно допустимую концентрацию θ бензина А 76 в бензине Аи-92. Если c - концентрация бензина А 76 в смеси, то ее октановое число n определяется формулой

$$n = 87 - c \cdot (87 - 76) = 87 - 11 \cdot c.$$

При $c = \theta$ октановое число $n = 87 - 0,1 = 86,9$, следовательно $86,9 = 87 - 11 \cdot \theta$ или $\theta = 0,0091$,

то есть предельно допустимая концентрация бензина А 76 в бензине Аи-92 равна 0,0091 или 0,91 %.

Далее находим:

$$V_{\text{пАи-92}} = \frac{0,171}{0,0091} \cdot 41,7 \approx 784 \text{ м}^3, \quad N = \frac{10^8/735}{784} \cong 173.$$

138. Имеем:

$$Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,377 - 2 \cdot 0,008 = 0,361 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{361} \cong 0,00055; \quad v = \frac{4 \cdot 500/3600}{3,14 \cdot 0,361^2} \cong 1,358 \text{ м/с},$$

$$Re = \frac{1,358 \cdot 0,361}{5 \cdot 10^{-6}} \cong 98048, \quad \lambda_d \cong 0,0207.$$

Гидравлический уклон i находится по формуле

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0207 \cdot \frac{1}{0,361} \cdot \frac{1,358^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00539$$

или 5,39 м/км.

Если бы по трубопроводу перекачивали бензин, то

$$Re = \frac{1,358 \cdot 0,361}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 817063, \quad \lambda_b \cong 0,0174.$$

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0174 \cdot \frac{1}{0,361} \cdot \frac{1,358^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00453$$

или 4,53 м/км.

139. Очевидны следующие параметры процесса:

$$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,25}{514} \cong 0,00049; \quad v = \frac{4 \cdot 1000 / 3600}{3,14 \cdot 0,514^2} \cong 1,34 \text{ м/с}.$$

Сначала находим гидравлические уклоны i_1 и i_2 на первой и второй половинах участка. Имеем:

$$1) \quad Re_{\text{д}} = \frac{1,34 \cdot 0,514}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 76529, \quad \lambda_{\text{д}} \cong 0,0212,$$

$$i_{\text{д}} = \lambda_{\text{д}} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0212 \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{1,34^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00378.$$

$$2) \quad Re_{\text{б}} = \frac{1,34 \cdot 0,514}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 1147933, \quad \lambda_{\text{б}} \cong 0,0168,$$

$$i_{\text{б}} = \lambda_{\text{б}} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0168 \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{1,34^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00299.$$

Затем рассчитываем изменение напора по длине участка. От начального значения 450 м он линейно уменьшается до середины участка на $60000 \cdot i_1 = 226,5$ м, то есть ее величина H_* со стороны дизельного топлива становится равной 223,5 м, рис. 2.14.

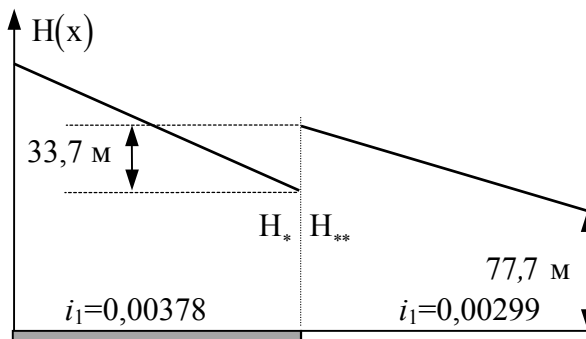


Рис. 2.14. К решению задачи № 140

Находим давление p_* в месте контакта нефтепродуктов (длиной области смеси в соответствии с условием задачи пренебрегаем): $p_* = \rho_d g H_* = 840 \cdot 9,81 \cdot 223,5 \cong 1,842 \cdot 10^6$ Па. Тогда напор H_{**} в месте контакта нефтепродуктов, вычисленный со стороны бензина, составит:

$$H_{**} = \frac{p_*}{\rho_B g} = \frac{1,842 \cdot 10^6}{730 \cdot 9,81} \cong 257,2 \text{ м,}$$

то есть напор в месте контакта дизельного топлива и бензина испытывает скачкообразное увеличение на величину

$$H_{**} - H_* = 257,2 - 223,5 = 33,7 \text{ м.}$$

От места контакта и до конца участка напор опять линейно убывает, а его значение в конце участка определяется равенством $257,2 - 60000 \cdot 0,00299 \cong 77,7$ м, см. рисунок.

140. Сначала находим гидравлический уклон i в области, занятой бензином. Имеем:

$$Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,377 - 2 \cdot 0,007 = 0,363 \text{ м,}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{363} \cong 0,00055; \quad v = \frac{4 \cdot 500/3600}{3,14 \cdot 0,363^2} \cong 1,34 \text{ м/с,}$$

$$Re = \frac{1,34 \cdot 0,363}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 810700, \quad \lambda_B \cong 0,0175.$$

Гидравлический уклон i находится по формуле:

$$i_B = \lambda_B \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0175 \cdot \frac{1}{0,363} \cdot \frac{1,34^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,004412.$$

Далее вычисляем потери Δh напора на первых 30 км трубопровода:

$$\Delta h = 30000 \cdot 0,004412 \cong 132,4 \text{ м.}$$

Находим напор H_* и давление p_* в месте контакта нефтепродуктов, рассчитанные по бензину:

$$H_* = H_0 - \Delta h = \frac{p_0}{\rho_B g} - \Delta h = \frac{4,5 \cdot 10^6}{730 \cdot 9,81} - 132,4 \cong 496 \text{ м;}$$

$$p_* = \rho_B g H_* = 730 \cdot 9,81 \cdot 496 \cong 3,552 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Теперь можно вычислить напор H_{**} со стороны дизельного топлива: $H_{**} = \frac{p_*}{\rho_{дг}} = \frac{3,552 \cdot 10^6}{845 \cdot 9,81} \cong 428,5 \text{ м}$, то есть напор в месте контакта бензина и дизельного топлива испытывает скачкообразное уменьшение на величину

$$H_* - H_{**} = 496 - 428,5 = 67,5 \text{ м.}$$

2.9. Перекачка высоковязких нефтей и нефтепродуктов с подогревом

141. Полагая в формуле (89) Рейнольдса-Филонова $T_1 = 20^0\text{C}$ и $v_1 = 40$ сСт, получаем:

$$v = 40 \cdot e^{-\kappa(T-20)} \text{ сСт.}$$

Определяем вторую константу в этой формуле. Полагая $T = 70^0\text{C}$ и $v = 5,3$ сСт, получаем уравнение:

$$5,3 = 40 \cdot e^{-\kappa(70-20)},$$

откуда находим:

$$\kappa = -\frac{1}{50} \ln \frac{5,3}{40} \cong 0,04 \text{ 1/}^0\text{C}.$$

Следовательно, для нефти данного месторождения формула Рейнольдса-Филонова приобретает вид:

$$v = 40 \cdot e^{-0,04(T-20)} \text{ сСт.}$$

Теперь можно найти вязкости нефти при температурах 40 и 50 ^0C . Имеем:

$$v(40) = 40 \cdot e^{-0,04(40-20)} \cong 17,97 \text{ сСт,}$$

$$v(50) = 40 \cdot e^{-0,04(50-20)} \cong 12,05 \text{ сСт.}$$

142. Полагая в формуле (89) Рейнольдса-Филонова $T_1 = 10^0\text{C}$ и $v_1 = 213,4$ сСт, получаем:

$$v = 213,4 \cdot e^{-\kappa(T-10)} \text{ сСт.}$$

Используя еще одно условие задачи, получаем уравнение для определения κ :

$$21,34 = 213,4 \cdot e^{-\kappa(20-10)},$$

из которого находим: $\kappa = -0,1 \cdot \ln 0,1 \cong 0,23$.

Наконец, подставляя значение κ , равное 0,23, в формулу (89), получаем уравнение для определения температуры T , при которой вязкость нефти снижается в 100 раз:

$$2,134 = 213,4 \cdot e^{-0,23(T-10)}.$$

Отсюда находим, $T = 10 - \ln 0,01 / 0,23 \cong 30^{\circ}\text{C}$.

143. Полагая в формуле (89) Рейнольдса-Филонова $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$ и $v_1 = 7$ сСт, получаем:

$$v = 7 \cdot e^{-\kappa(T-30)} \text{ сСт.}$$

Используя второе условие задачи, получаем:

$$350 = 7 \cdot e^{-\kappa(20-30)}.$$

Отсюда находим, что $\kappa = 0,391$.

Учитывая, что $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с} = 100$ сСт, имеем неравенство:

$$v = 7 \cdot e^{-0,391(T-30)} < 100,$$

из которого находим: $T \geq 23,2^{\circ}\text{C}$.

144. Секундную потребность W тепла на подогрев нефти можно рассчитать по формуле:

$$W = \rho C_v Q \cdot \Delta T = 870 \cdot 2000 \cdot 150 / 3600 \cdot (70 - 20) = 3,625 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

или $\approx 865,8$ ккал/с (1 ккал = 4187 Дж).

145. Обозначим температуру нефти после перемешивания потоков через T . Тогда уравнение теплового баланса дает:

$$\rho C_v Q_1 \cdot (50 - T) = \rho C_v Q_2 \cdot (T - 20) \text{ или}$$

$$T = \frac{50 \cdot Q_1 + 20 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{50 \cdot 150 + 20 \cdot 300}{450} = 30^{\circ}\text{C}.$$

146. Определим сначала температуру T нефти, при которой ее начальная вязкость будет составлять 15 сСт. Для этого используем формулу Рейнольдса-Филонова:

$$\nu = 40 \cdot e^{-\kappa(T-20)} \text{ сСт.}$$

Используя второе условие задачи, получаем:

$$8,4 = 40 \cdot e^{-\kappa(50-20)}.$$

Отсюда находим, что $\kappa = 0,052$.

Вязкость 15 сСт будет получена при температуре, которая определяется уравнением

$$\frac{15}{40} = e^{-0,052(T-20)} \Rightarrow T = 38,86 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Определим теперь тепловую мощность W , необходимую для подогрева нефти от 10 до 38,86 $^\circ\text{C}$. Для этого используем формулу $W = \rho \cdot C_v \cdot Q \cdot \Delta T$, в которой ΔT – разность начальной и конечной температур нефти. Подставляя в нее исходные данные, получаем:

$$W = 850 \cdot 1900 \cdot 1200 / 3600 \cdot (38,86 - 10) \cong 15,536 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

или 15,536 МВт.

147. Для решения задачи используем формулу (91) В.Г. Шухова. Подставив в нее исходные данные, получим:

$$T(x) = 8 + (65 - 8) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 1,25 \cdot 1,0}{850 \cdot 2000 \cdot 2300 / 3600} x} \text{ или}$$

$$T(x) = 8 + 57 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^{-5} x).$$

Для $x = 50000$ м имеем:

$$T(50000) = 8 + 57 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^{-5} \cdot 50000) \cong 55,6 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Для $x = 100000$ м имеем:

$$T(100000) = 8 + 57 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^{-5} \cdot 100000) \cong 47,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

148. Для решения задачи используем формулу (93):

$$\frac{T(x) - T_{нар.}}{T_0 - T_{нар.}} = \left[\frac{T_L - T_{нар.}}{T_0 - T_{нар.}} \right]^{x/L}.$$

Полагая в ней $x = L/22$ и $x/L = 1/2$, получаем:

$$\frac{T(L/2) - 10}{65 - 10} = \left[\frac{30 - 8}{65 - 8} \right]^{1/2}.$$

Отсюда находим: $T(L/2) \cong 44,17^\circ\text{C}$.

149. Используя формулу (91) В.Г. Шухова, составляем уравнение для определения K :

$$20 = 6 + (60 - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot K \cdot 0,7}{870 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1970} \cdot 120000}.$$

Решая это уравнение, находим: $1,35 = 0,308 \cdot K$ и далее $K \cong 4,39$ Вт/м² °С.

150. Расчет начинаем с последнего сегмента участка, то есть с сегмента $90 < x \leq 125$ км. Используя формулу (91) В.Г. Шухова, получаем уравнение:

$$18 = 6 + (T_{03} - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 2,0 \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 35000},$$

из которого находим T_{03} – температуру нефти в начале 3-го сегмента: $T_{03} \cong 20,45^\circ\text{C}$. После этого перейдем к рассмотрению 2-го сегмента, для которого полученная температура является конечной.

Для 2-го сегмента $30 < x \leq 90$ км получаем уравнение:

$$20,45 = 6 + (T_{02} - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 8,0 \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 60000},$$

из которого находим T_{02} – температуру нефти в начале 2-го сегмента: $T_{02} \cong 57,54^\circ\text{C}$.

Наконец, переходим к рассмотрению 1-го сегмента $0 < x \leq 30$ км. Для него имеем уравнение:

$$57,54 = 6 + (T_{01} - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 3,0 \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 30000},$$

из которого находим T_{01} – температуру нефти в начале всего участка: $T_{01} \cong 71,42^\circ\text{C}$. Таким образом, температура нефти в начале участка должна быть не ниже $71,42^\circ\text{C}$.

Вычислим теперь среднее значение $K_{ср.}$ коэффициента теплопередачи для всего участка нефтепровода. По определению имеем уравнение:

$$18 = 6 + (71,42 - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot K_{ср.} \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 125000},$$

из которого находим: $K_{ср.} \cong 5,12 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$.

151. Для решения задачи можно было бы воспользоваться формулой (92), однако подставить в нее $K = 0$ непосредственно нельзя, поскольку параметр T_{\otimes} также зависит от K , причем так, что $T_{\otimes} \rightarrow \infty$ при $K \rightarrow 0$. Поэтому в формуле (92) следовало бы сделать предельный переход $K \rightarrow 0$. Проще, однако, воспользоваться исходным уравнением теплообмена, положив в нем K равным 0. Сделав это, получим:

$$\rho C_v v \cdot \frac{dT}{dx} = \rho g v \cdot i_0,$$

где i_0 – гидравлический уклон. Решив уравнение, найдем:

$$T(x) = T_0 + \frac{g \cdot i_0}{C_v} \cdot x \Rightarrow T_L - T_0 = \frac{g \cdot i_0 \cdot L}{C_v}.$$

Режим перекачки имеет следующие параметры:

$$v = \frac{4 \cdot 2200 / 3600}{3,14 \cdot 0,7^2} \cong 1,59 \text{ м/с}, \quad Re = \frac{1,59 \cdot 0,7}{25 \cdot 10^{-6}} \cong 44485,$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{44485}} \cong 0,0218, \quad i_0 = 0,0218 \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1,59^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,004.$$

Теперь можно рассчитать повышение $T_L - T_0$ температуры, происходящее за счет выделения тепла внутреннего трения:

$$T_L - T_0 = \frac{9,81 \cdot 0,004 \cdot 400000}{1950} \cong 4 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

152. Согласно формуле (92), учитывающей распределение температуры нефти по длине трубопровода с учетом выделяющегося тепла внутреннего трения, $T(x) = \text{const.} = T_0$ только в том случае, если $T_0 - T_{\text{нар.}} - T_{\infty} = 0$ или

$$T_{\infty} = \frac{\rho g Q \cdot i_0}{\pi \cdot K \cdot d} = T_0 - T_{\text{нар.}}.$$

Отсюда находим, что коэффициент K должен удовлетворять условию:

$$K = \frac{\rho g Q \cdot i_0}{\pi \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}) \cdot d},$$

где i_0 – гидравлический уклон, равный в данном случае 0,003. Таким образом, имеем:

$$K = \frac{890 \cdot 9,81 \cdot 2200 / 3600 \cdot 0,003}{3,14 \cdot 25 \cdot 0,7} \cong 0,29 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

153. Коэффициент K теплопередачи от жидкости, движущейся в трубопроводе, к окружающему грунту определяется в данном случае формулой (94):

$$\frac{1}{K \cdot D} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{ст.}}} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D_{\text{нар.}}}{D} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}}},$$

в которой $d = D - 2\delta = 0,700$ м – внутренний диаметр трубы; $D_{\text{нар.}} = D + 2\delta_{\text{из.}} = 0,736$ м – диаметр трубы с изоляцией, а коэффициент α_2 теплопередачи через грунт в окружающий воздух рассчитывается по формуле (95) Форхгеймера:

$$\alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}} = \frac{2\lambda_{\text{гр.}}}{\ln \left[2H / D_{\text{нар.}} + \sqrt{(2H / D_{\text{нар.}})^2 - 1} \right]}.$$

Последовательно делая вычисления, имеем:

$$a. \alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}} = \frac{2 \cdot 1,2}{\ln \left[2 \cdot 2 / 0,736 + \sqrt{(2 \cdot 2 / 0,736)^2 - 1} \right]} \cong 1,0 \text{ Вт/м}^0 \text{С};$$

$$b. \alpha_1 \cdot d = 100 \cdot 0,7 = 70 \text{ Вт/м}^0 \text{С};$$

$$c. \frac{1}{2\lambda_{\text{ст.}}} \cdot \ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2 \cdot 40} \cdot \ln \frac{0,72}{0,70} \cong 3,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^0 \text{С/ Вт};$$

$$d. \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \cdot \ln \frac{D_{\text{нар.}}}{D} = \frac{1}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,736}{0,720} \cong 0,022 \text{ м}^0 \text{С/ Вт};$$

и, наконец:

$$\frac{1}{K \cdot 0,720} = \frac{1}{70} + 3,52 \cdot 10^{-4} + 0,022 + 1 = 1,0366 \text{ м}^0 \text{С/ Вт},$$

откуда находим: $K \cong 1,34 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^0 \text{С}$.

154. В данном случае можно использовать формулы:

а) Для случая отсутствия тепловой изоляции:

$$\frac{1}{K_1 \cdot D} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_1}, \text{ где } D_1 = D + 2\delta_{\text{из.}}.$$

б) Для случая дополнительной тепловой изоляции:

$$\frac{1}{K_2 \cdot D} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{2\lambda_*} \ln \frac{D_*}{D_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_*}, \text{ где } D_* = D_1 - 2\delta_*.$$

Подставляя в каждую из этих формул численные значения параметров из условия задачи, получаем:

$$a) \frac{1}{K_1 \cdot 1,02} = \frac{1}{2 \cdot 0,7} \ln \frac{1,036}{1,02} + \frac{1}{2 \cdot 1,036},$$

откуда находим: $K_1 \cong 1,986 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^0 \text{С}$.

б) Поскольку $K_2 = 0,5 \cdot K_1 = 0,993 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^0 \text{С}$, то имеем:

$$\frac{1}{0,993 \cdot 1,02} = \frac{1}{2 \cdot 0,7} \ln \frac{1,036}{1,02} + \frac{1}{2 \cdot 0,1} \ln \frac{D_*}{1,036} + \frac{1}{2D_*},$$

откуда находим: $D_* \cong 1,443 \text{ м} \Rightarrow \delta_* = 0,5 \cdot (D_* - D_1) = 0,054 \text{ м}$
или 54 мм.

155. По формуле (91) В.Г. Шухова находим коэффициент K_0 теплопередачи от нефти, движущейся по надземному участку трубопровода, в окружающую среду при отсутствии тепловой изоляции. Подставив в эту формулу численные значения параметров, получим:

$$32 - 40 = (-20 - 40) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3,14 \cdot 0,7 \cdot K_0 \cdot 2000}{1800/3600 \cdot 850 \cdot 1950}\right) \right],$$

откуда находим $K_0 \cong 26,98 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$.

Для того чтобы температура нефти даже в самом критическом случае не снизилась более чем на 1°С , необходимо, чтобы коэффициент K_0 удовлетворял условию

$$39 - 40 \geq (-20 - 40) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3,14 \cdot 0,7 \cdot K \cdot 2000}{1800/3600 \cdot 850 \cdot 1950}\right) \right],$$

откуда $K \leq 3,17 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$. Принимаем $K_1 = K_{\max} = 3,17 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$.

Определим теперь толщину δ_* слоя тепловой изоляции ($D_* = D + 2\delta_*$). Имеем:

$$\frac{1}{K_1 D} = \frac{1}{K_0 D_*} + \frac{1}{2\lambda_*} \ln \frac{D_*}{D} \quad \text{или}$$

$$\frac{1}{3,17 \cdot 0,72} = \frac{1}{26,98 \cdot D_*} + \frac{1}{2 \cdot 0,2} \ln \frac{D_*}{0,72}.$$

Отсюда находим: $D_* \cong 0,85 \text{ м}$. Наконец, определяем δ_* :

$$\delta_* = 0,5 \cdot (0,85 - 0,72) = 0,065 \text{ м или } 65 \text{ мм}.$$

156. Суммарный коэффициент K теплопередачи в принятых допущениях определяется формулой:

$$\frac{1}{KD} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D + 2\delta_{\text{из.}}}{D} + \frac{1}{\alpha_2 (D + 2\delta_{\text{из.}})},$$

в которой $D = 0,72$ м, $D + 2\delta_{\text{из.}} = 0,82$ м, $\lambda_{\text{из.}} = 0,25$ Вт/м⁰С. Таким образом, в этой формуле неизвестен только коэффициент α_2 .

Для определения коэффициента α_2 теплопередачи от внешней поверхности слоя изоляции через грунт в воздух используем приближенную формулу (96):

$$\alpha_2 (D + 2\delta_{\text{из.}}) = \frac{2\lambda_{\text{гр.}}}{\ln \frac{2H}{D + 2\delta_{\text{из.}}} + \frac{\lambda_{\text{гр.}}}{\alpha_0 H}}$$

из которой вычисляем:

$$\alpha_2 (D + 2\delta_{\text{из.}}) = \frac{2 \cdot 1,8}{\ln \frac{2 \cdot 1,3}{0,82} + \frac{1,8}{8 \cdot 1,3}} \cong 2,7 \text{ Вт/м}^0\text{С.}$$

После этого вычисляем значение коэффициента K :

$$\frac{1}{K \cdot 0,72} = \frac{1}{2 \cdot 0,25} \ln \frac{0,82}{0,72} + \frac{1}{2,7} \cong 0,63 \Rightarrow K \cong 2,2 \text{ Вт/м}^2\text{}^0\text{С.}$$

Приравнивая удельные Q/π тепловые потоки от нефти в окружающую среду и от нефти к внешней поверхности слоя изоляции

$$\frac{Q_w}{\pi} = KD \cdot (T_{\text{неф.}} - T_{\text{возд.}}) = \alpha D \cdot (T_{\text{неф.}} - T_{\text{из.}}) = 1,54 \cdot (40 - 0) \cong 61,6 \text{ Вт/м}^2,$$

находим температуру $T_{\text{из.}}$ внешней поверхности слоя изоляции:

$$T_{\text{из.}} = T_{\text{неф.}} - \frac{KD}{\alpha D} \cdot (T_{\text{неф.}} - T_{\text{возд.}}),$$

где α – коэффициент теплопередачи через слой изоляции. Далее имеем:

$$\frac{1}{\alpha D} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D + 2\delta_{\text{из.}}}{D} = \frac{1}{2 \cdot 0,25} \ln \frac{0,82}{0,72} \cong 0,26,$$

$$\alpha D = 3,84 \text{ Вт/ м}^2\text{}^0\text{С.}$$

Таким образом:

$$T_{\text{из.}} = 40 - \frac{1,584}{3,84} \cdot (40 - 0) \cong 23,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Используя, наконец, приближенную формулу (97) для распределения температуры в грунте при стационарном тепловом режиме

$$T(y, z) = T_{\text{из.}} - \frac{Q_w}{2\pi\lambda_{\text{гр.}}} \ln \frac{r}{r_0},$$

где $r = \sqrt{y^2 + (z + H)^2}$; $r_0 = D/2$ – радиус трубы, а ее ось имеет координату $(0, -H)$. Вертикальная ось OZ системы отсчета проходит через центр трубы, горизонтальная ось OY располагается на поверхности грунта, причем точка O находится над центром трубопровода на расстоянии H над ним.

Распределение $T(y)$ температуры поверхности грунта (плоскости $z = 0$) имеет вид:

$$T(y) = T_{\text{из.}} - \frac{Q_w/\pi}{2\lambda_{\text{гр.}}} \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + H^2}}{D/2}.$$

Подставив сюда численные значения параметров, получим:

$$T(y) = 23,5 - \frac{61,6}{2 \cdot 1,8} \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + 1,69}}{0,36} \text{ или}$$

$$T(0) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{0^2 + 1,69}}{0,36} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Максимальная температура на поверхности грунта достигается в точке $y = 0$, находящейся непосредственно над осью нефтепровода. Полагая $y = 0$, находим:

$$T(0) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{0^2 + 1,69}}{0,36} \cong +1,54 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

157. При решении предыдущей задачи была получена формула для распределения температуры поверхности грунта над местом залегания нефтепровода:

$$T(0) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + 1,69}}{0,36} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Примем, что на границах образовавшейся полосы, отделяющих покрытую снегом землю от непокрытой, температура грунта равна $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, тогда для определения полуширины h образовавшейся незаслуженной полосы получаем уравнение:

$$23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{h^2 + 1,69}}{0,36} = 0.$$

Решив это уравнение, найдем: $h \cong 0,334 \text{ м}$ или $2h \cong 0,67 \text{ м}$.

158. Найдем сначала по формуле (89) зависимость $v(T)$ вязкости нефти от температуры. Имеем:

$$v(T) = 15 \cdot e^{-k \cdot (T-60)},$$

где учтено, что $v(60) = 15 \text{ сСт}$. Второе условие $v(20) = 40 \text{ сСт}$ дает для коэффициента k уравнение:

$$40 = 15 \cdot e^{-k \cdot (20-60)},$$

из которого находим $k \cong 0,02452 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Поскольку скорость v перекачки известна:

$$v = \frac{4 \cdot 1800 / 3600}{3,14 \cdot 0,7^2} \cong 1,30 \text{ м/с},$$

то используя формулу (91) В.Г. Шухова, можно вычислить средний по участку коэффициент K теплопередачи:

$$25 = 10 + (60 - 10) \cdot e^{-\frac{4 \cdot K \cdot 135000}{860 \cdot 1,3 \cdot 0,7 \cdot 1950}},$$

откуда находим:

$$K = -\frac{1,3 \cdot 0,7 \cdot 860 \cdot 1950}{4 \cdot 135000} \cdot \ln \frac{25 - 10}{60 - 10} \cong 3,4 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Потери напора на рассматриваемом участке вычисляем по модифицированной формуле Дарси-Вейсбаха (99):

$$h_{\tau} = \lambda_{\text{эф.}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где $\lambda_{\text{эф.}}$ – эффективный коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий переменность температуры по длине участка.

Сначала вычисляем вспомогательные величины:

$$v_{\text{нар.}} = 15 \cdot e^{-0,02452 \cdot (10-60)} \cong 51,1 \text{ м/с},$$

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,3 \cdot 0,7 / (51,1 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0274,$$

$$k = \kappa / 4 \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}) = 0,02452 / 4 \cdot (60 - 10) \cong 0,307,$$

$$m = 4K \cdot L / (\rho v d C_v) = 4 \cdot 3,4 \cdot 135000 / (860 \cdot 1,3 \cdot 0,7 \cdot 1950) \cong 1,203$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,307 \cdot \exp(-1,203) \cong 0,092,$$

$$\text{Ei}(-0,307) \cong -0,889; \text{Ei}(-0,092) \cong -1,899.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = \lambda_{\text{нар.}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [\text{Ei}(-k) - \text{Ei}(-k e^{-m})],$$

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,0274 \cdot \frac{1}{1,203} [-0,889 - (-1,899)] \cong 0,023.$$

Наконец, рассчитываем потери h_{τ} напора:

$$h_{\tau} = 0,023 \cdot \frac{135000}{0,7} \cdot \frac{1,3^2}{2 \cdot 9,81} \cong 382 \text{ м.}$$

Интересно отметить, что если бы нефть имела начальную температуру 60 °С на всем протяжении участка, то потери h_{τ} напора составили бы 335 м, что на 47 м меньше, чем в действительности.

159. Потери напора на рассматриваемом участке вычисляем по модифицированной формуле Дарси-Вейсбаха (99):

$$h_{\tau} = \lambda_{\text{эф.}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

в которой $\lambda_{\text{эф.}}$ – эффективный коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий переменность температуры потока по длине участка:

$$\lambda_{\text{эф.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{v \cdot d / v_{\text{нар.}}}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [\text{Ei}(-k) - \text{Ei}(-ke^{-m})], \text{ где}$$

$$k = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}), m = \frac{\pi K d \cdot L}{\rho Q C_v} = \frac{4K \cdot L}{\rho v C_v d}.$$

В данном случае имеем:

$$v_{\text{нар.}} = 12 \cdot e^{-0,04(10-50)} \cong 59,44,$$

$$k = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}) = \frac{0,04}{4} \cdot (60 - 10) = 0,5.$$

По условию задачи требуется определить потери напора для убывающей последовательности расходов: 1000, 800 и 600 м³/ч или соответствующих им скоростей 1,339; 1,071 и 0,804 м/с.

1) Пусть $v_1 = 1,339$ м/с. Тогда имеем:

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,339 \cdot 0,514 / (59,44 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0305;$$

$$k = 0,5;$$

$$m = 4K \cdot L / (\rho v d C_v) = 4 \cdot 3,5 \cdot 140000 / (900 \cdot 1,339 \cdot 0,514 \cdot 2000) \cong 1,582;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,5 \cdot \exp(-1,582) \cong 0,103,$$

$$\text{Ei}(-0,5) \cong -0,560; \text{Ei}(-0,103) \cong -1,796.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,0305 \cdot \frac{1}{1,582} [-0,560 - (-1,796)] \cong 0,0238.$$

Наконец, рассчитываем потери h_τ напора:

$$h_\tau = 0,0238 \cdot \frac{140000}{0,514} \cdot \frac{1,339^2}{2 \cdot 9,81} \cong 592 \text{ м.}$$

2) Пусть $v_2 = 1,071$ м/с. Тогда имеем:

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,071 \cdot 0,514 / (59,44 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,032; \quad k = 0,5;$$

$$m = 4 \cdot 3,5 \cdot 140000 / (900 \cdot 1,071 \cdot 0,514 \cdot 2000) \cong 1,978;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,5 \cdot \exp(-1,978) \cong 0,0692,$$

$$\text{Ei}(-0,5) \cong -0,560; \quad \text{Ei}(-0,0692) \cong -2,16.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,032 \cdot \frac{1}{1,978} \cdot [-0,560 - (-2,16)] \cong 0,02588.$$

Наконец, рассчитываем потери h_τ напора:

$$h_\tau = 0,02588 \cdot \frac{140000}{0,514} \cdot \frac{1,071^2}{2 \cdot 9,81} \cong 412 \text{ м.}$$

3) Пусть $v_1 = 0,804$ м/с. Тогда имеем:

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{0,804 \cdot 0,514 / (59,44 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0346; \quad k = 0,5;$$

$$m = 4 \cdot 3,5 \cdot 140000 / (900 \cdot 0,804 \cdot 0,514 \cdot 2000) \cong 2,635;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,5 \cdot \exp(-2,635) \cong 0,036,$$

$$\text{Ei}(-0,5) \cong -0,560; \quad \text{Ei}(-0,036) \cong -2,8.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,0346 \cdot \frac{1}{2,635} \cdot [-0,560 - (-2,8)] \cong 0,0294.$$

Наконец, рассчитываем потери h_τ напора

$$h_\tau = 0,0294 \cdot \frac{140000}{0,514} \cdot \frac{0,804^2}{2 \cdot 9,81} \cong 263,8 \text{ м}$$

и температуру T_L в конце участка трубопровода:

$$T_L = 10 + (60 - 10) \cdot \exp(-2,635) \cong 13,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

160. Найдем сначала по формуле (89) зависимость $\nu(T)$ вязкости нефти от температуры. Имеем:

$$\nu(T) = 5 \cdot e^{-\kappa(T-50)},$$

где учтено, что $\nu(50) = 5$ сСт. Второе условие $\nu(20) = 40$ сСт дает для коэффициента κ уравнение:

$$40 = 5 \cdot e^{-\kappa(20-50)},$$

из которого находим $\kappa \cong 0,0693 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Далее составляем уравнение баланса напоров:

$$2 \cdot [273 - 0,125 \cdot 10^{-4} Q^2] = \lambda_{\text{эф.}} \cdot \frac{120000}{0,7} \cdot \frac{\nu^2}{2 \cdot 9,81}.$$

В нем использован эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$ гидравлического сопротивления, учитывающий переменность температуры по длине участка, см. формулы (99):

$$\lambda_{\text{эф.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\nu \cdot d / \nu_{\text{нар.}}}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [Ei(-k) - Ei(-ke^{-m})], \text{ где}$$

$$k = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}), m = \frac{\pi K d \cdot L}{\rho Q C_v} = \frac{4K \cdot L}{\rho \nu C_v d}.$$

Подставляя в уравнение баланса напоров выражение для расхода Q через скорость ν перекачки

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4} \cdot \nu \cdot 3600,$$

а также учитывая другие данные условия, получаем уравнение:

$$546 = \nu^2 \cdot (8737,4 \cdot \lambda_{\text{эф.}} + 47,94). \quad (*)$$

Полученное уравнение решаем методом итераций (последовательных приближений).

1-е приближение. В качестве 1-го приближения положим $\lambda_{\text{эф.}}^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения (*) находим скорость течения жидкости: $v^{(1)} = 1,566$ м/с. Затем проверяем справедливость сделанного допущения. Имеем:

$$v_{\text{нар.}} = 5 \cdot \exp[-0,0693 \cdot (10 - 50)] = 79,95 \text{ сСт};$$

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,566 \cdot 0,7 / (79,95 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0292;$$

$$k = 1/4 \cdot 0,0693 \cdot (50 - 10) = 0,693;$$

$$m = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 120000}{1,566 \cdot 0,7 \cdot 870 \cdot 2000} \cong 0,881;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,693 \cdot \exp(-0,881) \cong 0,287;$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{эф.}} &= 0,0292 \cdot \frac{1}{0,881} \cdot [\text{Ei}(-0,693) - \text{Ei}(-0,287)] = \\ &= 0,0292 \cdot \frac{1}{0,881} \cdot [-0,379 - (-0,939)] \cong 0,0186 < \lambda_{\text{эф.}} = 0,02. \end{aligned}$$

Поскольку между принятым и рассчитанным $\lambda_{\text{эф.}}$ существует различие, сделаем второе приближение.

2-е приближение. Положим $\lambda_{\text{эф.}}^{(2)} = 0,0186$. Тогда из уравнения (*) находим новую скорость течения жидкости: $v^{(2)} = 1,611$ м/с. После этого опять проверяем справедливость сделанного допущения. Имеем:

$$k = 0,0693 \text{ л}^0/\text{С}; \quad v_{\text{нар.}} = 79,95 \text{ сСт};$$

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,611 \cdot 0,7 / (79,95 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0290;$$

$$k = 1/4 \cdot 0,0693 \cdot (50 - 10) = 0,693;$$

$$m = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 120000}{1,611 \cdot 0,7 \cdot 870 \cdot 2000} \cong 0,856;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,693 \cdot \exp(-0,856) \cong 0,294;$$

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,029 \cdot \frac{1}{0,856} \cdot [\text{Ei}(-0,693) - \text{Ei}(-0,294)] =$$

$$= 0,029 \cdot \frac{1}{0,856} \cdot [-0,379 - (-0,921)] \cong 0,0184 \approx 0,0186 = \lambda_{\text{эф.}}^{(2)}.$$

Поскольку для принятого и рассчитанного коэффициентов $\lambda_{\text{эф.}}$ получено хорошее совпадение, процесс последовательных приближений заканчивается. Таким образом, $v \cong 1,611$ м/с и, следовательно, $Q = 2231$ м³/ч. При этом температура нефти в конце участка рассчитывается по формуле (91) В.Г. Шухова:

$$T_L = 10 + (50 - 10) \cdot \exp(-0,856) \cong 27^{\circ}\text{C}.$$

2.10. Физические свойства природных газов

161. Молярная масса μ газовой смеси рассчитывается по последней из формул (105):

$$\mu = \sum_{j=1}^{j=3} x_j \mu_j = 16,042 \cdot 0,99 + 28,016 \cdot 0,005 + 30,068 \cdot 0,005 = 16,172,$$

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8314}{16,172} \cong 514,1 \text{ Дж}/(\text{кг К}).$$

162. Задача решается аналогично предыдущей.

$$\mu = \sum_{j=1}^{j=3} x_j \mu_j = 16,042 \cdot 0,88 + 28,016 \cdot 0,02 + 30,068 \cdot 0,06 +$$

$$+ 44,094 \cdot 0,04 = 18,245$$

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8314}{18,245} \cong 455,7 \text{ Дж}/(\text{кг К}).$$

163. Используя закон (101) Клапейрона-Менделеева

$$\rho_c = 500/0,633 \cong 790 \text{ кг/м}^3.$$

117. Вычисляем сначала массу M смеси:

$$M = 0,4 \cdot 780 + (0,5 - 0,4) \cdot 840 = 396 \text{ кг}.$$

Затем находим плотность ρ_c смеси:

$$\rho_c = 396/0,5 = 792 \text{ кг/м}^3.$$

118. Согласно формуле (75) имеем:

$$c_1 = \frac{810 - 840}{735 - 840} \cong 0,29 \text{ и } c_2 = \frac{810 - 735}{840 - 735} \cong 0,71.$$

119. Согласно формуле (75) имеем:

$$c_1 = \frac{750 - 730}{780 - 730} \cong 0,4.$$

120. Концентрация c дизельного топлива в смеси находится по формуле (75):

$$c = \frac{780 - 735}{840 - 735} \cong 0,429.$$

Это означает, в 150 м^3 смеси содержится $150 \cdot 0,429 = 64,35 \text{ м}^3$ дизельного топлива. Следовательно, концентрация θ дизельного топлива в резервуаре с бензином после добавления в него смеси определяется равенством:

$$\theta = \frac{64,35}{8000 + 150} \cong 0,0079 \text{ или } 0,79 \text{ \%}.$$

121. Обозначим искомый объем смеси через V_c и определим концентрацию c бензина в смеси:

$$c = \frac{800 - 840}{730 - 840} \cong 0,364.$$

После этого найдем, сколько бензина содержится в объеме V_c смеси. Очевидно, что это количество представляется выражением $0,364 \cdot V_c$. Поскольку далее известно, что концентрация бензина в резервуаре не должна превысить $0,2 \text{ \%}$, составим неравенство

$$\frac{0,364 \cdot V_c}{12000 + V_c} \leq 0,002 \Rightarrow V_c \leq 66,3 \text{ м}^3.$$

122. Обозначим максимально возможный объем смеси, который можно добавить в резервуар с бензином, через V_c . Концентрация C дизельного топлива в смеси находится по формуле (75):

$$c = \frac{780 - 730}{835 - 730} \cong 0,476.$$

После этого найдем, сколько дизельного топлива содержится в объеме V_c смеси. Очевидно, что это количество представляется выражением $0,476 \cdot V_c$. Поскольку далее известно, что концентрация дизельного топлива в резервуаре не должна превысить 0,12 %, составим неравенство

$$\frac{0,476 \cdot V_c}{17000 + V_c} \leq 0,0012 \Rightarrow V_c \leq 43,0 \text{ м}^3.$$

Ответ. 43 м³.

123. Предельно допустимая концентрация $\theta_{\text{д/б}}$ рассчитывается по формуле (76):

$$\theta_{\text{д/б}} = \frac{(185 - 180) \cdot (185 + 180 - 248)}{28 \cdot (840 - 753)} \cong 0,24 \text{ \%}.$$

124. Предельно допустимая концентрация $\theta_{\text{б/д}}$ рассчитывается по формуле (77):

$$\theta_{\text{б/д}} = \frac{11,37}{45 + 55} \cdot \lg \frac{45}{40} \cdot 100 \cong 0,58 \text{ \%}.$$

125. Сначала определяем предельно допустимую концентрацию $\theta_{\text{д/б}}$ дизельного топлива в бензине:

$$\theta_{\text{д/б}} = \frac{(185 - 181) \cdot (185 + 181 - 248)}{28 \cdot (835 - 753)} \cong 0,206 \text{ \%}.$$

Затем вычисляем концентрацию C дизельного топлива в смеси:

$$c = \frac{760 - 730}{835 - 730} \cong 0,286.$$

После этого, обозначив добавляемый объем смеси через V_c , составляем неравенство:

$$\frac{0,286 \cdot V_c}{8000 + V_c} \leq 0,00206 \Rightarrow V_c \leq 58,0 \text{ м}^3.$$

Следовательно, максимальный объем смеси бензина с дизельным топливом, который можно добавить в резервуар с бензином, составляет 58 м^3 .

126. Сначала определяем предельно допустимую концентрацию $\theta_{\text{б/д}}$ бензина в дизельном топливе:

$$\theta_{\text{б/д}} = \frac{11,37}{68 + 55} \cdot \lg \frac{68}{62} \cdot 100 \cong 0,37 \text{ \%}.$$

Затем вычисляем концентрацию C бензина в смеси:

$$c = \frac{805 - 840}{730 - 840} \cong 0,318.$$

После этого, обозначив добавляемый объем смеси через V_c , составляем неравенство:

$$\frac{0,318 \cdot V_c}{10000 + V_c} \leq 0,0037 \Rightarrow V_c \leq 212 \text{ м}^3.$$

Следовательно, максимальный объем смеси бензина с дизельным топливом, который можно добавить в резервуар с дизельным топливом, составляет 212 м^3 .

127. Объем V_c смеси в симметричных пределах концентрации (от 1 до 99 %) рассчитывается по формуле (82), поэтому найдем сначала коэффициенты $\lambda_{\text{б}}$ и $\lambda_{\text{д}}$ гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам перекачки бензина и дизельного топлива, соответственно. Имеем:

$$Q = 1100 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,25}{514} \cong 0,0005; \quad v = \frac{4 \cdot 1100/3600}{3,14 \cdot 0,514^2} \cong 1,47 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,47 \cdot 0,514}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 1259300, \quad \lambda_B = 0,11 \cdot 0,0005^{0,25} \cong 0,0164,$$

$$Re_D = \frac{1,47 \cdot 0,514}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 83953,$$

$$\lambda_D = 0,11 \cdot (0,0005 + 68/83953)^{0,25} \cong 0,0209,$$

$$V = 750000 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2 / 4 \cong 155545 \text{ м}^3,$$

$$(0,514/750000)^{0,43} \cong 2,236 \cdot 10^{-3},$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0164^{1,8} + 0,0209^{1,8}) \cdot 2,236 \cdot 10^{-3} \cdot 155545 \cong 542 \text{ м}^3.$$

128. Объем V_c смеси в симметричных пределах концентрации (от 1 до 99 %) рассчитывается по формуле (82), поэтому найдем сначала коэффициенты λ_B и λ_D гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам перекачки бензина и дизельного топлива, соответственно. Имеем:

$$Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,377 - 2 \cdot 0,007 = 0,361 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,19}{361} \cong 0,00053; \quad v = \frac{4 \cdot 500/3600}{3,14 \cdot 0,361^2} \cong 1,358 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,358 \cdot 0,361}{0,8 \cdot 10^{-6}} \cong 612798, \quad \lambda_B = 0,11 \cdot 0,00053^{0,25} \cong 0,0167,$$

$$Re_D = \frac{1,358 \cdot 0,361}{10 \cdot 10^{-6}} \cong 49024,$$

$$\lambda_D = 0,11 \cdot (0,00053 + 68/49024)^{0,25} \cong 0,0230,$$

$$V = 420000 \cdot 3,14 \cdot 0,361^2 / 4 \cong 42967 \text{ м}^3,$$

$$(0,361/420000)^{0,43} \cong 2,465 \cdot 10^{-3},$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0167^{1,8} + 0,023^{1,8}) \cdot 2,465 \cdot 10^{-3} \cdot 42967 \cong 186 \text{ м}^3.$$

129. Объем V_c смеси в симметричных пределах концентрации (от 1 до 99 %) рассчитывается по формуле (82),

поэтому найдем сначала коэффициенты λ_B и λ_D гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам перекачки бензина и дизельного топлива, соответственно. Имеем:

$$Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,325 - 2 \cdot 0,007 = 0,311 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{311} \cong 0,0006; \quad v = \frac{4 \cdot 400/3600}{3,14 \cdot 0,311^2} \cong 1,463 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,463 \cdot 0,311}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 758320, \quad \lambda_B = 0,11 \cdot 0,0006^{0,25} \cong 0,0172,$$

$$Re_D = \frac{1,463 \cdot 0,311}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 50555,$$

$$\lambda_D = 0,11 \cdot (0,0006 + 68/50555)^{0,25} \cong 0,0231,$$

$$V = 650000 \cdot 3,14 \cdot 0,311^2/4 \cong 49352 \text{ м}^3,$$

$$(0,311/650000)^{0,43} \cong 1,916 \cdot 10^{-3},$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0172^{1,8} + 0,0231^{1,8}) \cdot 1,916 \cdot 10^{-3} \cdot 49352 \cong 170 \text{ м}^3.$$

130. Отношение объемов смеси в *новом* и *старом* режимах равно $(\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8})_{\text{нов}} / (\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8})_{\text{ст}}$, поэтому вычисляем сначала коэффициенты гидравлического сопротивления в этих режимах. В старом режиме имеем:

$$Q = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 1,607 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 1376663, \quad \lambda_B \cong 0,0159,$$

$$Re_D \cong 103250, \quad \lambda_D \cong 0,0198,$$

$$\kappa_{\text{ст}} = (0,0159^{1,8} + 0,0198^{1,8}) = 1,4378 \cdot 10^{-3}.$$

В *новом* режиме имеем:

$$Q = 800 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 1,0715 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 917918, \quad \lambda_B \cong 0,0161,$$

$$Re_D \cong 68844, \quad \lambda_D \cong 0,0212,$$

$$\kappa_{\text{нов}} = (0,0161^{1,8} + 0,0212^{1,8}) = 1,5634 \cdot 10^{-3}.$$

Отношение объемов смеси составляет:

$$\kappa_{\text{нов.}}/\kappa_{\text{ст.}} = (1,5634 \cdot 10^{-3}) / (1,4378 \cdot 10^{-3}) \cong 1,087,$$

то есть объем смеси увеличится примерно на 8,7 % независимо от протяженности нефтепродуктопровода.

131. Отношение объемов смеси в *новом* и *старом* режимах равно $(\lambda_{\text{Б}}^{1,8} + \lambda_{\text{Д}}^{1,8})_{\text{нов.}} / (\lambda_{\text{Б}}^{1,8} + \lambda_{\text{Д}}^{1,8})_{\text{ст.}}$, поэтому вычисляем сначала коэффициенты гидравлического сопротивления в этих режимах. В старом режиме имеем:

$$Q = 140 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 0,512 \text{ м/с},$$

$$Re_{\text{Б}} \cong 199040, \quad \lambda_{\text{Б}} \cong 0,0168,$$

$$Re_{\text{Д}} \cong 19904, \quad \lambda_{\text{Д}} \cong 0,0270,$$

$$\kappa_{\text{ст.}} = (0,0168^{1,8} + 0,027^{1,8}) = 2,1403 \cdot 10^{-3}.$$

В новом режиме имеем:

$$Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 1,0976 \text{ м/с},$$

$$Re_{\text{Б}} \cong 426676, \quad \lambda_{\text{Б}} \cong 0,0151,$$

$$Re_{\text{Д}} \cong 42668, \quad \lambda_{\text{Д}} \cong 0,0226,$$

$$\kappa_{\text{нов.}} = (0,0151^{1,8} + 0,0226^{1,8}) = 1,617 \cdot 10^{-3}.$$

Отношение объемов смеси составляет:

$$\kappa_{\text{нов.}}/\kappa_{\text{ст.}} = (1,617 \cdot 10^{-3}) / (2,1403 \cdot 10^{-3}) \cong 0,756,$$

то есть объем смеси уменьшится примерно в 1,324 раза независимо от протяженности нефтепродуктопровода.

132. Объем смеси в трубопроводе с переменным диаметром находится по формуле (83), имеющей для данного случая вид:

$$V_{\text{с}} = (V_{\text{с1}}^{1/0,57} + V_{\text{с2}}^{1/0,57})^{0,57},$$

поэтому найдем объемы $V_{\text{с1}}$ и $V_{\text{с2}}$ смеси для каждого из участков трубопровода, имеющих постоянный диаметр.

$$1) \quad Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad v \cong 0,815 \text{ м/с},$$

$$Re_{\text{Б}} \cong 490107, \quad \lambda_{\text{Б}} \cong 0,0149,$$

$$Re_{\text{Д}} \cong 36777, \quad \lambda_{\text{Д}} \cong 0,0234,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0149^{1,8} + 0,0234^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,361}{3 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 30691 \cong 146,4 \text{ м}^3.$$

$$2) Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 1,0836 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 565267, \lambda_B \cong 0,0147,$$

$$Re_D \cong 42396, \lambda_D \cong 0,0227,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0147^{1,8} + 0,0227^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,313}{2 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 15381 \cong 78,5 \text{ м}^3.$$

Теперь можно вычислить общий объем V_c смеси:

$$V_c = (146,4^{1/0,57} + 78,5^{1/0,57})^{0,57} \cong 173 \text{ м}^3.$$

133. Объем смеси в трубопроводе с переменным диаметром находится по формуле (83), имеющей для данного случая вид:

$$V_c = (V_{c1}^{1/0,57} + V_{c2}^{1/0,57} + V_{c3}^{1/0,57})^{0,57},$$

поэтому найдем объемы V_{c1} , V_{c2} и V_{c3} смеси для каждого из участков трубопровода, имеющих постоянный диаметр.

$$1) Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 0,536 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 459173, \lambda_B \cong 0,0150,$$

$$Re_D \cong 68876, \lambda_D \cong 0,0204,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0150^{1,8} + 0,0204^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,514}{3 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 62218 \cong 294,5 \text{ м}^3.$$

$$2) Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 1,086 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 653476, \lambda_B \cong 0,0145,$$

$$Re_D \cong 98011, \lambda_D \cong 0,0190,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0145^{1,8} + 0,0190^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,361}{2 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 20460 \cong 89,3 \text{ м}^3.$$

$$3) Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}, v \cong 1,463 \text{ м/с},$$

$$Re_B \cong 758322, \lambda_B \cong 0,0144,$$

$$Re_D \cong 113748, \lambda_D \cong 0,0185,$$

$$V_{c1} = 10^3 (0,0144^{1,8} + 0,0185^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,311}{2,5 \cdot 10^5} \right)^{0,43} \cdot 18981 \cong 68,2 \text{ м}^3.$$

Теперь можно вычислить общий объем V_c смеси:

$$V_c = (294,5^{1/0,57} + 89,3^{1/0,57} + 68,2^{1/0,57})^{0,57} \cong 327 \text{ м}^3.$$

134. Для того чтобы учесть влияние первичной технологической смеси на общий объем V_c образующейся смеси, увеличим длину трубопровода на некоторую величину L_ϕ такую, чтобы при тех же условиях перекачки, но с мгновенной сменой нефтепродукта на станции, в нем образовалось 75 м^3 смеси на расстоянии L_ϕ от начала трубопровода. Для этого составим уравнение:

$$75 = 10^3 \cdot (\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L_\phi} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \cdot L_\phi \right).$$

Для его решения вычислим λ_B и λ_D . Имеем:

$$v = \frac{4 \cdot (1100/3600)}{3,14 \cdot 0,516^2} \cong 1,462 \text{ м/с},$$

$$Re_B = 1257320, \quad Re_D = 188598,$$

$$\lambda_B = 0,0159, \quad \lambda_D = 0,0182 \text{ и далее:}$$

$$75 = 10^3 \cdot (0,0159^{1,8} + 0,0182^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,516}{L_\phi} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,516^2}{4} \cdot L_\phi \right).$$

Решив это уравнение, найдем: $L_\phi \cong 30853 \text{ м}$.

Будем теперь считать, что рассматриваемый нефтепродуктопровод имеет протяженность не 250 км , а $250 + 30,853 = 280,853 \text{ км}$. Рассчитаем объем V_c образующейся смеси:

$$V_c = 10^3 \cdot (\lambda_B^{1,8} + \lambda_D^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L + L_\phi} \right)^{0,43} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot (L + L_\phi),$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0159^{1,8} + 0,0182^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,516}{280853} \right)^{0,43} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,516^2}{4} \cdot 280853,$$

откуда находим: $V_c \cong 264 \text{ м}^3$.

135. Сначала вычисляем объем V_c смеси, образующейся в одном контакте партий бензина и дизельного топлива:

$$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}, d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,3}{514} \cong 0,00058; v = \frac{4 \cdot 1000/3600}{3,14 \cdot 0,514^2} \cong 1,34 \text{ м/с},$$

$$Re_B = \frac{1,34 \cdot 0,514}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 1147396, \lambda_B \cong 0,0175,$$

$$Re_D = \frac{1,34 \cdot 0,514}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 76529, \lambda_D \cong 0,0215,$$

$$V_c = 10^3 \cdot (0,0175^{1,8} + 0,0215^{1,8}) \cdot \left(\frac{0,514}{7,5 \cdot 10^5} \right)^{0,43} 155545 \cong 586 \text{ м}^3.$$

При запасе качества 3⁰C соотношения между минимально допустимыми объемами партий бензина и дизельного топлива и объемом смеси даются формулами (85):

$$V_{нБ} = 100 \cdot V_c \text{ и } V_{нД} = 85 \cdot V_c,$$

следовательно, $V_{нБ} = 58600 \text{ м}^3$, $V_{нД} = 49810 \text{ м}^3$.

Годовое число N циклов перекачки рассчитываем по формуле (86). Поскольку на конец трубопровода приходит 2,0 млн. т бензина и 4,0 млн. т дизельного топлива, то имеем:

$$N = \min \left\{ \frac{2 \cdot 10^9 / 735}{58600}, \frac{4 \cdot 10^9 / 840}{49810} \right\} = \{46,4; 95,6\} = 46.$$

Таким образом, перекачку можно вести с 46-ю циклами в год.

Вместимость резервуарного парка ГПС рассчитываем по формуле (87):

$$W_{ГПС} = \frac{1,2}{46} \cdot \left[\frac{2,5 \cdot 10^9 / 735}{0,82} \cdot \left(1 - \frac{2,5 \cdot 10^9 / 735}{8760 \cdot 1000} \right) + \frac{5 \cdot 10^9 / 840}{0,82} \cdot \left(1 - \frac{5 \cdot 10^9 / 735}{8760 \cdot 1000} \right) \right] \cong 127000 \text{ м}^3.$$

136. Если бы запас качества бензина по температуре конца кипения был бы равен не 3, а 6 °С, то предельно допустимая концентрация дизельного топлива в бензине была бы больше. В соответствии с формулой (76) находим:

$$\theta_{д/б} = \frac{(195-189) \cdot (195+189-248)}{2800 \cdot (840-753)} \cong 0,00335,$$

а соотношение между минимально допустимым объемом партии бензина и объемом образующейся смеси было бы таково (84):

$$V_{пб} = \frac{0,171}{\theta_{д/б}} \cdot V_c = \frac{0,171}{0,00335} \cdot V_c \approx 51 \cdot V_c.$$

Поскольку, см. решение задачи №135, объем V_c смеси, образующейся в рассматриваемом трубопроводе равен 586 м³, то минимальный объем $V_{пб}$ партии бензина, допустимый к перекачке, равен $51 \cdot 586 = 29886$ м³, а объем $V_{пб}$ партии дизельного топлива остается прежним - 49810 м³.

Годовое число N циклов перекачки находится в соответствии с формулой (86):

$$N = \min \left\{ \frac{2 \cdot 10^9 / 735}{29886}, \frac{4 \cdot 10^9 / 840}{49810} \right\} = \{91,0; 95,6\} = 91.$$

Отсюда можно найти вместимость резервуарного парка на ГПС, уменьшив ее в $46/91 = 0,505$ раз:

$$W_{ГПС} = 127 \cdot 0,505 \approx 64,2 \text{ тыс. м}^3.$$

137. Сначала определяем объем V_c смеси, образующейся в одном контакте перекачиваемых бензинов:

$$Q = 280 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,273 - 2 \cdot 0,006 = 0,261 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,15}{261} \cong 0,00057; \quad v = \frac{4 \cdot 280 / 3600}{3,14 \cdot 0,261^2} \cong 1,454 \text{ м/с},$$

$$Re = \frac{1,454 \cdot 0,261}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 632490, \quad \lambda_B \cong 0,0177,$$

$$V_c = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,0177^{1,8} \cdot \left(\frac{0,261}{180000} \right)^{0,43} \cdot 9625,5 \cong 41,7 \text{ м}^3.$$

Затем определяем предельно допустимую концентрацию θ бензина А 76 в бензине Аи-92. Если c - концентрация бензина А 76 в смеси, то ее октановое число n определяется формулой

$$n = 87 - c \cdot (87 - 76) = 87 - 11 \cdot c.$$

При $c = \theta$ октановое число $n = 87 - 0,1 = 86,9$, следовательно $86,9 = 87 - 11 \cdot \theta$ или $\theta = 0,0091$,

то есть предельно допустимая концентрация бензина А 76 в бензине Аи-92 равна 0,0091 или 0,91 %.

Далее находим:

$$V_{\text{пАи-92}} = \frac{0,171}{0,0091} \cdot 41,7 \approx 784 \text{ м}^3, \quad N = \frac{10^8 / 735}{784} \cong 173.$$

138. Имеем:

$$Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,377 - 2 \cdot 0,008 = 0,361 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{361} \cong 0,00055; \quad v = \frac{4 \cdot 500 / 3600}{3,14 \cdot 0,361^2} \cong 1,358 \text{ м/с},$$

$$Re = \frac{1,358 \cdot 0,361}{5 \cdot 10^{-6}} \cong 98048, \quad \lambda_d \cong 0,0207.$$

Гидравлический уклон i находится по формуле

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0207 \cdot \frac{1}{0,361} \cdot \frac{1,358^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00539$$

или 5,39 м/км.

Если бы по трубопроводу перекачивали бензин, то

$$Re = \frac{1,358 \cdot 0,361}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 817063, \quad \lambda_b \cong 0,0174.$$

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0174 \cdot \frac{1}{0,361} \cdot \frac{1,358^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00453$$

или 4,53 м/км.

139. Очевидны следующие параметры процесса:

$$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,530 - 2 \cdot 0,008 = 0,514 \text{ м},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,25}{514} \cong 0,00049; \quad v = \frac{4 \cdot 1000 / 3600}{3,14 \cdot 0,514^2} \cong 1,34 \text{ м/с}.$$

Сначала находим гидравлические уклоны i_1 и i_2 на первой и второй половинах участка. Имеем:

$$1) \quad Re_{\text{д}} = \frac{1,34 \cdot 0,514}{9 \cdot 10^{-6}} \cong 76529, \quad \lambda_{\text{д}} \cong 0,0212,$$

$$i_{\text{д}} = \lambda_{\text{д}} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0212 \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{1,34^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00378.$$

$$2) \quad Re_{\text{б}} = \frac{1,34 \cdot 0,514}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 1147933, \quad \lambda_{\text{б}} \cong 0,0168,$$

$$i_{\text{б}} = \lambda_{\text{б}} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0168 \cdot \frac{1}{0,514} \cdot \frac{1,34^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,00299.$$

Затем рассчитываем изменение напора по длине участка. От начального значения 450 м он линейно уменьшается до середины участка на $60000 \cdot i_1 = 226,5$ м, то есть ее величина H_* со стороны дизельного топлива становится равной 223,5 м, рис. 2.14.

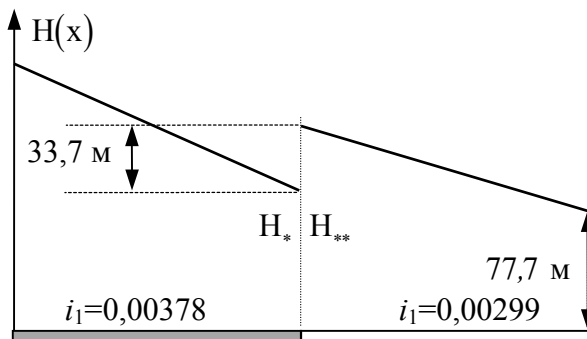


Рис. 2.14. К решению задачи № 140

Находим давление p_* в месте контакта нефтепродуктов (длиной области смеси в соответствии с условием задачи пренебрегаем): $p_* = \rho_d g H_* = 840 \cdot 9,81 \cdot 223,5 \cong 1,842 \cdot 10^6$ Па. Тогда напор H_{**} в месте контакта нефтепродуктов, вычисленный со стороны бензина, составит:

$$H_{**} = \frac{p_*}{\rho_B g} = \frac{1,842 \cdot 10^6}{730 \cdot 9,81} \cong 257,2 \text{ м,}$$

то есть напор в месте контакта дизельного топлива и бензина испытывает скачкообразное увеличение на величину

$$H_{**} - H_* = 257,2 - 223,5 = 33,7 \text{ м.}$$

От места контакта и до конца участка напор опять линейно убывает, а его значение в конце участка определяется равенством $257,2 - 60000 \cdot 0,00299 \cong 77,7$ м, см. рисунок.

140. Сначала находим гидравлический уклон i в области, занятой бензином. Имеем:

$$Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad d = D - 2\delta = 0,377 - 2 \cdot 0,007 = 0,363 \text{ м,}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{363} \cong 0,00055; \quad v = \frac{4 \cdot 500/3600}{3,14 \cdot 0,363^2} \cong 1,34 \text{ м/с,}$$

$$Re = \frac{1,34 \cdot 0,363}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cong 810700, \quad \lambda_B \cong 0,0175.$$

Гидравлический уклон i находится по формуле:

$$i_B = \lambda_B \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0175 \cdot \frac{1}{0,363} \cdot \frac{1,34^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,004412.$$

Далее вычисляем потери Δh напора на первых 30 км трубопровода:

$$\Delta h = 30000 \cdot 0,004412 \cong 132,4 \text{ м.}$$

Находим напор H_* и давление p_* в месте контакта нефтепродуктов, рассчитанные по бензину:

$$H_* = H_0 - \Delta h = \frac{p_0}{\rho_B g} - \Delta h = \frac{4,5 \cdot 10^6}{730 \cdot 9,81} - 132,4 \cong 496 \text{ м;}$$

$$p_* = \rho_B g H_* = 730 \cdot 9,81 \cdot 496 \cong 3,552 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Теперь можно вычислить напор H_{**} со стороны дизельного топлива: $H_{**} = \frac{p_*}{\rho_{дг}} = \frac{3,552 \cdot 10^6}{845 \cdot 9,81} \cong 428,5 \text{ м}$, то есть напор

в месте контакта бензина и дизельного топлива испытывает скачкообразное уменьшение на величину

$$H_* - H_{**} = 496 - 428,5 = 67,5 \text{ м.}$$

2.9. Перекачка высоковязких нефтей и нефтепродуктов с подогревом

141. Полагая в формуле (89) Рейнольдса-Филонова $T_1 = 20^0\text{C}$ и $v_1 = 40$ сСт, получаем:

$$v = 40 \cdot e^{-\kappa(T-20)} \text{ сСт.}$$

Определяем вторую константу в этой формуле. Полагая $T = 70^0\text{C}$ и $v = 5,3$ сСт, получаем уравнение:

$$5,3 = 40 \cdot e^{-\kappa(70-20)},$$

откуда находим:

$$\kappa = -\frac{1}{50} \ln \frac{5,3}{40} \cong 0,04 \text{ 1/}^0\text{C}.$$

Следовательно, для нефти данного месторождения формула Рейнольдса-Филонова приобретает вид:

$$v = 40 \cdot e^{-0,04(T-20)} \text{ сСт.}$$

Теперь можно найти вязкости нефти при температурах 40 и 50 ^0C . Имеем:

$$v(40) = 40 \cdot e^{-0,04(40-20)} \cong 17,97 \text{ сСт,}$$

$$v(50) = 40 \cdot e^{-0,04(50-20)} \cong 12,05 \text{ сСт.}$$

142. Полагая в формуле (89) Рейнольдса-Филонова $T_1 = 10^0\text{C}$ и $v_1 = 213,4$ сСт, получаем:

$$v = 213,4 \cdot e^{-\kappa(T-10)} \text{ сСт.}$$

Используя еще одно условие задачи, получаем уравнение для определения κ :

$$21,34 = 213,4 \cdot e^{-\kappa(20-10)},$$

из которого находим: $\kappa = -0,1 \cdot \ln 0,1 \cong 0,23$.

Наконец, подставляя значение κ , равное 0,23, в формулу (89), получаем уравнение для определения температуры T , при которой вязкость нефти снижается в 100 раз:

$$2,134 = 213,4 \cdot e^{-0,23(T-10)}.$$

Отсюда находим, $T = 10 - \ln 0,01 / 0,23 \cong 30^{\circ}\text{C}$.

143. Полагая в формуле (89) Рейнольдса-Филонова $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$ и $v_1 = 7$ сСт, получаем:

$$v = 7 \cdot e^{-\kappa(T-30)} \text{ сСт.}$$

Используя второе условие задачи, получаем:

$$350 = 7 \cdot e^{-\kappa(20-30)}.$$

Отсюда находим, что $\kappa = 0,391$.

Учитывая, что $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с} = 100$ сСт, имеем неравенство:

$$v = 7 \cdot e^{-0,391(T-30)} < 100,$$

из которого находим: $T \geq 23,2^{\circ}\text{C}$.

144. Секундную потребность W тепла на подогрев нефти можно рассчитать по формуле:

$$W = \rho C_v Q \cdot \Delta T = 870 \cdot 2000 \cdot 150 / 3600 \cdot (70 - 20) = 3,625 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

или $\approx 865,8$ ккал/с (1 ккал = 4187 Дж).

145. Обозначим температуру нефти после перемешивания потоков через T . Тогда уравнение теплового баланса дает:

$$\rho C_v Q_1 \cdot (50 - T) = \rho C_v Q_2 \cdot (T - 20) \text{ или}$$

$$T = \frac{50 \cdot Q_1 + 20 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{50 \cdot 150 + 20 \cdot 300}{450} = 30^{\circ}\text{C}.$$

146. Определим сначала температуру T нефти, при которой ее начальная вязкость будет составлять 15 сСт. Для этого используем формулу Рейнольдса-Филонова:

$$\nu = 40 \cdot e^{-\kappa(T-20)} \text{ сСт.}$$

Используя второе условие задачи, получаем:

$$8,4 = 40 \cdot e^{-\kappa(50-20)}.$$

Отсюда находим, что $\kappa = 0,052$.

Вязкость 15 сСт будет получена при температуре, которая определяется уравнением

$$\frac{15}{40} = e^{-0,052 \cdot (T-20)} \Rightarrow T = 38,86 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определим теперь тепловую мощность W , необходимую для подогрева нефти от 10 до 38,86 $^\circ\text{C}$. Для этого используем формулу $W = \rho \cdot C_v \cdot Q \cdot \Delta T$, в которой ΔT – разность начальной и конечной температур нефти. Подставляя в нее исходные данные, получаем:

$$W = 850 \cdot 1900 \cdot 1200 / 3600 \cdot (38,86 - 10) \cong 15,536 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

или 15,536 МВт.

147. Для решения задачи используем формулу (91) В.Г. Шухова. Подставив в нее исходные данные, получим:

$$T(x) = 8 + (65 - 8) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 1,25 \cdot 1,0}{850 \cdot 2000 \cdot 2300 / 3600} x} \text{ или}$$

$$T(x) = 8 + 57 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^{-5} x).$$

Для $x = 50000$ м имеем:

$$T(50000) = 8 + 57 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^{-5} \cdot 50000) \cong 55,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для $x = 100000$ м имеем:

$$T(100000) = 8 + 57 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^{-5} \cdot 100000) \cong 47,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

148. Для решения задачи используем формулу (93):

$$\frac{T(x) - T_{нар.}}{T_0 - T_{нар.}} = \left[\frac{T_L - T_{нар.}}{T_0 - T_{нар.}} \right]^{x/L}.$$

Полагая в ней $x = L/22$ и $x/L = 1/22$, получаем:

$$\frac{T(L/2)-10}{65-10} = \left[\frac{30-8}{65-8} \right]^{1/2}.$$

Отсюда находим: $T(L/2) \cong 44,17^{\circ}\text{C}$.

149. Используя формулу (91) В.Г. Шухова, составляем уравнение для определения K :

$$20 = 6 + (60 - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot K \cdot 0,7}{870 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1970} \cdot 120000}.$$

Решая это уравнение, находим: $1,35 = 0,308 \cdot K$ и далее $K \cong 4,39 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

150. Расчет начинаем с последнего сегмента участка, то есть с сегмента $90 < x \leq 125$ км. Используя формулу (91) В.Г. Шухова, получаем уравнение:

$$18 = 6 + (T_{03} - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 2,0 \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 35000},$$

из которого находим T_{03} – температуру нефти в начале 3-го сегмента: $T_{03} \cong 20,45^{\circ}\text{C}$. После этого перейдем к рассмотрению 2-го сегмента, для которого полученная температура является конечной.

Для 2-го сегмента $30 < x \leq 90$ км получаем уравнение:

$$20,45 = 6 + (T_{02} - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 8,0 \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 60000},$$

из которого находим T_{02} – температуру нефти в начале 2-го сегмента: $T_{02} \cong 57,54^{\circ}\text{C}$.

Наконец, переходим к рассмотрению 1-го сегмента $0 < x \leq 30$ км. Для него имеем уравнение:

$$57,54 = 6 + (T_{01} - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot 3,0 \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 30000},$$

из которого находим T_{01} – температуру нефти в начале всего участка: $T_{01} \cong 71,42^{\circ}\text{C}$. Таким образом, температура нефти в начале участка должна быть не ниже $71,42^{\circ}\text{C}$.

Вычислим теперь среднее значение $K_{ср.}$ коэффициента теплопередачи для всего участка нефтепровода. По определению имеем уравнение:

$$18 = 6 + (71,42 - 6) \cdot e^{-\frac{3,14 \cdot K_{ср.} \cdot 0,704}{848 \cdot 1800 / 3600 \cdot 1968} \cdot 125000},$$

из которого находим: $K_{ср.} \cong 5,12 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$.

151. Для решения задачи можно было бы воспользоваться формулой (92), однако подставить в нее $K = 0$ непосредственно нельзя, поскольку параметр T_{\otimes} также зависит от K , причем так, что $T_{\otimes} \rightarrow \infty$ при $K \rightarrow 0$. Поэтому в формуле (92) следовало бы сделать предельный переход $K \rightarrow 0$. Проще, однако, воспользоваться исходным уравнением теплообмена, положив в нем K равным 0. Сделав это, получим:

$$\rho C_v v \cdot \frac{dT}{dx} = \rho g v \cdot i_0,$$

где i_0 – гидравлический уклон. Решив уравнение, найдем:

$$T(x) = T_0 + \frac{g \cdot i_0}{C_v} \cdot x \Rightarrow T_L - T_0 = \frac{g \cdot i_0 \cdot L}{C_v}.$$

Режим перекачки имеет следующие параметры:

$$v = \frac{4 \cdot 2200 / 3600}{3,14 \cdot 0,7^2} \cong 1,59 \text{ м/с}, \quad Re = \frac{1,59 \cdot 0,7}{25 \cdot 10^{-6}} \cong 44485,$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{44485}} \cong 0,0218, \quad i_0 = 0,0218 \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1,59^2}{2 \cdot 9,81} \cong 0,004.$$

Теперь можно рассчитать повышение $T_L - T_0$ температуры, происходящее за счет выделения тепла внутреннего трения:

$$T_L - T_0 = \frac{9,81 \cdot 0,004 \cdot 400000}{1950} \cong 4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

152. Согласно формуле (92), учитывающей распределение температуры нефти по длине трубопровода с учетом выделяющегося тепла внутреннего трения, $T(x) = \text{const.} = T_0$ только в том случае, если $T_0 - T_{\text{нар.}} - T_{\infty} = 0$ или

$$T_{\infty} = \frac{\rho g Q \cdot i_0}{\pi \cdot K \cdot d} = T_0 - T_{\text{нар.}}.$$

Отсюда находим, что коэффициент K должен удовлетворять условию:

$$K = \frac{\rho g Q \cdot i_0}{\pi \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}) \cdot d},$$

где i_0 – гидравлический уклон, равный в данном случае 0,003. Таким образом, имеем:

$$K = \frac{890 \cdot 9,81 \cdot 2200 / 3600 \cdot 0,003}{3,14 \cdot 25 \cdot 0,7} \cong 0,29 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

153. Коэффициент K теплопередачи от жидкости, движущейся в трубопроводе, к окружающему грунту определяется в данном случае формулой (94):

$$\frac{1}{K \cdot D} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{ст.}}} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D_{\text{нар.}}}{D} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}}},$$

в которой $d = D - 2\delta = 0,700$ м – внутренний диаметр трубы; $D_{\text{нар.}} = D + 2\delta_{\text{из.}} = 0,736$ м – диаметр трубы с изоляцией, а коэффициент α_2 теплопередачи через грунт в окружающий воздух рассчитывается по формуле (95) Форхгеймера:

$$\alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}} = \frac{2\lambda_{\text{гр.}}}{\ln \left[2H / D_{\text{нар.}} + \sqrt{(2H / D_{\text{нар.}})^2 - 1} \right]}.$$

Последовательно делая вычисления, имеем:

$$a. \alpha_2 \cdot D_{\text{нар.}} = \frac{2 \cdot 1,2}{\ln \left[2 \cdot 2 / 0,736 + \sqrt{(2 \cdot 2 / 0,736)^2 - 1} \right]} \cong 1,0 \text{ Вт/м}^0\text{С};$$

$$b. \alpha_1 \cdot d = 100 \cdot 0,7 = 70 \text{ Вт/м}^0\text{С};$$

$$c. \frac{1}{2\lambda_{\text{ст.}}} \cdot \ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2 \cdot 40} \cdot \ln \frac{0,72}{0,70} \cong 3,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^0\text{С/ Вт};$$

$$d. \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \cdot \ln \frac{D_{\text{нар.}}}{D} = \frac{1}{2 \cdot 0,5} \cdot \ln \frac{0,736}{0,720} \cong 0,022 \text{ м}^0\text{С/ Вт};$$

и, наконец:

$$\frac{1}{K \cdot 0,720} = \frac{1}{70} + 3,52 \cdot 10^{-4} + 0,022 + 1 = 1,0366 \text{ м}^0\text{С/ Вт},$$

откуда находим: $K \cong 1,34 \text{ Вт/м}^2\text{ }^0\text{С}$.

154. В данном случае можно использовать формулы:

а) Для случая отсутствия тепловой изоляции:

$$\frac{1}{K_1 \cdot D} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_1}, \text{ где } D_1 = D + 2\delta_{\text{из.}}$$

б) Для случая дополнительной тепловой изоляции:

$$\frac{1}{K_2 \cdot D} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{2\lambda_*} \ln \frac{D_*}{D_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_*}, \text{ где } D_* = D_1 - 2\delta_*.$$

Подставляя в каждую из этих формул численные значения параметров из условия задачи, получаем:

$$a) \frac{1}{K_1 \cdot 1,02} = \frac{1}{2 \cdot 0,7} \ln \frac{1,036}{1,02} + \frac{1}{2 \cdot 1,036},$$

откуда находим: $K_1 \cong 1,986 \text{ Вт/м}^2\text{ }^0\text{С}$.

б) Поскольку $K_2 = 0,5 \cdot K_1 = 0,993 \text{ Вт/м}^2\text{ }^0\text{С}$, то имеем:

$$\frac{1}{0,993 \cdot 1,02} = \frac{1}{2 \cdot 0,7} \ln \frac{1,036}{1,02} + \frac{1}{2 \cdot 0,1} \ln \frac{D_*}{1,036} + \frac{1}{2D_*},$$

откуда находим: $D_* \cong 1,443 \text{ м} \Rightarrow \delta_* = 0,5 \cdot (D_* - D_1) = 0,054 \text{ м}$
или 54 мм.

155. По формуле (91) В.Г. Шухова находим коэффициент K_0 теплопередачи от нефти, движущейся по надземному участку трубопровода, в окружающую среду при отсутствии тепловой изоляции. Подставив в эту формулу численные значения параметров, получим:

$$32 - 40 = (-20 - 40) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3,14 \cdot 0,7 \cdot K_0 \cdot 2000}{1800/3600 \cdot 850 \cdot 1950}\right) \right],$$

откуда находим $K_0 \cong 26,98 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$.

Для того чтобы температура нефти даже в самом критическом случае не снизилась более чем на 1°С , необходимо, чтобы коэффициент K_0 удовлетворял условию

$$39 - 40 \geq (-20 - 40) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3,14 \cdot 0,7 \cdot K \cdot 2000}{1800/3600 \cdot 850 \cdot 1950}\right) \right],$$

откуда $K \leq 3,17 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$. Принимаем $K_1 = K_{\max} = 3,17 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$.

Определим теперь толщину δ_* слоя тепловой изоляции ($D_* = D + 2\delta_*$). Имеем:

$$\frac{1}{K_1 D} = \frac{1}{K_0 D_*} + \frac{1}{2\lambda_*} \ln \frac{D_*}{D} \quad \text{или}$$

$$\frac{1}{3,17 \cdot 0,72} = \frac{1}{26,98 \cdot D_*} + \frac{1}{2 \cdot 0,2} \ln \frac{D_*}{0,72}.$$

Отсюда находим: $D_* \cong 0,85 \text{ м}$. Наконец, определяем δ_* :

$$\delta_* = 0,5 \cdot (0,85 - 0,72) = 0,065 \text{ м или } 65 \text{ мм}.$$

156. Суммарный коэффициент K теплопередачи в принятых допущениях определяется формулой:

$$\frac{1}{KD} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D + 2\delta_{\text{из.}}}{D} + \frac{1}{\alpha_2 (D + 2\delta_{\text{из.}})},$$

в которой $D = 0,72$ м, $D + 2\delta_{\text{из.}} = 0,82$ м, $\lambda_{\text{из.}} = 0,25$ Вт/м⁰С. Таким образом, в этой формуле неизвестен только коэффициент α_2 .

Для определения коэффициента α_2 теплопередачи от внешней поверхности слоя изоляции через грунт в воздух используем приближенную формулу (96):

$$\alpha_2 (D + 2\delta_{\text{из.}}) = \frac{2\lambda_{\text{гр.}}}{\ln \frac{2H}{D + 2\delta_{\text{из.}}} + \frac{\lambda_{\text{гр.}}}{\alpha_0 H}}$$

из которой вычисляем:

$$\alpha_2 (D + 2\delta_{\text{из.}}) = \frac{2 \cdot 1,8}{\ln \frac{2 \cdot 1,3}{0,82} + \frac{1,8}{8 \cdot 1,3}} \cong 2,7 \text{ Вт/м}^0\text{С.}$$

После этого вычисляем значение коэффициента K :

$$\frac{1}{K \cdot 0,72} = \frac{1}{2 \cdot 0,25} \ln \frac{0,82}{0,72} + \frac{1}{2,7} \cong 0,63 \Rightarrow K \cong 2,2 \text{ Вт/м}^2\text{}^0\text{С.}$$

Приравнивая удельные Q/π тепловые потоки от нефти в окружающую среду и от нефти к внешней поверхности слоя изоляции

$$\frac{Q_w}{\pi} = KD \cdot (T_{\text{неф.}} - T_{\text{возд.}}) = \alpha D \cdot (T_{\text{неф.}} - T_{\text{из.}}) = 1,54 \cdot (40 - 0) \cong 61,6 \text{ Вт/м}^2,$$

находим температуру $T_{\text{из.}}$ внешней поверхности слоя изоляции:

$$T_{\text{из.}} = T_{\text{неф.}} - \frac{KD}{\alpha D} \cdot (T_{\text{неф.}} - T_{\text{возд.}}),$$

где α – коэффициент теплопередачи через слой изоляции. Далее имеем:

$$\frac{1}{\alpha D} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из.}}} \ln \frac{D + 2\delta_{\text{из.}}}{D} = \frac{1}{2 \cdot 0,25} \ln \frac{0,82}{0,72} \cong 0,26,$$

$$\alpha D = 3,84 \text{ Вт/ м}^2\text{}^0\text{С.}$$

Таким образом:

$$T_{\text{из.}} = 40 - \frac{1,584}{3,84} \cdot (40 - 0) \cong 23,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Используя, наконец, приближенную формулу (97) для распределения температуры в грунте при стационарном тепловом режиме

$$T(y, z) = T_{\text{из.}} - \frac{Q_w}{2\pi\lambda_{\text{гр.}}} \ln \frac{r}{r_0},$$

где $r = \sqrt{y^2 + (z + H)^2}$; $r_0 = D/2$ – радиус трубы, а ее ось имеет координату $(0, -H)$. Вертикальная ось OZ системы отсчета проходит через центр трубы, горизонтальная ось OY располагается на поверхности грунта, причем точка O находится над центром трубопровода на расстоянии H над ним.

Распределение $T(y)$ температуры поверхности грунта (плоскости $z = 0$) имеет вид:

$$T(y) = T_{\text{из.}} - \frac{Q_w/\pi}{2\lambda_{\text{гр.}}} \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + H^2}}{D/2}.$$

Подставив сюда численные значения параметров, получим:

$$T(y) = 23,5 - \frac{61,6}{2 \cdot 1,8} \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + 1,69}}{0,36} \text{ или}$$

$$T(0) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + 1,69}}{0,36} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Максимальная температура на поверхности грунта достигается в точке $y = 0$, находящейся непосредственно над осью нефтепровода. Полагая $y = 0$, находим:

$$T(0) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{0^2 + 1,69}}{0,36} \cong +1,54 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

157. При решении предыдущей задачи была получена формула для распределения температуры поверхности грунта над местом залегания нефтепровода:

$$T(0) = 23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{y^2 + 1,69}}{0,36} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Примем, что на границах образовавшейся полосы, отделяющих покрытую снегом землю от непокрытой, температура грунта равна $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, тогда для определения полуширины h образовавшейся незаслуженной полосы получаем уравнение:

$$23,5 - 17,1 \cdot \ln \frac{\sqrt{h^2 + 1,69}}{0,36} = 0.$$

Решив это уравнение, найдем: $h \cong 0,334 \text{ м}$ или $2h \cong 0,67 \text{ м}$.

158. Найдем сначала по формуле (89) зависимость $v(T)$ вязкости нефти от температуры. Имеем:

$$v(T) = 15 \cdot e^{-k(T-60)},$$

где учтено, что $v(60) = 15 \text{ сСт}$. Второе условие $v(20) = 40 \text{ сСт}$ дает для коэффициента k уравнение:

$$40 = 15 \cdot e^{-k(20-60)},$$

из которого находим $k \cong 0,02452 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Поскольку скорость v перекачки известна:

$$v = \frac{4 \cdot 1800 / 3600}{3,14 \cdot 0,7^2} \cong 1,30 \text{ м/с},$$

то используя формулу (91) В.Г. Шухова, можно вычислить средний по участку коэффициент K теплопередачи:

$$25 = 10 + (60 - 10) \cdot e^{-\frac{4 \cdot K \cdot 135000}{860 \cdot 1,3 \cdot 0,7 \cdot 1950}},$$

откуда находим:

$$K = -\frac{1,3 \cdot 0,7 \cdot 860 \cdot 1950}{4 \cdot 135000} \cdot \ln \frac{25 - 10}{60 - 10} \cong 3,4 \text{ Вт/м}^2\text{ } ^\circ\text{C}.$$

Потери напора на рассматриваемом участке вычисляем по модифицированной формуле Дарси-Вейсбаха (99):

$$h_{\tau} = \lambda_{\text{эф.}} \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где $\lambda_{\text{эф.}}$ – эффективный коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий переменность температуры по длине участка.

Сначала вычисляем вспомогательные величины:

$$v_{\text{нар.}} = 15 \cdot e^{-0,02452 \cdot (10-60)} \cong 51,1 \text{ сСт},$$

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,3 \cdot 0,7 / (51,1 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0274,$$

$$k = \kappa / 4 \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}) = 0,02452 / 4 \cdot (60 - 10) \cong 0,307,$$

$$m = 4K \cdot L / (\rho v d C_v) = 4 \cdot 3,4 \cdot 135000 / (860 \cdot 1,3 \cdot 0,7 \cdot 1950) \cong 1,203$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,307 \cdot \exp(-1,203) \cong 0,092,$$

$$\text{Ei}(-0,307) \cong -0,889; \text{Ei}(-0,092) \cong -1,899.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = \lambda_{\text{нар.}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [\text{Ei}(-k) - \text{Ei}(-k e^{-m})],$$

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,0274 \cdot \frac{1}{1,203} [-0,889 - (-1,899)] \cong 0,023.$$

Наконец, рассчитываем потери h_{τ} напора:

$$h_{\tau} = 0,023 \cdot \frac{135000}{0,7} \cdot \frac{1,3^2}{2 \cdot 9,81} \cong 382 \text{ м.}$$

Интересно отметить, что если бы нефть имела начальную температуру 60°C на всем протяжении участка, то потери h_{τ} напора составили бы 335 м, что на 47 м меньше, чем в действительности.

159. Потери напора на рассматриваемом участке вычисляем по модифицированной формуле Дарси-Вейсбаха (99):

$$h_{\tau} = \lambda_{\text{эф.}} \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

в которой $\lambda_{\text{эф.}}$ – эффективный коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий переменность температуры потока по длине участка:

$$\lambda_{\text{эф.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{v \cdot d/v_{\text{нар.}}}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [Ei(-k) - Ei(-ke^{-m})], \text{ где}$$

$$k = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}), m = \frac{\pi K d \cdot L}{\rho Q C_v} = \frac{4K \cdot L}{\rho v C_v d}.$$

В данном случае имеем:

$$v_{\text{нар.}} = 12 \cdot e^{-0,04(10-50)} \cong 59,44,$$

$$k = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}) = \frac{0,04}{4} \cdot (60 - 10) = 0,5.$$

По условию задачи требуется определить потери напора для убывающей последовательности расходов: 1000, 800 и 600 м³/ч или соответствующих им скоростей 1,339; 1,071 и 0,804 м/с.

1) Пусть $v_1 = 1,339$ м/с. Тогда имеем:

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,339 \cdot 0,514 / (59,44 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0305;$$

$$k = 0,5;$$

$$m = 4K \cdot L / (\rho v d C_v) = 4 \cdot 3,5 \cdot 140000 / (900 \cdot 1,339 \cdot 0,514 \cdot 2000) \cong 1,582;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,5 \cdot \exp(-1,582) \cong 0,103,$$

$$Ei(-0,5) \cong -0,560; Ei(-0,103) \cong -1,796.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,0305 \cdot \frac{1}{1,582} [-0,560 - (-1,796)] \cong 0,0238.$$

Наконец, рассчитываем потери h_{τ} напора:

$$h_{\tau} = 0,0238 \cdot \frac{140000}{0,514} \cdot \frac{1,339^2}{2 \cdot 9,81} \cong 592 \text{ м.}$$

2) Пусть $v_2 = 1,071$ м/с. Тогда имеем:

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,071 \cdot 0,514 / (59,44 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,032; k = 0,5;$$

$$m = 4 \cdot 3,5 \cdot 140000 / (900 \cdot 1,071 \cdot 0,514 \cdot 2000) \cong 1,978;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,5 \cdot \exp(-1,978) \cong 0,0692,$$

$$\text{Ei}(-0,5) \cong -0,560; \text{Ei}(-0,0692) \cong -2,16.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,032 \cdot \frac{1}{1,978} \cdot [-0,560 - (-2,16)] \cong 0,02588.$$

Наконец, рассчитываем потери h_{τ} напора:

$$h_{\tau} = 0,02588 \cdot \frac{140000}{0,514} \cdot \frac{1,071^2}{2 \cdot 9,81} \cong 412 \text{ м.}$$

3) Пусть $v_1 = 0,804$ м/с. Тогда имеем:

$$\lambda_{\text{нар.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{0,804 \cdot 0,514 / (59,44 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0346; k = 0,5;$$

$$m = 4 \cdot 3,5 \cdot 140000 / (900 \cdot 0,804 \cdot 0,514 \cdot 2000) \cong 2,635;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,5 \cdot \exp(-2,635) \cong 0,036,$$

$$\text{Ei}(-0,5) \cong -0,560; \text{Ei}(-0,036) \cong -2,8.$$

После этого находим эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$:

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,0346 \cdot \frac{1}{2,635} \cdot [-0,560 - (-2,8)] \cong 0,0294.$$

Наконец, рассчитываем потери h_{τ} напора

$$h_{\tau} = 0,0294 \cdot \frac{140000}{0,514} \cdot \frac{0,804^2}{2 \cdot 9,81} \cong 263,8 \text{ м}$$

и температуру T_L в конце участка трубопровода:

$$T_L = 10 + (60 - 10) \cdot \exp(-2,635) \cong 13,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

160. Найдем сначала по формуле (89) зависимость $\nu(T)$ вязкости нефти от температуры. Имеем:

$$\nu(T) = 5 \cdot e^{-\kappa(T-50)},$$

где учтено, что $\nu(50) = 5$ сСт. Второе условие $\nu(20) = 40$ сСт дает для коэффициента κ уравнение:

$$40 = 5 \cdot e^{-\kappa(20-50)},$$

из которого находим $\kappa \cong 0,0693 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Далее составляем уравнение баланса напоров:

$$2 \cdot [273 - 0,125 \cdot 10^{-4} Q^2] = \lambda_{\text{эф.}} \cdot \frac{120000}{0,7} \cdot \frac{\nu^2}{2 \cdot 9,81}.$$

В нем использован эффективный коэффициент $\lambda_{\text{эф.}}$ гидравлического сопротивления, учитывающий переменность температуры по длине участка, см. формулы (99):

$$\lambda_{\text{эф.}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\nu \cdot d / \nu_{\text{нар.}}}} \cdot \frac{1}{m} \cdot [Ei(-\kappa) - Ei(-\kappa e^{-m})], \text{ где}$$

$$\kappa = \frac{\kappa}{4} \cdot (T_0 - T_{\text{нар.}}), m = \frac{\pi K d \cdot L}{\rho Q C_v} = \frac{4K \cdot L}{\rho \nu C_v d}.$$

Подставляя в уравнение баланса напоров выражение для расхода Q через скорость ν перекачки

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4} \cdot \nu \cdot 3600,$$

а также учитывая другие данные условия, получаем уравнение:

$$546 = \nu^2 \cdot (8737,4 \cdot \lambda_{\text{эф.}} + 47,94). \quad (*)$$

Полученное уравнение решаем методом итераций (последовательных приближений).

1-е приближение. В качестве 1-го приближения положим $\lambda_{\text{эф.}}^{(1)} = 0,02$. Тогда из уравнения (*) находим скорость

течения жидкости: $v^{(1)} = 1,566$ м/с. Затем проверяем справедливость сделанного допущения. Имеем:

$$v_{нар.} = 5 \cdot \exp[-0,0693 \cdot (10 - 50)] = 79,95 \text{ сСт};$$

$$\lambda_{нар.} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,566 \cdot 0,7 / (79,95 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0292;$$

$$k = 1/4 \cdot 0,0693 \cdot (50 - 10) = 0,693;$$

$$m = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 120000}{1,566 \cdot 0,7 \cdot 870 \cdot 2000} \cong 0,881;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,693 \cdot \exp(-0,881) \cong 0,287;$$

$$\lambda_{эф.} = 0,0292 \cdot \frac{1}{0,881} \cdot [\text{Ei}(-0,693) - \text{Ei}(-0,287)] =$$

$$= 0,0292 \cdot \frac{1}{0,881} \cdot [-0,379 - (-0,939)] \cong 0,0186 < \lambda_{эф.} = 0,02.$$

Поскольку между принятым и рассчитанным $\lambda_{эф.}$ существует различие, сделаем второе приближение.

2-е приближение. Положим $\lambda_{эф.}^{(2)} = 0,0186$. Тогда из уравнения (*) находим новую скорость течения жидкости: $v^{(2)} = 1,611$ м/с. После этого опять проверяем справедливость сделанного допущения. Имеем:

$$k = 0,0693 \text{ л}^0/\text{С}; \quad v_{нар.} = 79,95 \text{ сСт};$$

$$\lambda_{нар.} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{1,611 \cdot 0,7 / (79,95 \cdot 10^{-6})}} \cong 0,0290;$$

$$k = 1/4 \cdot 0,0693 \cdot (50 - 10) = 0,693;$$

$$m = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 120000}{1,611 \cdot 0,7 \cdot 870 \cdot 2000} \cong 0,856;$$

$$k \cdot \exp(-m) = 0,693 \cdot \exp(-0,856) \cong 0,294;$$

$$\lambda_{\text{эф.}} = 0,029 \cdot \frac{1}{0,856} \cdot [\text{Ei}(-0,693) - \text{Ei}(-0,294)] =$$

$$= 0,029 \cdot \frac{1}{0,856} \cdot [-0,379 - (-0,921)] \cong 0,0184 \approx 0,0186 = \lambda_{\text{эф.}}^{(2)}.$$

Поскольку для принятого и рассчитанного коэффициентов $\lambda_{\text{эф.}}$ получено хорошее совпадение, процесс последовательных приближений заканчивается. Таким образом, $v \cong 1,611$ м/с и, следовательно, $Q = 2231$ м³/ч. При этом температура нефти в конце участка рассчитывается по формуле (91) В.Г. Шухова:

$$T_L = 10 + (50 - 10) \cdot \exp(-0,856) \cong 27^0 \text{C}.$$

2.10. Физические свойства природных газов

161. Молярная масса μ газовой смеси рассчитывается по последней из формул (105):

$$\mu = \sum_{j=1}^{j=3} x_j \mu_j = 16,042 \cdot 0,99 + 28,016 \cdot 0,005 + 30,068 \cdot 0,005 = 16,172,$$

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8314}{16,172} \cong 514,1 \text{ Дж}/(\text{кг К}).$$

162. Задача решается аналогично предыдущей.

$$\mu = \sum_{j=1}^{j=3} x_j \mu_j = 16,042 \cdot 0,88 + 28,016 \cdot 0,02 + 30,068 \cdot 0,06 +$$

$$+ 44,094 \cdot 0,04 = 18,245$$

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8314}{18,245} \cong 455,7 \text{ Дж}/(\text{кг К}).$$

163. Используя закон (101) Клапейрона-Менделеева

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R_0 T,$$

получаем уравнение для определения массы m газа

$$101300 \cdot 10^5 = \frac{m}{19,2} \cdot 8314 \cdot 293,$$

из которого находим: $m \cong 79842$ кг.

164. Используя формулу (101), получаем:

$$101300 \cdot 2,5 \cdot 10^5 = \frac{m}{18,5} \cdot 8314 \cdot 293.$$

Отсюда находим: $m \cong 192,328$ кг.

165. Нормальные условия (н) отличаются от стандартных (с) температурой: в первом случае она равна 0°C , во втором $+20^\circ\text{C}$. Имеем:

$$p_{\text{атм.}} \cdot V_{\text{н.}} = \frac{m}{\mu} \cdot R_0 T_{\text{н.}}; p_{\text{атм.}} \cdot V_{\text{с.}} = \frac{m}{\mu} \cdot R_0 T_{\text{с.}}$$

Следовательно, $V_{\text{н.}}/V_{\text{с.}} = T_{\text{н.}}/T_{\text{с.}}$. Отсюда получаем:

$$\frac{V_{\text{н.}}}{V_{\text{с.}}} = \frac{273}{273 + 20} \cong 0,93174 \text{ или } V_{\text{н.}} = 0,93174 \cdot 10^4 = 9317,4 \text{ м}^3.$$

166. Аналогично решению предыдущей задачи, имеем:

$V_{\text{н.}}/V_{\text{с.}} = T_{\text{н.}}/T_{\text{с.}}$. Отсюда получаем:

$$V_{\text{с.}} = V_{\text{н.}} \frac{T_{\text{с.}}}{T_{\text{н.}}} = 5 \cdot 10^4 \cdot \frac{273 + 20}{273} \cong 53663 \text{ м}^3.$$

167. Согласно закону Клапейрона-Менделеева, имеем:

$$p_{\text{дн.}} V_{\text{р.}} = RT_{\text{дн.}}; p_{\text{нч.}} V_{\text{р.}} = RT_{\text{нч.}} \Rightarrow p_{\text{дн.}}/p_{\text{нч.}} = T_{\text{дн.}}/T_{\text{нч.}}$$

Здесь индексы *дн.* и *нч.* относятся к значениям дневных и ночных параметров газа, соответственно. Далее имеем:

$$\frac{p_{\text{дн.}}}{p_{\text{нч.}}} = \frac{273 + 20}{273 + 8} \cong 1,0427, \text{ то есть } p_{\text{дн.}} = 1,0427 \cdot p_{\text{нч.}}$$

Кроме того, известно, что $1/2 \cdot (p_{\text{дн.}} + p_{\text{нч.}}) = 0,11$ МПа. С учетом этого условия имеем систему уравнений для определения давлений $p_{\text{дн.}}$ и $p_{\text{нч.}}$:

$$\begin{cases} p_{\text{дн.}} + p_{\text{нч.}} = 0,22, \\ p_{\text{дн.}} = 1,0427 \cdot p_{\text{нч.}} \end{cases}$$

Решив эту систему, получим: $p_{\text{нч.}} = 0,1077$ МПа, $p_{\text{дн.}} = 0,1123$ МПа. Таким образом, суточные колебания давления составляют $\pm 0,0023$ МПа.

168. Согласно закону Клапейрона-Менделеева

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R_0 T.$$

Поскольку величины V, m, μ неизменны, то

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1},$$

где индекс 1 относится к начальному состоянию газа, а индекс 2 – к новому. Отсюда имеем:

$$p_2 = 0,12 \cdot \frac{273 + 30}{273 + 15} \cong 0,1263 \text{ МПа.}$$

169. Поровый объем $V_{\text{п.}}$ газа определяется формулой

$$V_{\text{п.}} = m \cdot s \cdot \text{пab} \cdot h,$$

где пab – площадь эллипса. В данном случае:

$$V_{\text{п.}} = 0,3 \cdot 0,65 \cdot 3,14 \cdot 3000 \cdot 2000 \cdot 15 \cong 55,1 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Масса M газа в газовой полости ПХГ вычисляется по формуле $M = \rho V_{\text{п.}}$, где ρ – плотность газа в пластовых условиях. Имеем:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot \frac{10 \cdot 10^6}{4,7 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{273 + 30}{200} \right)^{-3,668} \cong 0,802;$$

$$\rho = \frac{p}{ZRT} = \frac{10 \cdot 10^6}{0,802 \cdot 470 \cdot 303} \cong 87,556 \text{ кг/м}^3;$$

$$M = \rho V_{\text{п.}} = 87,556 \cdot 55,1 \cdot 10^6 \cong 4,824 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

Плотность $\rho_{\text{ст.}}$ газа при стандартных условиях рассчитывается по формуле $\rho_{\text{ст.}} = p_{\text{ст.}}/RT_{\text{ст.}}$ (здесь $Z_{\text{ст.}} = 1$). Имеем:

$$\rho_{\text{ст.}} = \frac{0,1013 \cdot 10^6}{470 \cdot 293} \cong 0,736 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, объем $V_{\text{ст.}}$ газа, выраженный в стандартных кубических метрах, определяется равенствами:

$$V_{\text{ст.}} = \frac{M}{\rho_{\text{ст.}}} = \frac{4,824 \cdot 10^9}{0,736} \cong 6,554 \cdot 10^9 \text{ м}^3.$$

170. Поровый объем $V_{\text{п.}}$ вмещающих пород, занятых газом в конце периода отбора, вычисляется следующим образом:

$$V_{\text{п.}} = m \cdot s \cdot \text{пabh} = 0,3 \cdot 0,35 \cdot 3,14 \cdot 3000 \cdot 2000 \cdot 15 \cong 29,673 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Масса M газа в хранилище рассчитывается так же, как и в предыдущей задаче:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot \frac{8,5 \cdot 10^6}{4,7 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{273 + 30}{200} \right)^{-3,668} \cong 0,832;$$

$$\rho = \frac{p}{ZRT} = \frac{8,5 \cdot 10^6}{0,832 \cdot 470 \cdot 303} \cong 71,739 \text{ кг/м}^3;$$

$$M = \rho V_{\text{п.}} = 71,739 \cdot 29,673 \cdot 10^6 \cong 2,129 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

Плотность $\rho_{\text{ст.}}$ газа при стандартных условиях была найдена при решении предыдущей задачи: $\rho_{\text{ст.}} = 0,736 \text{ кг/м}^3$, поэтому его объем $V_{\text{ст.}}$, выраженный в стандартных кубических метрах, находится согласно равенству $M = \rho_{\text{ст.}} V_{\text{ст.}}$:

$$V_{\text{ст.}} = \frac{M}{\rho_{\text{ст.}}} = \frac{2,129 \cdot 10^9}{0,736} \cong 2,893 \cdot 10^9 \text{ м}^3.$$

Учитывая результаты расчетов, полученные при решении предыдущей задачи, находим, что из ПХГ отобрано $(6,554 - 2,893) \cdot 10^9 = 3,661 \cdot 10^9 \text{ м}^3$, что составляет примерно 56 % объема газа, находившегося в хранилище первоначально.

171. Используя закон (101) Клапейрона-Менделеева

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R_0 T,$$

получаем уравнение для определения массы m газа

$$1,5 \cdot 10^6 \cdot 100000 = \frac{m}{19,5} \cdot 8314 \cdot (273 + 25),$$

из которого находим: $m \cong 1180591 \text{ кг} \approx 1180,6 \text{ т}$.

172. Критическая температура метана составляет 190,55 К. При более высоких температурах, метан может находиться только в газообразном состоянии *вне зависимости от давления*.

Критические параметры метана равны, как известно: $p_{\text{кр.}} = 4,641 \text{ МПа}$, $T_{\text{кр.}} = 190,55 \text{ К}$ (или $-82,45 \text{ }^\circ\text{C}$). Таким образом, при давлении 20 МПа, которое намного *выше* критического, и температуре $-110 \text{ }^\circ\text{C}$ (или 163 К), которое намного *ниже* критического, газ находится в жидком состоянии.

173. Средние значения критического давления и критической температуры смеси можно рассчитать по формулам (105):

$$p_{\text{кр.см.}} = 4,641 \cdot 0,94 + 4,913 \cdot 0,04 + 3,396 \cdot 0,02 \cong 4,627 \text{ МПа},$$

$$T_{\text{кр.см.}} = 190,55 \cdot 0,94 + 305,5 \cdot 0,04 + 126,25 \cdot 0,02 \cong 193,86 \text{ К}.$$

174. Средние значения критического давления и критической температуры смеси рассчитываются по формулам (105):

$$p_{\text{кр.см.}} = 4,641 \cdot 0,92 + 4,913 \cdot 0,04 + 3,396 \cdot 0,02 + 8,721 \cdot 0,01 + 7,382 \cdot 0,01 \cong 4,695 \text{ МПа},$$

$$T_{\text{кр.см.}} = 190,55 \cdot 0,92 + 305,5 \cdot 0,04 + 126,25 \cdot 0,02 + 373,56 \cdot 0,01 + 304,19 \cdot 0,01 \cong 196,83 \text{ К.}$$

Затем определяем приведенные параметры газа \bar{p} и \bar{T} :

$$\bar{p} = \frac{6,5}{4,695} \cong 1,384, \bar{T} = \frac{273+25}{196,83} \cong 1,514.$$

Наконец, по формуле (104) вычисляем $Z(\bar{p}, \bar{T})$:

$$Z(\bar{p}, \bar{T}) = 1 - 0,4273 \cdot 1,384 \cdot 1,514^{-3,668} \cong 0,871.$$

175. Сначала рассчитываются молярная масса и газовая постоянная смеси:

$$\mu = 16,042 \cdot 0,92 + 30,068 \cdot 0,04 + 58,12 \cdot 0,02 + 28,016 \cdot 0,01 + 34,900 \cdot 0,01 \cong 17,753 \text{ кг/кмоль,}$$

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8314}{17,753} \cong 468,3 \text{ Дж/кг К.}$$

Затем определяются средние значения критических параметров газовой смеси:

$$p_{\text{кр.см.}} = 4,641 \cdot 0,92 + 4,913 \cdot 0,04 + 3,570 \cdot 0,02 + 3,396 \cdot 0,01 + 8,721 \cdot 0,01 \cong 4,659 \text{ МПа,}$$

$$T_{\text{кр.см.}} = 190,55 \cdot 0,92 + 305,5 \cdot 0,04 + 407,90 \cdot 0,02 + 126,25 \cdot 0,01 + 373,56 \cdot 0,01 \cong 200,68 \text{ К.}$$

Рассчитываются приведенные параметры газовой смеси:

$$\bar{p} = \frac{7,0}{4,659} \cong 1,502, \bar{T} = \frac{273+15}{200,68} \cong 1,435$$

и по формуле (104) вычисляется коэффициент $Z(\bar{p}, \bar{T})$ сжимаемости:

$$Z(\bar{p}, \bar{T}) = 1 - 0,4273 \cdot 1,502 \cdot 1,435^{-3,668} \cong 0,829.$$

После этого находится плотность ρ газа:

$$\rho = \frac{p}{ZRT} = \frac{7 \cdot 10^6}{0,829 \cdot 468,3 \cdot 288} \cong 62,61 \text{ кг/м}^3.$$

176. Уравнение равновесия газа, находящегося в скважине под действием собственного веса имеет вид:

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g,$$

где $p(y)$ – давление; $\rho = p/ZRT$ – плотность газа; g – ускорение силы тяжести, а ось Y направлена вертикально вверх. Отсюда получаем дифференциальное уравнение для p :

$$\frac{dp}{dy} = -\frac{p}{Z} \cdot \frac{g}{RT} \quad \text{или} \quad \frac{dp}{dy} = -\frac{p}{1 - 0,4273 \cdot \bar{p} \cdot \bar{T}^{-3,668}} \cdot \frac{g}{RT}.$$

Разделив обе части уравнения на $p_{кр.}$, получим:

$$\left(\frac{1}{\bar{p}} - 0,4273 \cdot \bar{T}^{-3,668} \right) d\bar{p} = -\frac{g}{RT} dy.$$

Интегрируя это уравнение по \bar{p} от $p_{зб.}/p_{кр.}$ до $p_{уст.}/p_{кр.}$ и по y от 0 до L , где L – глубина скважины, получаем:

$$\ln \frac{\bar{p}_{уст.}}{\bar{p}_{зб.}} - 0,4273 \cdot \bar{T}^{-3,668} \cdot (\bar{p}_{уст.} - \bar{p}_{зб.}) = -\frac{gL}{RT}$$

$$\text{или } 0,4273 \cdot \bar{T}^{-3,668} \cdot \bar{p}_{уст.} \left(\frac{\bar{p}_{зб.}}{\bar{p}_{уст.}} - 1 \right) - \ln \frac{\bar{p}_{зб.}}{\bar{p}_{уст.}} = -\frac{gL}{RT}.$$

Подставив сюда исходные данные из условия задачи, найдем:

$$0,4273 \cdot \left(\frac{303}{195} \right)^{-3,668} \cdot \frac{7,0}{4,7} \cdot (x - 1) - \ln x = -\frac{9,81 \cdot 1000}{470 \cdot 303},$$

где $x = p_{зб.}/p_{уст.}$. Отсюда получаем трансцендентное уравнение:

$$0,12637 \cdot x - \ln x = 0,05748,$$

которое решаем методом последовательных приближений. В результате решения находим: $x \cong 1,083$. Следовательно, давление $p_{зб.} = 1,083 \cdot p_{уст.} = 1,083 \cdot 7,0 \cong 7,58$ МПа.

Таким образом, давление на забое 1000-м скважины на 0,58 МПа (≈ 6 атм.) больше, чем на ее устье. Эта разность обусловлена весом газового столба в скважине.

177. 1) Поскольку газ считается совершенным, справедливы следующие равенства:

$$p_n = \rho_n \cdot R T_n, \quad p_k = \rho_k \cdot R T_k \Rightarrow \frac{p_n}{p_k} = \frac{\rho_n}{\rho_k} \cdot \frac{T_n}{T_k},$$

где индекс н. обозначает параметр газа в начале участка газопровода, а к. – в его конце.

Далее имеем:

$$\frac{\rho_n}{\rho_k} = \frac{p_n}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_n} = \frac{5,5 \cdot 283}{3,5 \cdot 303} \cong 1,468.$$

2) Откажемся теперь от предположения о совершенности газа. Уравнение состояния в этом случае будет иметь вид: $p = Z(\bar{p}, \bar{T}) \cdot \rho R T$. Поэтому вычислим приведенные параметры газа в начале и в конце участка газопровода. Имеем:

$$\bar{p}_n = 5,5/4,6 \cong 1,196, \quad \bar{T}_n = 303/190 \cong 1,595;$$

$$\bar{p}_k = 3,5/4,6 \cong 0,761, \quad \bar{T}_k = 283/190 \cong 1,489.$$

Далее находим коэффициент Z сжимаемости газа:

$$Z_n = 1 - 0,4273 \cdot 1,196 \cdot 1,595^{-3,668} \cong 0,908,$$

$$Z_k = 1 - 0,4273 \cdot 0,761 \cdot 1,489^{-3,668} \cong 0,925.$$

После этого вычисляем отношение плотностей газа:

$$\frac{\rho_n}{\rho_k} = \frac{p_n}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_n} \cdot \frac{Z_k}{Z_n} = \frac{5,5 \cdot 283 \cdot 0,925}{3,5 \cdot 303 \cdot 0,908} \cong 1,495.$$

178. Согласно второй из формул (107), имеем:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \varepsilon^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

где T_2 – температура газа на выходе из нагнетателя;
 $T_1 = 288 \text{ К}$ – температура на его входе. Отсюда находим:

$$T_2 = 288 \cdot 1,6^{\frac{1,34-1}{1,34}} \cong 324,5 \text{ К}.$$

Таким образом, в результате адиабатического сжатия температура газа увеличивается примерно на $36,5^\circ \text{С}$.

179. В политропическом процессе давление p и температура T газа связаны уравнением

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}},$$

где p_1, T_1 – давление и температура газа, соответствующие некоторому (исходному) состоянию; а m – показатель политропы. Поскольку

$$\frac{p}{p_1} = 1,4, \quad \frac{T}{T_1} = \frac{273+30}{273+10} \cong 1,0707,$$

то имеем уравнение для определения m :

$$1,0707 = 1,4^{\frac{m-1}{m}} \Rightarrow \frac{m-1}{m} = \log_{1,4} 1,0707 = \frac{\ln 1,0707}{\ln 1,4} \cong 0,203.$$

Отсюда находим: $m \cong 1,255$.

180. Сначала поступаем так же, как и при решении предыдущей задачи – находим коэффициент m политропы:

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \Rightarrow \frac{273+38}{273+15} = 1,57^{\frac{m-1}{m}} \Rightarrow 1,0799 = 1,57^{\frac{m-1}{m}}.$$

Отсюда находим:

$$\frac{m-1}{m} = \log_{1,57} 1,0799 = \frac{\ln 1,0799}{\ln 1,57} \cong 0,17 \Rightarrow m \cong 1,21.$$

Поскольку, согласно (108) в политропическом процессе

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{m-1} \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{T}{T_1} \right)^{\frac{1}{m-1}}, \text{ то } \frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{311}{288} \right)^{\frac{1}{1,21-1}} \cong 1,44.$$

2.11. Стационарные режимы работы простых газопроводов

181. Используем формулу для распределения $p(x)$ давления на участке газопровода:

$$p^2(x) = p_n^2 - (p_n^2 - p_k^2) \cdot \frac{x}{L}$$

или

$$p(x) = p_n \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{p_k^2}{p_n^2} \right) \cdot \frac{x}{L}} \Rightarrow p(x) = 5,5 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{3,5^2}{5,5^2} \right) \cdot \frac{x}{L}}$$

Последовательно подставляя сюда $x/L = \{1/5, 2/5, 3/5, 4/5\}$, находим: $p(20) = 5,16$ МПа; $p(40) = 4,80$ МПа; $p(60) = 4,41$ МПа; $p(80) = 3,98$ МПа.

Для нахождения распределения $v(x)$ скорости газа используем условие постоянства массового расхода \dot{M} по длине газопровода:

$$\dot{M}/S_0 = \rho(x) \cdot v(x) = \frac{p(x)}{ZRT} \cdot v(x) = \text{const.},$$

где S_0 – площадь сечения газопровода. Если $Z = \text{const.}$, $T = \text{const.}$, то $p(x) \cdot v(x) = \text{const.} = p_n \cdot v_n$, то есть скорость течения газа обратно пропорциональна давлению. Отсюда имеем: $v(x) = p_n \cdot v_n / p(x)$ или $v(x) = 5,5 \cdot 5,0 / p(x)$, где p измеряется в МПа, а v – в м/с. Подставляя последовательно найденные значения $p(x)$, находим: $v(20) \cong 5,33$ МПа;

$v(40) \cong 5,73$ м/с; $v(60) \cong 6,24$ м/с; $v(80) \cong 6,91$ м/с и $v(100) \cong 7,86$ м/с.

182. Поскольку массовый расход \dot{M} газа при стационарном режиме перекачки не изменяется по длине газопровода, имеем:

$$\frac{\dot{M}}{S_0} = \rho_n \cdot v_n = \rho_k \cdot v_k,$$

где S_0 – площадь сечения газопровода. Отсюда заключаем:

$$\frac{v_k}{v_n} = \frac{\rho_n}{\rho_k} = \frac{p_n / (Z_n \cdot R T_n)}{p_k / (Z_k \cdot R T_k)} = \frac{p_n \cdot Z_k \cdot T_k}{p_k \cdot Z_n \cdot T_n} = \frac{5,2 \cdot 283 \cdot Z_k}{3,5 \cdot 308 \cdot Z_n} \cong 1,365 \cdot \frac{Z_k}{Z_n}.$$

Далее имеем:

$$Z_n = 1 - 0,4273 \cdot (5,2/4,7) \cdot (308/194)^{-3,668} \cong 0,913;$$

$$Z_k = 1 - 0,4273 \cdot (3,5/4,7) \cdot (283/194)^{-3,668} \cong 0,920.$$

Следовательно: $v_k/v_n = 1,365 \cdot 0,920/0,913 \cong 1,375$.

183. Используем формулу для распределения $p(x)$ давления на участке газопровода:

$$p^2(x) = p_n^2 - (p_n^2 - p_k^2) \frac{x}{L} \text{ или } p(x) = \sqrt{p_n^2 - (p_n^2 - p_k^2) \frac{x}{L}}.$$

Отсюда имеем:

$$p(L/2) = \sqrt{7,5^2 - (7,5^2 - 4,0^2) \cdot 0,5} \cong 6,0 \text{ МПа.}$$

184. Аналогично решению предыдущей задачи имеем:

$$p(x) = \sqrt{p_n^2 - (p_n^2 - p_k^2) \frac{x}{L}}.$$

Полагая в этой формуле $x/L = 1/3$, находим:

$$p(L/3) = \sqrt{7,5^2 - (7,5^2 - 4,0^2) \cdot 1/3} \cong 6,54 \text{ МПа.}$$

185. Используя формулу (112) для среднего на участке газопровода давления p_{cp} , имеем:

$$\rho_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_{\text{к.}}} \right) = \frac{2}{3} \cdot \left(5,2 + \frac{3,5^2}{5,2 + 3,5} \right) \cong 4,405 \text{ МПа.}$$

186. Найдем сначала плотность $\rho_{\text{ср.}}$ газа при *стандартных* условиях:

$$\rho_{\text{ср.}} = \frac{P_{\text{ср.}}}{R \cdot T_{\text{ср.}}} = \frac{P_{\text{ср.}}}{R_0/\mu \cdot T_{\text{ср.}}} = \frac{0,1013 \cdot 10^6}{8314/17,1 \cdot 293} \cong 0,711 \text{ кг/м}^3.$$

Затем вычислим массовый расход \dot{M} газа:

$$\dot{M} = \rho_{\text{ср.}} \cdot Q_{\text{к}} = 0,711 \cdot \frac{25 \cdot 10^6}{24 \cdot 3600} \cong 205,8 \text{ кг/с.}$$

Найдем плотность $\rho_{\text{в.}}$ газа на входе в нагнетатель:

$$\rho_{\text{в.}} = \frac{p_{\text{в.}}}{Z_{\text{в.}} \cdot R \cdot T_{\text{в.}}} = \frac{3,7 \cdot 10^6}{Z_{\text{в.}} \cdot 8314/17,1 \cdot 288}.$$

Вычисляем коэффициент $Z_{\text{в.}}$ сжимаемости по параметрам газа на входе в нагнетатель. Имеем:

$$Z_{\text{в.}} = 1 - 0,4273 \cdot (3,7/4,7) \cdot (288/194)^{-3,668} \cong 0,92.$$

Следовательно:

$$\rho_{\text{в.}} = \frac{3,7 \cdot 10^6}{0,92 \cdot 8314/17,1 \cdot 288} \cong 28,722 \text{ кг/м}^3.$$

Теперь можно вычислить объемный расход $Q_{\text{в.}}$ на входе в нагнетатель:

$$Q_{\text{в.}} = \frac{\dot{M}}{\rho_{\text{в.}}} = \frac{205,8}{28,722} \cong 7,163 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 430 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

187. В предыдущей задаче был найден объемный расход газа $Q_{\text{в.}} = 430 \text{ м}^3/\text{мин}$ на входе в нагнетатель. Аналогично этому находится объемный расход $Q_{\text{н.}}$ газа на выходе из нагнетателя. Имеем: $\rho_{\text{ср.}} = 0,711 \text{ кг/м}^3$ и $\dot{M} = 205,8 \text{ кг/с}$ (см. решение предыдущей задачи).

Сначала рассчитываем коэффициент $Z_{\text{н.}}$ сжимаемости газа по его параметрам на выходе из нагнетателя:

$$Z_{\text{н.}} = 1 - 0,4273 \cdot (5,2/4,7) \cdot (308/194)^{-3,668} \cong 0,91$$

и после этого - плотность $\rho_{\text{н.}}$ газа в том же сечении:

$$\rho_{\text{н.}} = \frac{5,2 \cdot 10^6}{0,91 \cdot 8314/17,1 \cdot 308} \cong 38,159 \text{ кг/м}^3.$$

Теперь можно вычислить объемный расход $Q_{\text{н.}}$ на выходе из нагнетателя:

$$Q_{\text{н.}} = \frac{\dot{M}}{\rho_{\text{н.}}} = \frac{205,8}{38,159} \cong 5,39 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 324 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Очевидно, этот расход меньше, чем расход газа на входе в нагнетатель: $Q_{\text{н.}} < Q_{\text{в.}}$. Имеем: $Q_{\text{н.}}/Q_{\text{в.}} = 324/430 \cong 0,753$.

188. Имеем:

$$\frac{Q_{\text{к.*}}}{Q_{\text{к.}}} = \frac{\sqrt{(p_{\text{н.}} + \Delta p)^2 - p_{\text{к.}}^2}}{\sqrt{p_{\text{н.}}^2 - (p_{\text{к.}} - \Delta p)^2}} = \frac{\sqrt{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 + 2\Delta p \cdot p_{\text{н.}} + \Delta p^2}}{\sqrt{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 + 2\Delta p \cdot p_{\text{к.}} - \Delta p^2}}.$$

Вычислим разность числителя и знаменателя дроби, стоящей под знаком радикала. Получим:

$$\begin{aligned} & [p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 + 2\Delta p \cdot p_{\text{н.}} + \Delta p^2] - [p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 + 2\Delta p \cdot p_{\text{к.}} - \Delta p^2] = \\ & = 2\Delta p \cdot (p_{\text{н.}} - p_{\text{к.}}) + 2\Delta p^2 > 0, \end{aligned}$$

поскольку $p_{\text{н.}} > p_{\text{к.}}$. Следовательно, числитель дроби больше, чем ее знаменатель. Отсюда получаем, что $Q_{\text{к.*}} > Q_{\text{к.}}$.

189. Отношение $Q_{\text{к.*}}/Q_{\text{к.}}$ расходов пропорционально квадратному корню из отношения разности квадратов давления, поэтому имеем:

$$\frac{Q_{\text{к.*}}}{Q_{\text{к.}}} = \frac{\sqrt{(p_{\text{н.}} + \Delta p)^2 - (p_{\text{к.}} + \Delta p)^2}}{\sqrt{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}} = \frac{\sqrt{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 + 2\Delta p \cdot (p_{\text{н.}} - p_{\text{к.}})}}{\sqrt{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}},$$

$$\frac{Q_{к.*}}{Q_{к.}} = \sqrt{1 + \frac{2\Delta p}{p_{н.} + p_{к.}}} > 1 \Rightarrow Q_{к.*} > Q_{к.}.$$

Таким образом, коммерческий расход газа увеличивается от одновременного увеличения давлений в начале и конце участка газопровода на одну и ту же величину Δp .

190. В условиях задачи формула (115) дает для расходов газа пропорцию:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{d_1^5/\lambda_1}{d_2^5/\lambda_2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2,5} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{0,5}.$$

Поскольку, согласно (116),

$$\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} = \sqrt{\frac{d_1^{0,2}}{d_2^{0,2}}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0,1}, \text{ то}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{d_1^5/\lambda_1}{d_2^5/\lambda_2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2,6} = \left(\frac{1020-20}{1220-24}\right)^{2,6} \cong 0,628.$$

Следовательно,

$$Q_2 = Q_1/0,628 = 20/0,628 \cong 31,85 \text{ млн. м}^3/\text{сутки}.$$

191. Формула (115) для расхода газа имеет вид:

$$Q_{к.} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

В силу условия $p_{в.} = p_{к.}$, $\varepsilon = p_{н.}/p_{в.} = p_{н.}/p_{к.}$, поэтому

$$Q_{к.} = 0,0384 \cdot p_{к.} \sqrt{\frac{\varepsilon^2 - 1}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

Так как параметры $p_{к.}, Z, T, d, \Delta$ в сравниваемых вариантах одинаковы, а λ не зависит от режима течения, то имеем уравнение:

$$\frac{Q_{к.}^{(2)}}{Q_{к.}^{(1)}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2^2 - 1}{\varepsilon_1^2 - 1}} \text{ или } 1,1 = \sqrt{\frac{\varepsilon_2^2 - 1}{1,56^2 - 1}}.$$

Решив его, находим: $\varepsilon_2 \cong 1,654$, откуда следует, что степень сжатия газа будет почти на 6 % больше, чем прежде.

192. Используем формулу (115):

$$Q_{\text{к.}} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

Выполним предварительные расчеты:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_{\text{к.}}} \right) = \frac{2}{3} \cdot \left(6,0 + \frac{3,5^2}{6,0 + 3,5} \right) \cong 4,86 \text{ МПа};$$

$$Z_{\text{ср.}} = 1 - 0,4273 \cdot (4,86/4,8) \cdot (288/200)^{-3,668} \cong 0,89;$$

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,03}{1000} \right)^{0,2} \cong 0,0096.$$

Далее имеем:

$$Q_{\text{к.}} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{(6 \cdot 10^6)^2 - (3,5 \cdot 10^6)^2}{0,89 \cdot 288 \cdot 0,0096 \cdot 125000 \cdot 0,6}} \cdot 1,0^5 \cong 435,62 \text{ м}^3/\text{с}$$

или 37,64 млн. м³/сутки.

193. Используем формулу (115):

$$Q_{\text{к.}} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

Выполним предварительные расчеты:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_{\text{к.}}} \right) = \frac{2}{3} \cdot \left(5,5 + \frac{3,8^2}{5,5 + 3,8} \right) \cong 4,70 \text{ МПа};$$

$$Z_{\text{ср.}} = 1 - 0,4273 \cdot (4,7/4,7) \cdot (283/194)^{-3,668} \cong 0,893;$$

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,03}{1196} \right)^{0,2} \cong 0,0093.$$

Далее имеем:

$$Q_{\kappa} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{(5,5 \cdot 10^6)^2 - (3,8 \cdot 10^6)^2}{0,893 \cdot 283 \cdot 0,0093 \cdot 120000 \cdot 0,59}} \cdot 1,196^5 \cong 585,53$$

м³/с или 50,58 млн. м³/сутки.

194. Используем формулу (115):

$$Q_{\kappa} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\kappa.}^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

По формуле (116) вычисляем коэффициент λ :

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,05}{1020 - 2 \cdot 10} \right)^{0,2} \cong 0,0106.$$

Коэффициент Z сжимаемости газа в первом приближении рассчитываем по условиям в конце участка газопровода:

$$Z^{(1)} = 1 - 0,4273 \cdot (3,2/4,7) \cdot (283/194)^{-3,668} \cong 0,927.$$

Получаем уравнение для $p_{\text{н.}}$:

$$\frac{30 \cdot 10^6}{24 \cdot 3600} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - (3,2 \cdot 10^6)^2}{0,927 \cdot 283 \cdot 0,0106 \cdot 10^5 \cdot 0,59}} \cdot 1^5.$$

После упрощений, имеем:

$$347,2 = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - 10,24 \cdot 10^{12}}{16,407 \cdot 10^4}} \Rightarrow p_{\text{н.}} \cong 4,864 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Теперь можно определить среднее давление $p_{\text{ср.}}$ на участке газопровода и уточнить принятый в расчете коэффициент Z . Имеем:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_{\kappa.}^2}{p_{\text{н.}} + p_{\kappa.}} \right) = \frac{2}{3} \cdot \left(4,864 + \frac{3,2^2}{4,864 + 3,2} \right) \cong 4,089 \text{ МПа.}$$

$$Z^{(2)} = 1 - 0,4273 \cdot (4,089/4,7) \cdot (283/194)^{-3,668} \cong 0,907.$$

Повторив расчеты с уточненным коэффициентом Z сжимаемости, получим уравнение

$$13,11 \cdot 10^{12} + 10,24 \cdot 10^{12} = p_{\text{н.}}^2 \Rightarrow p_{\text{н.}} \cong 4,83 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Поскольку следующее уточнение коэффициента Z не дает существенного изменения полученного результата, считаем, что решение $p_n = 4,83$ МПа найдено.

195. Согласно формуле (115), имеем:

$$Q_k = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_n^2 - p_k^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

По формуле (116) вычисляем коэффициент λ :

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,03}{1020 - 2 \cdot 10} \right)^{0,2} \cong 0,0096.$$

Коэффициент Z сжимаемости газа в первом приближении рассчитываем по условию в начале участка газопровода: $Z^{(1)} = 1 - 0,4273 \cdot (5,5/4,7) \cdot (285/194)^{-3,668} \cong 0,878$.

Уравнение для определения p_k имеет вид:

$$\frac{35 \cdot 10^6}{24 \cdot 3600} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{(5,5 \cdot 10^6)^2 - p_k^2}{0,878 \cdot 285 \cdot 0,0096 \cdot 120000 \cdot 0,62}} \cdot 1^5.$$

После упрощений получаем:

$$405,1 = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{30,25 \cdot 10^{12} - p_k^2}{178724}} \Rightarrow p_n \cong 3,22 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Теперь можно определить среднее давление p_{cp} на участке газопровода и уточнить принятое значение коэффициента Z . Имеем:

$$p_{cp} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_n + \frac{p_k^2}{p_n + p_k} \right) = \frac{2}{3} \cdot \left(5,5 + \frac{3,22^2}{5,5 + 3,22} \right) \cong 4,46 \text{ МПа,}$$

$$Z^{(2)} = 1 - 0,4273 \cdot (4,46/4,7) \cdot (285/194)^{-3,668} \cong 0,901.$$

Повторив расчеты с уточненным коэффициентом Z сжимаемости, найдем $p_k \cong 3,14$ МПа. Поскольку следующее уточнение коэффициента Z не дает существенного изменения полученного результата, считаем, что решение найдено.

196. Согласно формуле (115), имеем:

$$Q_{\kappa} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\kappa.}^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5.$$

Найдем сначала среднее давление $p_{\text{ср.}}$ на участке газопровода:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_{\kappa.}^2}{p_{\text{н.}} + p_{\kappa.}} \right) = \frac{2}{3} \cdot \left(6,0 + \frac{4,0^2}{6,0 + 4,0} \right) \cong 5,07 \text{ МПа.}$$

Далее рассчитаем коэффициент Z сжимаемости газа:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot (5,07/4,7) \cdot (283/194)^{-3,668} \cong 0,885.$$

По формуле (116) вычислим коэффициент λ :

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,03}{d} \right)^{0,2} \cong \frac{0,038}{d^{0,2}}.$$

Подставляя данные из условия задачи, а также найденные значения Z и λ , в формулу для расхода газа, получаем уравнение для определения внутреннего диаметра d газопровода:

$$\frac{28 \cdot 10^6}{24 \cdot 3600} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{(6,0 \cdot 10^6)^2 - (4,0 \cdot 10^6)^2}{0,885 \cdot 283 \cdot 0,038 \cdot 125000 \cdot 0,59}} \cdot d^{5,2}.$$

Решив это уравнение, найдем: $d \cong 1,193$ м. Соответственно внешний диаметр $D = d + 2\delta = 1,193 + 2 \cdot 0,01 = 1,213$ м. Очевидно, нужно принять $D = 1220$ мм.

197. Воспользуемся формулой (118) В.Г.Шухова, дающей распределение температуры газа по длине участка газопровода:

$$T(x) = T_{\text{гр.}} + (T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}) \cdot e^{-ax}.$$

В этой формуле параметры газа $T_{\text{гр.}} = 0^{\circ}\text{C}$ (или 273 К) и $T_{\text{н.}} = 30^{\circ}\text{C}$ (или 303 К) известны, поэтому вычислим коэффициент $a = \alpha \pi d / \dot{M} C_p$. Имеем:

$$\dot{M} = \rho_{\text{возд.}} \cdot \Delta \cdot Q_{\kappa} = 1,204 \cdot 0,62 \cdot 32 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600) \cong 276,47 \text{ кг/с,}$$

$$a = 1,75 \cdot 3,14 \cdot 1,2 / (276,47 \cdot 2500) \cong 9,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}.$$

Далее по формуле

$$T(x_i) = 0 + (30 - 0) \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot x_i)$$

рассчитываем температуры в заданных сечениях x_i :

$$x_1 = 20000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4) \cong 24,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$x_2 = 40000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^4) \cong 20,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$x_3 = 60000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^4) \cong 16,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$x_4 = 80000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^4) \cong 14,0 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$x_5 = 100000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^4) \cong 11,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$x_6 = 120000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 10^4) \cong 9,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$x_7 = 140000 \text{ м: } T = 30 \cdot \exp(-9,54 \cdot 10^{-6} \cdot 14 \cdot 10^4) \cong 7,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

198. Формула для распределения температуры, учитывающая эффект Джоуля-Томсона, имеет вид

$$T(x) = T_{\text{гр.}} + (T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}) \cdot e^{-ax} - D_* \cdot \frac{P_{\text{н.}} - P_{\text{к.}}}{a \cdot L} (1 - e^{-ax}).$$

Подставив в эту формулу данные из условия, получим:

$$T(x) = 30 \cdot e^{-9,54 \cdot 10^{-6} x} - 0,3 \cdot \frac{6,0 - 3,5}{1,336} (1 - e^{-9,54 \cdot 10^{-6} x}),$$

где $a = 1,75 \cdot 3,14 \cdot 1,2 / (281,07 \cdot 2500) \cong 9,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ (см. решение предыдущей задачи); $aL \cong 1,336$. После упрощений имеем:

$$T(x) = 30 \cdot e^{-9,54 \cdot 10^{-6} x} - 0,56 \cdot (1 - e^{-9,54 \cdot 10^{-6} x}) = 30,56 \cdot e^{-9,54 \cdot 10^{-6} x} - 0,56.$$

Отсюда находим:

Координата, км	0	20	40	60	80	100	120	140
Температура газа без учета эффекта Джоуля - Томсона, $^{\circ}\text{C}$	30	24,8	20,5	16,9	14,0	11,6	9,7	7,9
Температура газа с учетом эффекта Джоуля - Томсона, $^{\circ}\text{C}$	30	24,7	20,3	16,7	13,7	11,2	9,3	7,4
Поправка, к формуле В.Г. Шухова, $^{\circ}\text{C}$	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5

199. Используя формулу (118) В.Г. Шухова, находим температуру газа в конце участка газопровода. Имеем:

$$T_{\text{к.}} = T(L) = 0 + (30 - 0) \cdot e^{-aL} = 30 \cdot \exp(-aL).$$

Вычислив массовый расход \dot{M} газа

$$\dot{M} = \rho_{\text{возд}} \cdot \Delta \cdot Q_{\text{к.}} = 1,224 \cdot 0,62 \cdot 32 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600) \cong 281,07 \text{ кг/с}$$

и показатель (aL) экспоненты

$$aL = \alpha \pi d L / \dot{M} C_p = 1,75 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 140000 / (281,07 \cdot 2500) \cong 1,336,$$

получим: $T_{\text{к.}} = 30 \cdot \exp(-1,336) \cong 7,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Средняя температура $T_{\text{ср.}}$ газа на участке газопровода определяется формулой (121). Имеем:

$$T_{\text{ср.}} = 0 + \frac{30 - 7,9}{\ln(30/7,9)} \cong 16,56 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

200. Согласно формуле (119), существует соотношение

$$T_{\text{к.}} = T_{\text{гр.}} + (T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}) \cdot e^{-aL},$$

позволяющее определить параметра $a = \alpha \pi d / \dot{M} C_p$:

$$a = \frac{1}{L} \cdot \ln \frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}} = \frac{1}{125 \cdot 10^3} \cdot \ln \frac{35 - 10}{15 - 10} \cong 1,288 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}.$$

Далее нетрудно найти коэффициент α теплопередачи. Имеем:

$$\alpha = \frac{\dot{M} C_p}{\pi d} \cdot a = \frac{2500}{3,14 \cdot 1,02} \cdot 1,288 \cdot 10^{-5} \dot{M} \cong 0,01 \cdot \dot{M}.$$

Вычисляем массовый расход \dot{M} газа:

$$\dot{M} = \rho_{\text{возд}} \cdot \Delta \cdot Q_{\text{к.}} = 1,204 \cdot 0,59 \cdot 25 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600) \cong 205,5 \text{ кг/с}.$$

Следовательно, $\alpha = 0,01 \cdot 205,5 \cong 2,06 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

2.12. Стационарные режимы работы сложных газопроводов

201. Очевидно, что среднее на участке газопровода давление $p_{\text{ср.}}$ выражается формулой

$$p_{\text{ср.}} = \frac{1}{L} \cdot (L_1 \cdot p_{\text{ср.,1}} + L_2 \cdot p_{\text{ср.,2}}),$$

где $L = L_1 + L_2$ – протяженность всего участка газопровода; $p_{\text{ср.,1}}, p_{\text{ср.,2}}$ – средние давления на его первом и втором сегментах, соответственно.

Обозначим давление в месте сочленения сегментов разного диаметра p_* , тогда согласно (125), имеем:

$$p_{\text{н.}}^2 - p_*^2 = B \cdot Q_{\text{к.}} \cdot \frac{L_1}{K_1^2} \text{ и } p_*^2 - p_{\text{к.}}^2 = B \cdot Q_{\text{к.}} \cdot \frac{L_2}{K_2^2}.$$

Отсюда находим:

$$p_*^2 = \frac{p_{\text{н.}}^2 \cdot K_1^2 / L_1 + p_{\text{к.}}^2 \cdot K_2^2 / L_2}{K_1^2 / L_1 + K_2^2 / L_2}.$$

Коэффициенты K_1 и K_2 расхода первого и второго участка, соответственно, очевидно, известны, поэтому давление p_* в месте сочленения сегментов найдено.

Далее, согласно формуле (112), имеем:

$$p_{\text{ср.,1}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_*^2}{p_{\text{н.}} + p_*} \right) \text{ и } p_{\text{ср.,2}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_* + \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_* + p_{\text{к.}}} \right),$$

откуда получаем:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_* + \frac{L_1}{L} \frac{p_{\text{н.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_*} + \frac{L_2}{L} \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{к.}} + p_*} \right).$$

202. Из решения предыдущей задачи следует:

$$p_{\text{ср.}}^{(1)} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_*^{(1)} + 0,5 \cdot \frac{p_{\text{н.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_*^{(1)}} + 0,5 \cdot \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{к.}} + p_*^{(1)}} \right) \text{ и}$$

$$p_{\text{ср.}}^{(2)} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_*^{(2)} + 0,5 \cdot \frac{p_{\text{н.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_*^{(2)}} + 0,5 \cdot \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{к.}} + p_*^{(2)}} \right),$$

где индекс ⁽¹⁾ относится к первому варианту (в котором трубой большего диаметра заменяется первая половина участка), а индекс ⁽²⁾ - ко второму варианту (в котором трубой большего диаметра заменяется вторая половина участка). Здесь p_* - давление в месте сочленения трубопроводов разного диаметра. Очевидно, что $p_*^{(1)} > p_*^{(2)}$, поскольку в трубопроводе большего диаметра потери давления меньше, чем в трубопроводе меньшего диаметра.

Оценим разность $p_{\text{ср.}}^{(1)} - p_{\text{ср.}}^{(2)}$ средних давлений. Для этого вычтем из первого равенства второе. После некоторых упрощений получим:

$$p_{\text{ср.}}^{(1)} - p_{\text{ср.}}^{(2)} = \frac{2}{3} \cdot (p_*^{(1)} - p_*^{(2)}) \cdot \left[1 - 0,5 \cdot \frac{p_{\text{н.}}^2}{(p_{\text{н.}} + p_*^{(1)}) \cdot (p_{\text{н.}} + p_*^{(2)})} - 0,5 \cdot \frac{p_{\text{к.}}^2}{(p_{\text{к.}} + p_*^{(1)}) \cdot (p_{\text{к.}} + p_*^{(2)})} \right].$$

Имеем: $p_*^{(1)} - p_*^{(2)} > 0$ и, кроме того,

$$\frac{p_{\text{н.}}^2}{(p_{\text{н.}} + p_*^{(1)}) \cdot (p_{\text{н.}} + p_*^{(2)})} < 1 \text{ и } \frac{p_{\text{к.}}^2}{(p_{\text{к.}} + p_*^{(1)}) \cdot (p_{\text{к.}} + p_*^{(2)})} < 1,$$

следовательно, выражение, стоящее в квадратных скобках, положительно. Это означает, что $p_{\text{ср.}}^{(1)} - p_{\text{ср.}}^{(2)} > 0$.

203. Поскольку трубопроводные сегменты, о которых идет речь, имеют близкие диаметры, то в качестве d_3 примем диаметр 1,0 м. Тогда коэффициенты K_1 и K_2 расхода сегментов участка газопровода имеют следующие значения:

$$K_1 = (1200/1000)^{2,6} \cong 1,606; K_2 = (1000/1000)^{2,6} = 1,0.$$

Согласно результатам решения задачи № 201, давление в месте сочленения сегментов разного диаметра может быть представлено выражением

$$p_* = \sqrt{\frac{p_{н.}^2 \cdot K_1^2 / L_1 + p_{к.}^2 \cdot K_2^2 / L_2}{K_1^2 / L_1 + K_2^2 / L_2}}.$$

Отсюда находим сначала p_* :

$$p_* = \sqrt{\frac{7,3^2 \cdot 1,606^2 / 70 + 4,0^2 \cdot 1,0^2 / 80}{1,606^2 / 70 + 1,0^2 / 80}} = 6,62 \text{ МПа},$$

а потом $p_{ср.}$:

$$p_{ср.} = \frac{2}{3} \cdot \left(6,62 + \frac{70}{150} \cdot \frac{7,3^2}{7,3 + 6,62} + \frac{80}{150} \cdot \frac{4,0^2}{4,0 + 6,62} \right) \cong 6,14 \text{ МПа}.$$

204. Воспользуемся формулой (122), которая с учетом правила (126), справедливого для последовательного соединения трубопроводов, имеет вид:

$$Q_{к.} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}, \text{ где } \frac{L}{K^2} = \frac{L_1}{K_1^2} + \frac{L_2}{K_2^2}.$$

Если в качестве эквивалентного диаметра d_* выбрать диаметр, равный 1000 мм, то можно вычислить коэффициент K расхода:

$$\frac{120}{K^2} = \frac{40}{[(1196/1000)^{2,6}]^2} + \frac{80}{[(1000/1000)^{2,6}]^2} \cong 95,77,$$

откуда $K \cong 1,119$.

После этого нужно вычислить коэффициент A согласно формуле (124). Однако для этого необходимо сначала найти Δ – плотность газа по воздуху, и коэффициент Z сжимаемости газа.

1) Рассчитываем плотность $\rho_{ст.}$ газа при стандартных условиях:

$$R = 8314 / \mu = 8314 / 18 \cong 461,9 \text{ Дж/кг К};$$

$$\rho_{\text{ст.}} = \frac{p_{\text{ст.}}}{RT_{\text{ст.}}} = \frac{101300}{461,9 \cdot 293} \cong 0,749 \text{ кг/м}^3.$$

Затем рассчитываем Δ – плотность газа по воздуху:

$$\Delta = 0,749/1,205 \cong 0,62.$$

Здесь учтено, что плотность воздуха при стандартных условиях составляет $1,205 \text{ кг/м}^3$.

2) Рассчитываем среднее давление $p_{\text{ср.}}$ на участке *сложного* газопровода. Для этого воспользуемся результатами решения задачи № 201. Сначала находим давление p_* в месте сочленения трубопроводных сегментов разного диаметра. Имеем:

$$p_* = \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 \cdot K_1^2 / L_1 + p_{\text{к.}}^2 \cdot K_2^2 / L_2}{K_1^2 / L_1 + K_2^2 / L_2}} \text{ или}$$

$$p_* = \sqrt{\frac{5,5^2 \cdot 1,196^{5,2} / 40 + 3,5^2 \cdot 1^{5,2} / 80}{1,196^{5,2} / 40 + 1^{5,2} / 80}} \cong 5,2 \text{ МПа.}$$

После этого рассчитываем среднее давление $p_{\text{ср.}}$:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_* + \frac{L_1}{L} \frac{p_{\text{н.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_*} + \frac{L_2}{L} \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{к.}} + p_*} \right) \text{ или}$$

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(5,2 + \frac{40}{120} \cdot \frac{5,5^2}{5,5 + 5,2} + \frac{80}{120} \cdot \frac{3,5^2}{3,5 + 5,2} \right) \cong 4,72 \text{ МПа.}$$

Заметим, что если мы воспользовались бы формулой (112), справедливой для участка *простого* трубопровода, то имели бы:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(5,5 + \frac{3,5^2}{5,5 + 3,5} \right) \cong 4,57 \text{ МПа.}$$

3). Рассчитываем коэффициент Z сжимаемости газа:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot (4,72/4,7) \cdot (288/196)^{-3,668} \cong 0,895.$$

Наконец, находим коэффициент A :

$$A = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d_3^{2,6}}{\sqrt{ZT\Delta}} = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(1000)^{2,6}}{\sqrt{0,895 \cdot 288 \cdot 0,62}} \cong 84,95$$

и вычисляем коммерческий расход газа:

$$Q_{\text{к.}} = 84,95 \cdot 1,119 \cdot \sqrt{\frac{5,5^2 - 3,5^2}{120}} \cong 36,82 \text{ млн. м}^3/\text{сутки.}$$

205. Обозначим K_1, L_1 и K_2, L_2 – коэффициенты расхода и протяженности сегментов газопровода. Поскольку при последовательном соединении элементов справедлива формула (126)

$$\frac{L}{K^2} = \frac{L_1}{K_1^2} + \frac{L_2}{K_2^2},$$

то имеем:

$$p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 = B \cdot Q_{\text{к.}}^2 \cdot \left(\frac{L_1}{K_1^2} + \frac{L_2}{K_2^2} \right).$$

Если бы весь участок газопровода имел диаметр первых 60-ти км, то было бы справедливо уравнение:

$$p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2 = B \cdot Q_{\text{к.}}'^2 \cdot \frac{L_1 + L_2}{K_1^2},$$

в котором $Q_{\text{к.}}'$ – коммерческий расход при тех же начальном и конечном давлениях.

Из этих уравнений имеем:

$$1 = \frac{Q_{\text{к.}}'^2}{Q_{\text{к.}}^2} \cdot \frac{(L_1 + L_2)/K_1^2}{L_1/K_1^2 + L_2/K_2^2}$$

или

$$\frac{Q_{\text{к.}}'}{Q_{\text{к.}}} = \sqrt{\frac{L_1/K_1^2 + L_2/K_2^2}{(L_1 + L_2)/K_1^2}} = \sqrt{\frac{L_1/L_2 + (K_1/K_2)^2}{L_1/L_2 + 1}}.$$

Поскольку $K_1/K_2 = d_1^{2,6}/d_2^{2,6} = 1196^{2,6}/1000^{2,6} \cong 1,593$, то

$$\frac{Q'_k}{Q_k} = \sqrt{\frac{60/70 + 1,593^2}{60/70 + 1}} \cong 1,352.$$

206. Аналогично решению предыдущей задачи имеем:

$$p_{н.}^2 - p_{к.}^2 = B \cdot Q_k^2 \cdot \frac{L}{K_1^2},$$

$$p_{н.}^2 - p_{к.}^2 = B \cdot Q_k'^2 \cdot \left(\frac{L - L_1}{K_1^2} + \frac{L_1}{K_2^2} \right),$$

где протяженность L_1 заменяемого участка равна 45 км.

Разделив почленно второе уравнение на первое, получим:

$$1 = \frac{Q_k'^2}{Q_k^2} \cdot \frac{(L - L_1)/K_1^2 + L_1/K_2^2}{L/K_1^2}$$

или

$$\frac{Q_k}{Q_k'} = \sqrt{\left(1 - \frac{L_1}{L}\right) + \frac{L_1}{L} \cdot \frac{K_1^2}{K_2^2}}.$$

Поскольку

$$\frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2,6} = \left(\frac{1020 - 20}{1220 - 24}\right)^{2,6} \cong 0,628; \frac{L_1}{L} = \frac{45}{140} \cong 0,321,$$

то $Q_k' = Q_k / \sqrt{0,679 + 0,127} \cong 1,114 \cdot Q_k$, то есть коммерческий расход газа можно увеличить на 11,4 % по сравнению с первоначальным.

207. Используем формулу (122) для расчета коммерческого расхода газа в сложном газопроводе:

$$Q_k = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}.$$

Поскольку диаметры всех трех сегментов участка газопровода близки к значению 1000 мм, выберем этот диаметр в качестве эталонного: $d_3 = 1000$ мм.

Вычисляем значение константы А:

$$A = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d_s^{2,6}}{\sqrt{ZT\Delta}} = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1000^{2,6}}{\sqrt{0,9 \cdot 288 \cdot 0,62}} \cong 84,71.$$

Затем, согласно (126), рассчитываем коэффициент К расхода газа:

$$\frac{150}{K^2} = \frac{70}{[(1196/1000)^{2,6}]^2} + \frac{30}{[(1000/1000)^{2,6}]^2} + \frac{50}{[(800/1000)^{2,6}]^2},$$

откуда находим: $K \cong 0,831$.

Вычисляем коммерческий расход $Q_{к.}$ газа:

$$Q_{к.} = 84,71 \cdot 0,831 \cdot \sqrt{\frac{5,75^2 - 3,8^2}{150}} \cong 24,8 \text{ млн. м}^3/\text{сутки}.$$

208. Используем формулу (122) для расчета коммерческого расхода газа в *сложном* газопроводе:

$$Q_{к.} = A \cdot K_0 \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}.$$

Новый расход $Q'_{к.}$ газа определяется той же самой формулой, но с другим коэффициентом (К) расхода:

$$Q'_{к.} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}, \text{ поэтому } \frac{Q'_{к.}}{Q_{к.}} = \frac{K}{K_0}.$$

Далее имеем:

$$K_0 = 1; \quad \frac{120}{K^2} = \frac{120 - 75}{K_0^2} + \frac{75}{(K_0 + K_0)^2} = 45 + \frac{75}{4} = 63,75.$$

Отсюда находим: $K \cong 1,372$ и, значит, $Q'_{к.}/Q_{к.} \cong 1,372$.

209. Используем формулу (122) для расчета коммерческого расхода газа в *сложном* газопроводе:

$$Q_{к.} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}.$$

Поскольку диаметры всех трех сегментов участка газопровода близки к значению 1000 мм, выберем этот диаметр в качестве эталонного: $d_3 = 1000$ мм.

Вычисляем коэффициенты, входящие в формулу для коммерческого расхода:

$$A = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1000^{2,6}}{\sqrt{0,9 \cdot 283 \cdot 0,59}} \cong 87,6 ;$$

$$K_0 = \left(\frac{d}{d_3}\right)^{2,6} = \left(\frac{996}{1000}\right)^{2,6} \cong 0,99 ; K_1 = \left(\frac{d_{л.}}{d_3}\right)^{2,6} = \left(\frac{800}{1000}\right)^{2,6} \cong 0,56 .$$

Далее имеем:

$$\frac{120}{K^2} = \frac{120 - 40}{K_0^2} + \frac{40}{(K_0 + K_1)^2} \Rightarrow \frac{120}{K^2} = \frac{120 - 40}{0,99^2} + \frac{40}{(0,99 + 0,56)^2} ,$$

откуда находим: $K \cong 1,105$.

$$Q_{к.} = 87,6 \cdot 1,105 \cdot \sqrt{\frac{5,5^2 - 3,8^2}{120}} \cong 35,135 \text{ млн. м}^3/\text{сутки}.$$

Если бы лупинг отсутствовал, коммерческий расход $Q'_{к.}$ газа вычислялся бы с другим коэффициентом расхода:

$$Q'_{к.} = 87,6 \cdot 0,99 \cdot \sqrt{\frac{5,5^2 - 3,8^2}{120}} \cong 31,479 \text{ млн. м}^3/\text{сутки},$$

то есть $(35,135 - 31,479)/31,479 \cong 0,116$. Таким образом, коммерческий расход газа был бы на 11,6 % меньше, чем на участке газопровода с лупингом.

210. В существующем варианте коммерческий расход $Q_{к.}$ газа выражается формулой

$$Q_{к.} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}} ,$$

а после модернизации аналогичный расход $Q'_{к.}$ давался бы той же формулой

$$Q'_{к.} = A \cdot K' \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}},$$

но с другим коэффициентом расхода. Поэтому при сохранении значений $p_{н.}$ и $p_{к.}$ отношение $Q'_{к.}/Q_{к.}$ расходов равно отношению K'/K коэффициентов расхода.

Выберем в качестве эталонного диаметр $d_1 = 514$ мм. Тогда, согласно формулам (126) и (127), имеем:

$$\frac{120}{K^2} = \frac{70}{(1^{2,6} + 1^{2,6})^2} + \frac{50}{[(700/514)^{2,6}]^2} \cong 27,53, \Rightarrow K \cong 2,088.$$

В модернизированном варианте коэффициент расхода K' рассчитывается следующим образом:

$$K' = (700/514)^{2,6} \cong 2,232.$$

Таким образом, находим: $Q'_{к.}/Q_{к.} = 2,232/2,088 \cong 1,07$, то есть после модернизации участка его пропускная способность увеличится примерно на 7 %.

211. Обозначим Q_1 и Q_2 – коммерческие расходы газа в каждом из двух параллельных газопроводов, а K_1 и K_2 – коэффициенты расхода соответственно в первой и второй трубе. Тогда имеем:

$$Q_1 = A \cdot K_1 \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}, \quad Q_2 = A \cdot K_2 \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}},$$

где L – протяженность участка. Очевидно также, что суммарная пропускная способность Q участка определяется формулой:

$$Q = Q_1 + Q_2 = A \cdot (K_1 + K_2) \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}}.$$

После вывода из эксплуатации половины второго трубопровода, пропускная способность Q' участка определится формулой

$$Q' = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}},$$

где коэффициент K расхода получившейся конфигурации находится по формуле (126):

$$\frac{L}{K^2} = \frac{L/2}{(K_1 + K_2)^2} + \frac{L/2}{K_1^2} \Rightarrow \frac{2}{K^2} = \frac{1}{(K_1 + K_2)^2} + \frac{1}{K_1^2},$$

или

$$\frac{2}{(K/K_1)^2} = \frac{1}{(1 + K_2/K_1)^2} + 1.$$

Отношение расходов Q'/Q определяется формулой:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{K}{K_1 + K_2} = \frac{K/K_1}{1 + K_2/K_1} = \sqrt{\frac{2}{1 + (1 + K_2/K_1)^2}}.$$

Вычислив отношение K_2/K_1 :

$$\frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{2,6} = \left(\frac{800}{996}\right)^{2,6} \cong 0,5657,$$

найдем отношение расходов *после* и *до* вывода части трубопровода из эксплуатации:

$$\frac{Q'}{Q} = \sqrt{\frac{2}{1 + (1 + 0,5657)^2}} \cong 0,761,$$

то есть коммерческий расход газа уменьшится примерно на 24% от его первоначального значения.

212. Обозначим протяженность лупинга на предыдущем участке газопровода через x км. Тогда оставшаяся часть участка имеет протяженность $(L - x)$ км. Если K – коэффициент расхода на предыдущем участке газопровода, то согласно формулам (126) и (127), имеем:

$$\frac{L}{K^2} = \frac{L - x}{K_0^2} + \frac{x}{(K_0 + K_0)^2},$$

где K_0 – коэффициент расхода на рассматриваемом участке газопровода до модернизации. Отсюда, в частности, следует:

$$\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 = 1 - \frac{x}{L} + \frac{1}{4} \cdot \frac{x}{L} = 1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{x}{L}. \quad (*)$$

Поскольку справедливы формулы

$$Q_0 = A \cdot K_0 \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}} \quad \text{и} \quad Q = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p'_{к.}^2}{L}}$$

и, кроме того, $Q = Q_0$, то справедливо соотношение:

$$\frac{K_0 \cdot \sqrt{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}}{K \cdot \sqrt{p_{н.}^2 - p'_{к.}^2}} = 1 \Rightarrow \frac{K_0}{K} = \frac{\sqrt{p_{н.}^2 - p'_{к.}^2}}{\sqrt{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}} = \sqrt{\frac{1 - (p'_{к.}/p_{н.})^2}{1 - (p_{к.}/p_{н.})^2}}.$$

Так как $p_{н.}/p_{к.} = 1,6$ (то есть $p_{к.}/p_{н.} = 0,625$) и, кроме того, согласно условию задачи, $p'_{к.}/p_{н.} = (1,15 \cdot p_{к.})/p_{н.} = 0,71875$, то находим:

$$\frac{K_0}{K} = \sqrt{\frac{1 - 0,71875^2}{1 - 0,625^2}} \cong 0,891.$$

Учитывая формулу (*), получаем уравнение

$$0,891^2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{x}{L}$$

для определения x/L . Решив его, найдем: $x/L \cong 0,276$. Это означает, что лупинг должен занимать примерно 27,6% протяженности предыдущего участка газопровода.

213. На участке с лупингом, длину которого обозначим x , коэффициент расхода равен $2K_0$ (параллельное соединение трубопроводов), а на остальной части $(L - x)$ он равен K_0 . Поскольку эти части участка соединены последовательно, то согласно формуле (126), имеем:

$$\frac{L}{K^2} = \frac{L-x}{K_0^2} + \frac{x}{(K_0 + K_0)^2}.$$

Отсюда получаем:

$$\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{x}{L}.$$

Поскольку отношение коммерческих расходов Q_0/Q равно 1, то согласно формуле (122), имеем:

$$\frac{K_0 \cdot \sqrt{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}}{K \cdot \sqrt{p'_{н.}^2 - p_{к.}^2}} = 1,$$

где $p'_{н.}$ – новое значение давления в начале участка газопровода: $p'_{н.} = 6,5 - 1,0 = 5,5$ МПа.

Из приведенной формулы следует:

$$\frac{K_0}{K} = \frac{\sqrt{5,5^2 - 3,8^2}}{\sqrt{6,5^2 - 3,8^2}} = 0,754.$$

Отсюда получаем уравнение для определения x/L :

$$1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{x}{L} = 0,754^2 \cong 0,569 \Rightarrow \frac{x}{L} \cong 0,575.$$

Решив это уравнение, найдем $x/L \cong 0,575$, откуда получаем:

$$x = 0,575 \cdot L = 0,575 \cdot 140 \cong 80,5 \text{ км.}$$

214. Формула (122) для коммерческого расхода $Q_{к.}$ газа на участке *сложного* газопровода имеет вид:

$$Q_{к.} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{н.}^2 - p_{к.}^2}{L}},$$

если коэффициент K расхода вычисляется по формуле

$$\frac{L}{K^2} = \frac{L-L_{л.}}{K_0^2} + \frac{L_{л.}}{K_{л.}^2} \Rightarrow \frac{100}{K^2} = \frac{60}{K_0^2} + \frac{40}{K_{л.}^2}.$$

Выбрав в качестве эталонного диаметра диаметр 1000 мм, имеем:

$$K_0 = \left[\frac{(1020 - 2 \cdot 10)}{1000} \right]^{2,6} = 1; K_1 = \left[\frac{(820 - 2 \cdot 10)}{1000} \right]^{2,6} \cong 0,56;$$

$$K_{л.} = K_0 + K_1 = 1 + 0,56 = 1,56, \text{ см. формулу (127).}$$

Здесь K_1 – коэффициент расхода той ветви лупинга, которая имеет диаметр $D_1 = 820 \times 10$ мм; $K_{л.}$ – коэффициент расхода участка трубопровода с лупингом в целом.

Находим коэффициент K :

$$\frac{100}{K^2} = 60 + \frac{40}{1,56^2} \Rightarrow K \cong 1,144.$$

Далее имеем:

$$\frac{Q'_{к.}}{Q_{к.}} = \frac{K}{K_0} = 1,144, Q'_{к.} = 1,144 \cdot Q_{к.} = 1,144 \cdot 28 \cong 32,0.$$

Таким образом, лупинг может увеличить коммерческий расход газа примерно на 4,0 млн. м³/сутки.

215. Если в качестве эталонного диаметра газопровода выбрать диаметр 800 мм, то коэффициент K расхода определяется формулой (126):

$$\frac{130}{K^2} = \frac{20}{(600/800)^2} + \frac{50}{(514/800)^2} + \frac{60}{(800/800)^2} \cong 216,68,$$

откуда находим, что $K \cong 0,775$. Затем вычисляем коэффициент A :

$$A = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800^{2,6}}{\sqrt{0,9 \cdot 288 \cdot 0,62}} \cong 47,422.$$

Согласно формуле (122), имеем:

$$Q_{к.} = 47,422 \cdot 0,775 \cdot \sqrt{\frac{6,2^2 - 3,8^2}{130}} \cong 15,79 \text{ млн. м}^3/\text{сутки.}$$

216. Обозначим протяженность лупинга через x (км). Тогда в формуле (122)

$$Q_{\text{к.}} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}{L}}$$

для коммерческого расхода коэффициент K расхода всего участка в целом вычисляется по правилу

$$\frac{L}{K^2} = \frac{L-x}{K_0^2} + \frac{x}{K_1^2},$$

справедливому для *последовательного* соединения двух участков газопровода: первого - без лупинга, с протяженностью $L-x$, второго - с лупингом, с протяженностью x . Здесь $K_0 = 1$ - коэффициент расхода на участке без лупинга; K_1 - коэффициент расхода на участке с лупингом.

Согласно формуле (127), при *параллельном* соединении газопроводов коэффициенты расходов суммируются, поэтому имеет место равенство: $K_1 = K_0 + K_0 = 2K_0 = 2$. Отсюда находим коэффициент K расхода участка газопровода в целом:

$$\frac{L}{K^2} = L-x + \frac{1}{4} \cdot x = L - \frac{3}{4}x \Rightarrow K = \frac{1}{\sqrt{1-3/4 \cdot x/L}}.$$

Обозначив увеличенный расход через $Q'_{\text{к.}}$, имеем:

$$Q'_{\text{к.}} = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}{L}}, \quad Q_{\text{к.}} = A \cdot K_0 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}{L}},$$

откуда получаем уравнение для определения x/L :

$$\frac{Q'_{\text{к.}}}{Q_{\text{к.}}} = \frac{AK \cdot \sqrt{(p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2)/L}}{AK_0 \cdot \sqrt{(p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2)/L}} = \frac{K}{1} = \frac{1}{\sqrt{1-3/4 \cdot x/L}} = 1,25.$$

Решив это уравнение, найдем: $x/L = 0,48$. Поскольку $L = 120$ км, то $x = 0,48 \cdot 120 = 57,6$ км.

217. Используя формулу (125), имеем:

$$p_{\text{н.}}^2 - p_1^2 = B \cdot Q^2 \cdot \frac{40}{K^2},$$

$$p_1^2 - p_2^2 = B \cdot (Q - 2)^2 \cdot \frac{35}{K^2},$$

$$p_2^2 - p_{к.}^2 = B \cdot (Q - 2 - 4)^2 \cdot \frac{50}{K^2}.$$

Отсюда имеем:

$$p_{н.}^2 - p_{к.}^2 = \frac{B}{K^2} \cdot [40 \cdot Q^2 + 35 \cdot (Q - 2)^2 + 50 \cdot (Q - 6)^2].$$

Поскольку расход Q известен, то осталось вычислить B и K . Принимаем $d_s = 1000$ мм. Тогда:

$$B = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,92 \cdot 285 \cdot 0,59}{1000^{5,2}} \cong 1,3414 \cdot 10^{-4},$$

$$K = [(1020 - 24)/(1000)]^{2,6} \cong 0,99.$$

После этого имеем:

$$p_{к.}^2 = p_{н.}^2 - \frac{B}{K^2} \cdot [40 \cdot Q^2 + 35 \cdot (Q - 2)^2 + 50 \cdot (Q - 6)^2] \text{ или}$$

$$p_{к.}^2 = 4,8^2 - \frac{1,3414 \cdot 10^{-4}}{0,99^2} \cdot [40 \cdot 32,5^2 + 35 \cdot 30,5^2 + 50 \cdot 26,5^2].$$

Отсюда находим: $p_{к.} \cong 2,83$ МПа.

218. Обозначим через p_* давление в месте подключения отвода. Тогда имеют место уравнения:

$$1. \quad p_{н.}^2 - p_*^2 = B \cdot Q^2 \cdot \frac{75}{K^2};$$

$$2. \quad p_*^2 - p_{к0}^2 = B \cdot Q^2 \zeta^2 \cdot \frac{20}{K_0^2}, \text{ где } \zeta = q/Q;$$

$$3. \quad p_*^2 - p_{к.}^2 = B \cdot (Q - q)^2 \cdot \frac{55}{K^2} = B \cdot Q^2 (1 - \zeta)^2 \cdot \frac{55}{K^2},$$

где q – расход в отводе; K, K_0 – коэффициенты расхода в основной магистрали и в отводе; $\zeta = q/Q$ – неизвестная величина.

Сложив почленно уравнение (1) с уравнением (2) и затем – уравнение (1) с уравнением (3), получим:

$$p_{н.}^2 - p_{к0}^2 = B \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{75}{K^2} + \frac{20}{K_0^2} \cdot \zeta^2 \right),$$

$$p_{н.}^2 - p_{к.}^2 = B \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{75}{K^2} + \frac{55}{K^2} \cdot (1 - \zeta)^2 \right).$$

Разделив почленно одно из этих уравнений на другое, получим:

$$\frac{p_{н.}^2 - p_{к0}^2}{p_{н.}^2 - p_{к.}^2} = \frac{75/K^2 + 20/K_0^2 \cdot \zeta^2}{75/K^2 + 55/K^2 \cdot (1 - \zeta)^2}$$

или

$$\frac{1 - (p_{к0}/p_{н.})^2}{1 - (p_{к.}/p_{н.})^2} = \frac{75 + 20(K/K_0)^2 \cdot \zeta^2}{75 + 55 \cdot (1 - \zeta)^2}.$$

Поскольку $K/K_0 = [(1020 - 24)/(530 - 16)]^{2,6} \cong 5,584$, то

$$\frac{1 - (2,0/5,8)^2}{1 - (3,5/5,8)^2} = \frac{75 + 20 \cdot 5,584^2 \cdot \zeta^2}{75 + 55 \cdot (1 - \zeta)^2},$$

откуда получаем квадратное уравнение для определения отношения $\zeta = q/Q$:

$$\zeta^2 + 0,278 \cdot \zeta - 0,329 = 0.$$

Взяв его положительное решение, имеем:

$$\zeta = \frac{-0,278 + \sqrt{0,278^2 + 4 \cdot 0,329}}{2} \cong 0,451.$$

Следовательно, $q \cong 0,451 \cdot Q$.

219. Обозначим коммерческий расход газа в начале участка Q , а в конце участка - $(Q - 8)$ млн. m^3 /сутки. Тогда справедливы следующие равенства:

$$p_{н.}^2 - p_*^2 = B \cdot Q^2 \cdot \frac{30}{K^2},$$

$$p_*^2 - p_{к.}^2 = B \cdot (Q - 8)^2 \cdot \frac{100}{K^2},$$

где p_* – давление в сечении отбора газа на СПХГ. Кроме того, коэффициент K расхода газа можно положить равным 1, если за эталонный диаметр принять значение 1000 мм основного газопровода.

Сложив почленно оба уравнения, получим:

$$p_{н.}^2 - p_{к.}^2 = B \cdot [30 \cdot Q^2 + 100 \cdot (Q - 8)^2].$$

Вычислив коэффициент B

$$B = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,9 \cdot 285 \cdot 0,62}{1000^{5,2}} \cong 1,379 \cdot 10^{-4},$$

получим квадратное уравнение для расхода Q :

$$30 \cdot Q^2 + 100 \cdot (Q - 8)^2 = \frac{5,8^2 - 3,75^2}{1,379 \cdot 10^{-4}} \cong 141969 \text{ или}$$

$$Q^2 - 12,3 \cdot Q - 1043 = 0 \Rightarrow Q \cong 39,0 \text{ млн. м}^3/\text{сутки}.$$

Следовательно, коммерческий расход газа в конце участка составляет $\approx 31,0$ млн. м³/сутки.

220. Очевидно, что средняя на участке газопровода температура $T_{ср.}$ выражается формулой

$$T_{ср.} = \frac{1}{L} \cdot (L_1 \cdot T_{ср.,1} + L_2 \cdot T_{ср.,2}), \quad (*)$$

где $L = L_1 + L_2$ – протяженность всего участка газопровода; $T_{ср.,1}, T_{ср.,2}$ – средние температуры на первом и втором сегментах, соответственно.

Обозначим температуру в месте сочленения сегментов разного диаметра посредством T_* , тогда согласно формуле (118), имеем:

$$T_* = T_{гр.} + (T_{н.} - T_{гр.}) \cdot e^{-a_1 L}, \text{ и } T_{к.} = T_{гр.} + (T_* - T_{гр.}) \cdot e^{-a_2 L_2},$$

где $a_1 = \alpha \pi d_1 / \dot{M} C_p$, $a_2 = \alpha \pi d_2 / \dot{M} C_p$.

Отсюда находим a_1L_1 и a_2L_2 :

$$a_1L_1 = \ln \frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_* - T_{\text{гр.}}}, \quad a_2L_2 = \ln \frac{T_* - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}},$$

и далее получаем:

$$\frac{a_1L_1}{a_2L_2} = \frac{d_1L_1}{d_2L_2} = \frac{\ln[(T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}})/(T_* - T_{\text{гр.}})]}{\ln[(T_* - T_{\text{гр.}})/(T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}})]},$$

$$\ln \left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_* - T_{\text{гр.}}} \right)^{d_2L_2} = \ln \left(\frac{T_* - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}} \right)^{d_1L_1},$$

$$\left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_* - T_{\text{гр.}}} \right)^{d_2L_2} = \left(\frac{T_* - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}} \right)^{d_1L_1}.$$

Разрешив это уравнение относительно температуры T_* , получим:

$$T_* = T_{\text{гр.}} - (T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}})^{d_2L_2/(d_1L_1+d_2L_2)} (T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}})^{d_1L_1/(d_1L_1+d_2L_2)}. \quad (**)$$

Поскольку величины $T_{\text{н.}}, T_{\text{к.}}, T_{\text{гр.}}$, а также d_1, d_2, L_1 и L_2 известны, то можно считать известной и температуру T_* в месте сочленения сегментов газопровода различных диаметров. Если далее учесть, что

$$T_{\text{ср.1}} = T_{\text{гр.}} + \frac{T_{\text{н.}} - T_*}{\ln \left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_* - T_{\text{гр.}}} \right)} \quad \text{и} \quad T_{\text{ср.2}} = T_{\text{гр.}} + \frac{T_* - T_{\text{к.}}}{\ln \left(\frac{T_* - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}} \right)},$$

то, согласно равенству (*), имеем:

$$T_{\text{ср.}} = T_{\text{гр.}} + (d_1L_1 + d_2L_2) \cdot \frac{\left(\frac{T_{\text{н.}} - T_*}{d_1L} + \frac{T_* - T_{\text{к.}}}{d_2L} \right)}{\ln \left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}} \right)},$$

где температура T_* определяется выражением (**).

2.13. Расчет режимов работы центробежных нагнетателей газа

221. Плотность $\rho_{в.}$ газа, поступающего во всасывающий коллектор КС, определяется формулой:

$$\rho_{в.} = \frac{P_{в.}}{Z_{в.} R T_{в.}}, \text{ где } Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \bar{p} \cdot \bar{T}^{-3,668}, R = \frac{8314}{\mu}.$$

Подставляя в эти формулы данные из условия, получаем:

$$Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{4,0}{4,8} \cdot \left(\frac{288}{198} \right)^{-3,668} \cong 0,91;$$

$$R = \frac{8314}{17,36} \cong 478,9 \text{ Дж/кг К};$$

$$\rho_{в.} = \frac{p_{в.}}{Z_{в.} R T_{в.}} = \frac{4 \cdot 10^6}{0,91 \cdot 478,9 \cdot 288} \cong 31,870 \text{ кг/м}^3.$$

222. Коммерческий расход $Q_{к.}$ газа связан с объемным расходом $Q_{в.}$ в линии всасывания КС равенствами:

$$M = Q_{к.} \cdot \rho_{ст.} = Q_{в.} \cdot \rho_{в.}.$$

Отсюда получаем соотношение между расходами:

$$Q_{в.} = Q_{к.} \frac{\rho_{ст.}}{\rho_{в.}} = Q_{к.} \frac{p_{ст.}/(R T_{ст.})}{p_{в.}/(Z_{в.} R T_{в.})} = Q_{к.} \frac{0,1013}{3,5} \cdot \frac{288}{293} \cdot Z_{в.}.$$

Вычисляем $Z_{в.}$:

$$Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,5}{4,7} \cdot \left(\frac{288}{194} \right)^{-3,668} \cong 0,925.$$

После этого находим:

$$Q_{в.} = \frac{15 \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot \frac{0,1013}{3,5} \cdot \frac{288}{293} \cdot 0,925 \cong 274 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

223. Согласно формуле (132), температуры газа $T_{в.}$ до и $T_{н.}$ после компримирования связаны формулой

$$\frac{T_{н.}}{T_{в.}} = \left(\frac{p_{н.}}{p_{в.}} \right)^{\frac{m-1}{m}},$$

где m – показатель политропы. Подставив в эту формулу данные из условия задачи, получим:

$$\frac{273+31,5}{273+15} = \left(\frac{4,55}{3,5} \right)^{\frac{m-1}{m}} \Rightarrow \frac{m-1}{m} \cong 0,212 \Rightarrow m \cong 1,27.$$

Следовательно, показатель политропического процесса сжатия газа на КС равен $\approx 1,27$.

Далее имеем:

$$\frac{T_{н.}^*}{273+20} = \left(\frac{4,55}{3,5} \right)^{1,27-1} \Rightarrow T_{н.}^* \cong 309,8 \text{ К},$$

то есть температура газа увеличится $\approx 5,3$ °С.

224. Сначала вычисляем параметры перекачиваемого газа:

$$R = \frac{8314}{17} \cong 489,1 \text{ Дж/кг К};$$

$$Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,5}{4,7} \cdot \left(\frac{283}{170} \right)^{-3,668} \cong 0,95.$$

Затем определяем приведенные параметры режима работы центробежного нагнетателя:

$$\left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр.} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.}}{Z_{в.} R T_{в.}}} = \frac{4300}{4800} \sqrt{\frac{0,9 \cdot 490 \cdot 288}{0,95 \cdot 489,1 \cdot 283}} \cong 0,88;$$

$$(Q_{в.})_{пр.} = Q_{в.} \frac{n_0}{n} = 400 \cdot \frac{4800}{4300} \cong 447 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

По характеристикам ЦБН 370-18-1, рис. 1.13, находим приближенное значение степени сжатия: $\varepsilon \cong 1,19$.

225. Сначала вычисляем параметры перекачиваемого газа:

$$R = \frac{8314}{18,5} \cong 449,4 \text{ Дж/кг К};$$

$$Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,75}{4,8} \cdot \left(\frac{283}{195}\right)^{-3,668} \cong 0,915.$$

Затем определяем приведенные параметры режима работы центробежного нагнетателя:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр.} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.}}{Z_{в.} R T_{в.}}} = \frac{5300}{6150} \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,915 \cdot 449,4 \cdot 283}} \cong 0,9;$$

$$(Q_{в.})_{пр.} = Q_{в.} \frac{n_0}{n} = 260 \cdot \frac{6150}{5300} \cong 302 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

По характеристикам Н 300-1,23, рис. 1.14, находим приближенное значение степени сжатия: $\varepsilon \cong 1,21$.

226. Из решения предыдущей задачи известны $R = 449,4$ Дж/кг К и $Z_{в.} = 0,915$, поэтому параметры режима работы центробежного нагнетателя будут такими:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр.} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.}}{Z_{в.} R T_{в.}}} = \frac{6150}{6150} \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,915 \cdot 449,4 \cdot 283}} \cong 1,05;$$

$$(Q_{в.})_{пр.} = Q_{в.} \frac{n_0}{n} = 260 \cdot \frac{6150}{6150} = 260 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

По характеристикам Н 300-1,23, рис. 1.14, находим приближенное значение степени сжатия: $\varepsilon \cong 1,31$.

227. Рассчитываем параметры газа и режима перекачки:

$$R = \frac{R_{возд.}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,59} \cong 486,6 \text{ Дж}/(\text{кг К});$$

$$Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,8}{4,75} \cdot \left(\frac{290}{198}\right)^{-3,668} \cong 0,916;$$

$$\rho_{ст.} = \rho_{возд.} \cdot \Delta = 1,204 \cdot 0,59 \cong 0,710 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\rho_{в.} = \frac{p_{в.}}{Z_{в.} R T_{в.}} = \frac{3,8 \cdot 10^6}{0,916 \cdot 486,6 \cdot 290} \cong 29,398 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{\text{пр.}} R_{\text{пр.}} T_{\text{пр.}}}{Z_{\text{в.}} R T_{\text{в.}}}} = \frac{6500}{6150} \cdot \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,916 \cdot 486,6 \cdot 290}} \cong 1,05;$$

$$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = Q_{\text{в.}} \frac{6150}{6500} = 0,946 \cdot Q_{\text{в.}} \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Поскольку степень сжатия ε газа центробежным нагнетателем известна и равна 1,25, то по характеристикам нагнетателя можно найти приведенный расход: см. рис. 1.14 при $\varepsilon = 1,25$ и $(n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,05$. Имеем: $(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} \approx 370 \text{ м}^3/\text{мин.}$ Следовательно, $Q_{\text{в.}} = (Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} / 0,946 = 370 / 0,946 \cong 390 \text{ м}^3/\text{мин.}$

Поскольку $Q_{\text{к.}} \cdot \rho_{\text{ст.}} = Q_{\text{в.}} \cdot \rho_{\text{в.}}$, то можно вычислить коммерческий расход $Q_{\text{к.}}$ газа, обеспечиваемый данным ГПА:

$$Q_{\text{к.}} = Q_{\text{в.}} \frac{\rho_{\text{в.}}}{\rho_{\text{ст.}}} = 370 \cdot 60 \cdot 24 \cdot \frac{29,398}{0,710} \cong 22,06 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сутки.}$$

228. Приближение строим по двум точкам, имеющим абсциссы $(Q_{\text{в.пр.}})_1 = 350 \text{ м}^3/\text{мин.}$; и $(Q_{\text{в.пр.}})_2 = 550 \text{ м}^3/\text{мин.}$, рис. 1.13.

Пусть $(n/n_0)_{\text{пр.}} = 0,95$. Подставив заданные расходы и соответствующие им степени сжатия в уравнения аппроксимации, получим систему линейных уравнений для коэффициентов a и b :

$$\begin{cases} 1,225^2 = a - b \cdot 350^2, \\ 1,1505^2 = a - b \cdot 550^2. \end{cases}$$

Разрешив систему, найдем: $a = 1,62$; $b = 0,983 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, первую из характеристик нагнетателя можно представить в виде: $\varepsilon^2 = 1,62 - 0,983 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{в.пр.}}^2$.

Аналогично находим вид остальных характеристик:

$$(n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,00: \varepsilon^2 = 1,69 - 1,041 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{в.пр.}}^2;$$

$$(n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,05: \varepsilon^2 = 1,79 - 1,235 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{в.пр.}}^2.$$

229. Приближение строим по двум точкам, имеющим абсциссы $(Q_{в.пр.})_1 = 250 \text{ м}^3/\text{мин}$; и $(Q_{в.пр.})_2 = 450 \text{ м}^3/\text{мин}$, рис. 1.14.

Пусть $(n/n_0)_{пр.} = 0,95$. Подставив заданные расходы и соответствующие им степени сжатия в уравнения аппроксимации, получим систему линейных уравнений для коэффициентов a и b :

$$\begin{cases} 1,25^2 = a - b \cdot 250^2, \\ 1,13^2 = a - b \cdot 450^2. \end{cases}$$

Разрешив систему, найдем: $a = 1,69$; $b = 2,040 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, первую из характеристик ЦБН Н-300-1,23 можно представить в виде: $\varepsilon^2 = 1,69 - 2,040 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2$.

Аналогично находим вид остальных характеристик:

$$(n/n_0)_{пр.} = 1,00: \varepsilon^2 = 1,76 - 2,165 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2;$$

$$(n/n_0)_{пр.} = 1,05: \varepsilon^2 = 1,91 - 2,668 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{в.пр.}^2.$$

230. Сначала вычисляем параметры перекачиваемого газа:

$$R = \frac{R_{возд.}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,62} \cong 463,1 \text{ Дж}/(\text{кг К});$$

$$Z_{в.} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,2}{4,8} \cdot \left(\frac{283}{195} \right)^{-3,668} \cong 0,927;$$

$$\rho_{ст.} = \rho_{возд.} \cdot \Delta = 1,204 \cdot 0,62 \cong 0,746 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\rho_{в.} = \frac{p_{в.}}{Z_{в.} R T_{в.}} = \frac{3,2 \cdot 10^6}{0,927 \cdot 463,1 \cdot 283} \cong 26,340 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$Q_{в.} = Q_{к.} \cdot \rho_{ст.} / \rho_{в.} = \frac{15 \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot \frac{0,746}{26,34} \cong 295 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Затем определяем приведенные параметры режима работы центробежного нагнетателя:

$$\left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр.} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.}}{Z_{в.} R T_{в.}}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,927 \cdot 463,1 \cdot 283}} \cong 1,028 \cdot \frac{n}{n_0};$$

$$(Q_{в.})_{пр.} = Q_{в.} \frac{n_0}{n} = 295 \cdot \frac{n_0}{n} \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Поскольку степень сжатия ε в рассматриваемом случае известна и равна 1,2, то необходимо, используя приведенные характеристики Н 300-1,23, рис. 1.14, подобрать такое значение n/n_0 , чтобы точка с координатами $(Q_{в.})_{пр.} = 295/(n/n_0)$ и $\varepsilon = 1,2$ лежала на характеристике $(n/n_0)_{пр.} = 1,028 \cdot n/n_0$. Ответ на этот вопрос ищем методом последовательных приближений.

$$1) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{пр.} = 0,85 \Rightarrow n/n_0 = 0,85/1,028 \cong 0,827;$$

$(Q_{в.})_{пр.} = 295/0,827 \cong 356,7 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,175 < 1,2$ (см. рис. 1.14), следовательно, $(n/n_0)_{пр.}$ нужно увеличить.

$$2) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{пр.} = 0,90 \Rightarrow n/n_0 = 0,90/1,028 \cong 0,875;$$

$(Q_{в.})_{пр.} = 295/0,875 \cong 337 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,205 \approx 1,19$ (см. рис. 1.14), следовательно, можно считать, что решение найдено.

$$\text{Имеем: } n = 0,875 \cdot n_0 = 0,875 \cdot 6150 \cong 5380 \text{ об/мин.}$$

Определяем мощность $N_{в.лп.}$ на валу привода ЦБН. Согласно (130), имеем:

$$N = \rho_{в.} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.} = 26,34 \cdot (0,875)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.} \cong 17,65 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.},$$

где значение $(N/\rho_{в.})_{пр.}$ берется согласно приведенной характеристике Н 300-1,23 при $(Q_{в.})_{пр.} = 337 \text{ м}^3/\text{мин}$, рис. 1.14:

$(N/\rho_{в.})_{пр.} \cong 137 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{м}^3)$. Подставляя это значение в формулу для мощности, находим: $N = 17,65 \cdot 137 \cong 2418 \text{ кВт}$ и мощность $N_{в.лп.}$ на валу привода: $N_{в.лп.} = 2418 + 100 = 2518 \text{ кВт}$.

231. Сначала вычисляем параметры перекачиваемого газа:

$$R = \frac{R_{\text{возд.}}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,62} \cong 463,1 \text{ Дж}/(\text{кг К});$$

$$Z_{\text{в.}} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,8}{4,7} \cdot \left(\frac{288}{194}\right)^{-3,668} \cong 0,919;$$

$$\rho_{\text{ст.}} = \rho_{\text{возд.}} \cdot \Delta = 1,204 \cdot 0,62 \cong 0,746 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\rho_{\text{в.}} = \frac{p_{\text{в.}}}{Z_{\text{в.}} R T_{\text{в.}}} = \frac{3,8 \cdot 10^6}{0,919 \cdot 463,1 \cdot 288} \cong 31,002 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$Q_{\text{в.}} = Q_{\text{к.}} \cdot \rho_{\text{ст.}} / \rho_{\text{в.}} = \frac{22 \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot \frac{0,746}{31,002} \cong 367,6 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Затем определяем приведенные параметры режима работы центробежного нагнетателя:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{\text{пр.}} R_{\text{пр.}} T_{\text{пр.}}}{Z_{\text{в.}} R T_{\text{в.}}}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{0,90 \cdot 490 \cdot 288}{0,919 \cdot 463,1 \cdot 288}} \cong 1,018 \cdot \frac{n}{n_0};$$

$$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = Q_{\text{в.}} \cdot \frac{n_0}{n} = 367,6 \cdot \frac{n_0}{n} \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Поскольку степень сжатия ε в рассматриваемом случае известна и равна 1,25, то необходимо, используя приведенные характеристики 370-18-1, рис. 1.13, подобрать такое значение n/n_0 , чтобы точка с координатами $Q_{\text{в.}} = 367,6/(n/n_0)$ и $\varepsilon = 1,25$ лежала на характеристике $(n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,018 \cdot n/n_0$. Решение ищем методом последовательных приближений.

$$1) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{\text{пр.}} = 0,9 \Rightarrow n/n_0 \cong 0,916;$$

$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = 367,6/0,916 \cong 401 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,2 < 1,25$ (см. рис. 1.13), следовательно, $(n/n_0)_{\text{пр.}}$ нужно увеличить.

$$2) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,0 \Rightarrow n/n_0 = 1,0/1,018 \cong 0,982;$$

$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = 367,6/0,982 \cong 374 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,25$ (см. рис.1.13), следовательно, можно считать, что решение найдено.

Имеем: $n = 0,982 \cdot n_0 = 0,982 \cdot 4800 \cong 4714$ об/мин.

232. Используя формулы (122) – (125), вычислим давление p_n в начале участка газопровода, необходимое для транспортировки газа, и соответствующую ему степень сжатия ε . Имеем:

$$p_n^2 = p_k^2 + B \cdot Q_k^2 \cdot L, \quad (d_n = d; K=1),$$

где $B = \frac{1}{A^2} = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{ZT\Delta}{d^{5,2}}$.

Вычисляем коэффициент B . Сначала рассчитываем коэффициент Z сжимаемости газа, принимая в качестве первого приближения среднее давление, равным давлению в конце участка газопровода.

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot (3,5/4,7) \cdot (285/200)^{-3,668} \cong 0,913.$$

Коэффициент B :

$$B = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,913 \cdot 285 \cdot 0,62}{1196^{5,2}} \cong 5,515 \cdot 10^{-5}.$$

Отсюда находим:

$$p_n = \sqrt{3,5^2 + 5,515 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{10000}{350}\right)^2} \cdot 125 \cong 4,23 \text{ МПа},$$

следовательно, среднее давление p_{cp} на участке газопровода равно: $2/3 \cdot (4,23 + 3,5^2/7,73) \cong 3,88$ МПа.

Выполняя расчеты второго приближения для давления $p = p_{cp} = 3,88$ МПа, имеем:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot (3,88/4,7) \cdot (285/200)^{-3,668} \cong 0,904.$$

Коэффициент B :

$$B = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,904 \cdot 285 \cdot 0,62}{1196^{5,2}} \cong 5,461 \cdot 10^{-5}.$$

Отсюда находим:

$$p_n = \sqrt{3,5^2 + 5,461 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{10000}{350}\right)^2} \cdot 125 \cong 4,22 \text{ МПа},$$

то есть найденное значение давления p_n в начале участка практически не изменилось. Следовательно, степень сжатия ε , которую должны обеспечивать нагнетатели Н-300-1,23, равна $4,22/3,5 \cong 1,21$.

После того, как требуемая степень сжатия найдена, вычислим параметры газа в линии всасывания каждого нагнетателя, учитывая их параллельное соединение:

$$R = \frac{R_{\text{возд.}}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,62} \cong 463,1 \text{ Дж/(кг К)};$$

$$Z_v = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,5}{4,7} \cdot \left(\frac{285}{200}\right)^{-3,668} \cong 0,913;$$

$$\rho_{\text{ст.}} = \rho_{\text{возд.}} \cdot \Delta = 1,204 \cdot 0,62 \cong 0,746 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_v = \frac{p_v}{Z_v \cdot R \cdot T_v} = \frac{3,5 \cdot 10^6}{0,913 \cdot 463,1 \cdot 285} \cong 29,045 \text{ кг/м}^3;$$

$$Q_v = Q_k \cdot \rho_{\text{ст.}} / \rho_v = \frac{(5000/350) \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot \frac{0,746}{29,045} \cong 255 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Затем определим приведенные параметры режима работы центробежного нагнетателя:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{\text{пр.}} \cdot R_{\text{пр.}} \cdot T_{\text{пр.}}}{Z_v \cdot R \cdot T_v}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,913 \cdot 463,1 \cdot 285}} \cong 1,032 \cdot \frac{n}{n_0};$$

$$(Q_v)_{\text{пр.}} = Q_v \cdot \frac{n_0}{n} = 255 \cdot \frac{n_0}{n} \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Поскольку степень сжатия ε уже известна и равна 1,21, то необходимо, используя приведенные характеристики Н-300-1,23, рис. 1.14, подобрать значение n/n_0 так, чтобы точка с координатами $(Q_v)_{\text{пр.}} = 255/(n/n_0)$ и $\varepsilon = 1,21$ лежала на характери-

ке $(n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,032 \cdot n/n_0$. Подбор осуществляем методом последовательных приближений.

$$1) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{\text{пр.}} = 1,0 \Rightarrow n/n_0 = 1,0/1,032 \cong 0,969;$$

$$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = 255/0,969 \cong 263 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,275 \text{ (см.}$$

рис.1.14), что больше необходимого значения 1,21. Следовательно, $(n/n_0)_{\text{пр.}}$ нужно уменьшить

$$2) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{\text{пр.}} = 0,95 \Rightarrow n/n_0 = 0,95/1,032 \cong 0,921;$$

$$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = 255/0,921 \cong 277 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,24 > 1,21 \text{ (см.}$$

рис. 1.14), следовательно, $(n/n_0)_{\text{пр.}}$ нужно еще уменьшить.

$$3) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{\text{пр.}} = 0,90 \Rightarrow n/n_0 = 0,9/1,032 \cong 0,872;$$

$$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = 255/0,872 \cong 292 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,21 \text{ (см. рис.}$$

1.14), следовательно, можно считать, что решение найдено.

$$\text{Имеем: } n = 0,872 \cdot n_0 = 0,872 \cdot 6150 \cong 5360 \text{ об/мин.}$$

Определяем мощность $N_{\text{влп.}}$ на валу привода ЦБН. Согласно (130), имеем:

$$N = \rho_{\text{в.}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{\text{в.}}} \right)_{\text{пр.}} = 29,045 \cdot (0,872)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{\text{в.}}} \right)_{\text{пр.}} \cong 19,258 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{\text{в.}}} \right)_{\text{пр.}},$$

где значение $(N/\rho_{\text{в.}})_{\text{пр.}}$ берется согласно приведенной характеристике Н-300-1,23 при $(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = 292 \text{ м}^3/\text{мин}$, рис. 1.14:

$$(N/\rho_{\text{в.}})_{\text{пр.}} \cong 135 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{м}^3) \text{ и } N = 19,258 \cdot 135 \cong 2600 \text{ кВт и}$$

мощность $N_{\text{влп.}}$ на валу привода: $N_{\text{влп.}} = 2600 + 100 = 2700 \text{ кВт.}$

Поскольку агрегатов 2, то суммарно потребляемая ими мощность составляет $2 \times 2700 \approx 5400 \text{ кВт}$ или 5,4 МВт.

233. Используем формулу (125):

$$\rho_{\text{н.}}^2 = \rho_{\text{к.}}^2 + V \cdot Q_{\text{к.}}^2 \cdot L, \quad (d_{\text{э.}} = d; K=1),$$

$$\text{где } B = \frac{1}{A^2} = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{Z \Delta}{d^{5,2}}.$$

Вычисляем коэффициент B .

Сначала находим *среднюю* температуру $T_{\text{ср.}}$ на участке газопровода:

$$T_{\text{ср.}} = T_{\text{гр.}} + \frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{к.}}}{\ln\left(\frac{T_{\text{н.}} - T_{\text{гр.}}}{T_{\text{к.}} - T_{\text{гр.}}}\right)} = 8 + \frac{30 - 12}{\ln\left(\frac{30 - 8}{12 - 8}\right)} \cong 18,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Затем рассчитываем коэффициент Z сжимаемости газа, принимая в качестве первого приближения среднее давление, равным давлению в конце участка газопровода, а температуру – средней по участку:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot (3,8/4,75) \cdot (291,6/195)^{-3,668} \cong 0,922.$$

Коэффициент B :

$$B = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,922 \cdot 291,6 \cdot 0,65}{1196^{5,2}} \cong 5,974 \cdot 10^{-5}.$$

Отсюда находим:

$$p_{\text{н.}} = \sqrt{3,8^2 + 5,974 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{21000}{350}\right)^2} \cdot 105 \cong 5,90 \text{ МПа}.$$

Найденное значение показывает, что среднее давление $p_{\text{ср.}}$ на участке газопровода равно: $2/3 \cdot (4,5 + 5,9^2/10,4) \cong 5,23$ МПа, что выше принятого 3,8 МПа. Следовательно, расчет может быть откорректирован.

Выполняя расчеты второго приближения для давления $p = p_{\text{ср.}} = 5,23$ МПа, имеем:

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot (5,23/4,75) \cdot (291,6/195)^{-3,668} \cong 0,892.$$

Коэффициент B :

$$B = 0,3452 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,892 \cdot 291,6 \cdot 0,65}{1196^{5,2}} \cong 5,780 \cdot 10^{-5}.$$

Отсюда находим:

$$p_n = \sqrt{3,8^2 + 5,78 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{21000}{350}\right)^2} \cdot 105 \cong 6,0 \text{ МПа,}$$

то есть найденное ранее значение давления p_n практически не изменилось. Следовательно, степень сжатия ε , которую должны обеспечивать нагнетатели 370-18-1, равна $6,0/4,7 \cong 1,28$.

После того, как требуемая степень сжатия найдена, вычисляем параметры газа в линии всасывания каждого нагнетателя, учитывая их параллельное соединение:

$$R = \frac{R_{\text{возд.}}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,65} \cong 441,7 \text{ Дж/(кг К);}$$

$$Z_{\text{в.}} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{4,7}{4,75} \cdot \left(\frac{285}{195}\right)^{-3,668} \cong 0,895;$$

$$\rho_{\text{ст.}} = \rho_{\text{возд.}} \cdot \Delta = 1,204 \cdot 0,65 \cong 0,783 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{в.}} = \frac{p_{\text{в.}}}{Z_{\text{в.}} R T_{\text{в.}}} = \frac{4,7 \cdot 10^6}{0,895 \cdot 441,7 \cdot 285} \cong 41,716 \text{ кг/м}^3;$$

$$Q_{\text{в.}} = Q_{\text{к.}} \cdot \rho_{\text{ст.}} / \rho_{\text{в.}} = \frac{[(21000/2)/350] \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot \frac{0,783}{41,716} \cong 391 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Затем определяем приведенные параметры режима работы центробежного нагнетателя:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{\text{пр.}} R_{\text{пр.}} T_{\text{пр.}}}{Z_{\text{в.}} R T_{\text{в.}}}} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{0,90 \cdot 490 \cdot 288}{0,895 \cdot 441,7 \cdot 285}} \cong 1,062 \cdot \frac{n}{n_0};$$

$$(Q_{\text{в.}})_{\text{пр.}} = Q_{\text{в.}} \cdot \frac{n_0}{n} = 391 \cdot \frac{n_0}{n} \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Поскольку степень сжатия ε уже известна и равна 1,28, то необходимо, используя приведенные характеристики 370-18-1, рис. 1.13, подобрать значение n/n_0 так, чтобы точка с координатами

тами $(Q_{в.})_{пр.} = 391/(n/n_0)$ и $\varepsilon = 1,28$ лежала на характеристике $(n/n_0)_{пр.} = 1,062 \cdot n/n_0$. Подбор осуществляем методом последовательных приближений.

$$1) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{пр.} = 1,0 \Rightarrow n/n_0 = 1,0/1,062 \cong 0,942;$$

$(Q_{в.})_{пр.} = 391/0,942 \cong 415 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,25$ (см. рис.1.13), что меньше необходимого значения 1,28. Следовательно, $(n/n_0)_{пр.}$ нужно увеличить.

$$2) \text{ Полагаем } (n/n_0)_{пр.} = 1,05 \Rightarrow n/n_0 = 1,05/1,062 \cong 0,989;$$

$(Q_{в.})_{пр.} = 391/0,989 \cong 395 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon \cong 1,28$ (см. рис. 1.13), следовательно, решение найдено.

$$\text{Имеем: } n = 0,989 \cdot n_0 = 0,989 \cdot 4800 \cong 4750 \text{ об/мин.}$$

234. Определим сначала степень ε_1 сжатия газа первым нагнетателем. Имеем:

$$R = \frac{8314}{17} \cong 489 \text{ Дж/(кг К)};$$

$$Z_{в.1} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,5}{4,7} \cdot \left(\frac{283}{170}\right)^{-3,668} \cong 0,951;$$

$$\rho_{в.1} = \frac{p_{в.1}}{Z_{в.1} R T_{в.1}} = \frac{3,5 \cdot 10^6}{0,951 \cdot 489 \cdot 283} \cong 26,595;$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр.} = \frac{5300}{6150} \cdot \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,951 \cdot 489 \cdot 283}} \cong 0,85;$$

$$(Q_{в.})_{пр.} = 250 \cdot \frac{6150}{5300} \cong 290 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Используя характеристики Н-300-1,23, представленные на рис. 1.14, находим: $\varepsilon_1 \cong 1,19$.

Рассчитываем давление, температуру, см. (132), и расход газа на входе второго нагнетателя:

$$p_{B,2} = p_{H,1} = \varepsilon_1 \cdot p_{B,1} = 1,19 \cdot 3,5 = 4,165 \text{ МПа};$$

$$\frac{T_{B,2}}{T_{B,1}} = \varepsilon_1^{\frac{m-1}{m}} = 1,19^{\frac{1,27-1}{1,27}} \cong 1,0377; T_{B,2} = 283 \cdot 1,0377 \cong 294 \text{ К};$$

$$Z_{B,2} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{4,165}{4,7} \cdot \left(\frac{294}{170}\right)^{-3,668} \cong 0,949;$$

$$\rho_{B,2} = \frac{p_{B,2}}{Z_{B,2} R T_{B,2}} = \frac{4,165 \cdot 10^6}{0,949 \cdot 489 \cdot 294} \cong 30,528 \text{ кг/м}^3;$$

$$Q_{B,2} = \frac{\rho_{B,1}}{\rho_{B,2}} \cdot Q_{B,1} = \frac{26,595}{30,528} \cdot 250 \cong 218 \text{ м}^3/\text{мин};$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{5700}{6150} \cdot \sqrt{\frac{0,91 \cdot 490 \cdot 288}{0,949 \cdot 489 \cdot 294}} \cong 0,90;$$

$$(Q_{B,})_{\text{пр.}} = 218 \cdot \frac{6150}{5700} \cong 235 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Используя характеристики Н-300-1,23, представленные на рис. 1.14, находим: $\varepsilon_2 \cong 1,23$.

Степень ε сжатия газа системой двух нагнетателей равна произведению $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ степеней сжатия отдельных нагнетателей.

Имеем:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 1,19 \cdot 1,23 \cong 1,46.$$

Используя формулу (132), находим:

$$\frac{T_{H,2}}{T_{B,2}} = \varepsilon_2^{\frac{m-1}{m}} = 1,23^{\frac{1,27-1}{1,27}} \cong 1,045 \Rightarrow T_{H,2} = 294 \cdot 1,045 \cong 307 \text{ К}.$$

235. Определим сначала степень ε_1 сжатия газа первым нагнетателем. Имеем:

$$R = \frac{R_{\text{возд.}}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,62} \cong 463,1 \text{ Дж/(кг К)};$$

$$Z_{B,1} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,2}{4,7} \cdot \left(\frac{288}{200}\right)^{-3,668} \cong 0,924;$$

$$\rho_{в.1} = \frac{3,2 \cdot 10^6}{0,924 \cdot 463,1 \cdot 288} \cong 25,967 \text{ кг/м}^3;$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{4800}{4800} \cdot \sqrt{\frac{0,90 \cdot 490 \cdot 288}{0,924 \cdot 463,1 \cdot 288}} \cong 1,015;$$

$$(Q_{в.1})_{\text{пр.}} = 500 \cdot \frac{4800}{4800} = 500 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Используя характеристики нагнетателя 370-18-1, представленные на рис. 1.13, находим: $\varepsilon_1 \cong 1,235$.

Рассчитываем давление, температуру, см. (132), плотность и расход газа на входе второго нагнетателя:

$$p_{в.2} = p_{н.1} = \varepsilon_1 \cdot p_{в.1} = 1,235 \cdot 3,2 = 3,952 \text{ МПа};$$

$$\frac{T_{в.2}}{T_{в.1}} = \varepsilon_1^{\frac{m-1}{m}} = 1,235^{1,25} \cong 1,043; \quad T_{в.2} = 288 \cdot 1,043 \cong 300,4 \text{ К};$$

$$Z_{в.2} = 1 - 0,4273 \cdot \frac{3,952}{4,7} \cdot \left(\frac{300,4}{200}\right)^{-3,668} \cong 0,919;$$

$$\rho_{в.2} = \frac{3,952 \cdot 10^6}{0,919 \cdot 463,1 \cdot 300,4} \cong 30,912 \text{ кг/м}^3;$$

$$Q_{в.2} = \frac{\rho_{в.1}}{\rho_{в.2}} \cdot Q_{в.1} = \frac{25,967}{30,912} \cdot 500 \cong 420 \text{ м}^3/\text{мин};$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр.}} = \frac{n_2}{n_0} \cdot \sqrt{\frac{0,90 \cdot 490 \cdot 288}{0,919 \cdot 463,1 \cdot 300,4}} \cong 0,997 \cdot \frac{n_2}{n_0};$$

$$(Q_{в.2})_{\text{пр.}} = \frac{420}{n_2/n_0} \text{ м}^3/\text{мин, где } n_0 = 4800 \text{ об/мин.}$$

Поскольку суммарная степень сжатия ε равна $\varepsilon_1 \varepsilon_2$, то $\varepsilon_2 = \varepsilon/\varepsilon_1 = 1,5/1,235 \cong 1,21$, то есть степень сжатия ε_2 во втором нагнетателе известна. Теперь необходимо, используя приведенные характеристики нагнетателя 370-18-1, рис. 1.13, подобрать значение n_2/n_0 так, чтобы точка с координатами

$(Q_{в.2})_{пр.} = 420 / (n_2 / n_0)$ и $\varepsilon_2 = 1,21$ лежала на характеристике $(n/n_0)_{пр.} = 0,997 \cdot n_2 / n_0$. Подбор осуществляем методом последовательных приближений.

Полагаем $(n_2/n_0)_{пр.} = 0,95 \Rightarrow n_2/n_0 = 0,95/0,977 \cong 0,972$; тогда $(Q_{в.2})_{пр.} = 420/0,972 \cong 432 \text{ м}^3/\text{мин} \Rightarrow \varepsilon_2 \cong 1,21$ (см. рис. 1.13). Следовательно, $(n/n_0)_{пр.}$ найдено уже в первом приближении и в последующих приближениях необходимости нет. Имеем: $n_2 = 0,972 \cdot n_0 = 0,972 \cdot 4800 \cong 4670$ об/мин.

Определяем мощность $N^{(1)}_{влп.}$ на валу привода первого ЦБН. Согласно формуле (130), имеем:

$$N^{(1)} = \rho_{в.1} \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.1} = 25,967 \cdot (1,0)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.} \cong 25,967 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.},$$

где значение $(N/\rho_{в.})_{пр.}$ берется согласно приведенной характеристике 370-18-1 при приведенном расходе $500 \text{ м}^3/\text{мин}$, рис. 1.13: $(N/\rho_{в.})_{пр.} \cong 260 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{м}^3)$. Отсюда находим:

$N^{(1)} = 25,967 \cdot 260 \cong 6750 \text{ кВт}$ и мощность $N^{(1)}_{влп.}$ на валу привода: $N^{(1)}_{влп.} = 6750 + 100 = 6850 \text{ кВт}$.

Определяем мощность $N^{(2)}_{влп.}$ на валу привода второго ЦБН. Имеем:

$$N^{(2)} = \rho_{в.2} \left(\frac{n_2}{n_0} \right)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.} = 30,912 \cdot (0,972)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.} \cong 28,4 \cdot \left(\frac{N}{\rho_{в.}} \right)_{пр.},$$

где значение $(N/\rho_{в.})_{пр.}$ берется согласно приведенной характеристике 370-18-1, рис. 1.13 при приведенном расходе $432 \text{ м}^3/\text{мин}$: $(N/\rho_{в.})_{пр.} \cong 250 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{м}^3)$. Отсюда находим:

$N^{(2)} = 28,4 \cdot 250 = 7100 \text{ кВт}$ и мощность $N_{влп.}$ на валу привода: $N^{(2)}_{влп.} = 7100 + 100 = 7200 \text{ кВт}$.

Таким образом, суммарная мощность, потребляемая обоими нагнетателями составляет $7200 + 6850 = 14050$ кВт или 14,05 МВт.

236. Согласно формуле (137), адиабатическая скорость звука c в газе (то есть волны быстрых колебаний, происходящих без теплообмена) определяется выражением: $c = \sqrt{\gamma \cdot ZRT}$, где $\gamma = C_p/C_v = 2500/2030 \cong 1,232$.

$$\text{Далее находим: } R = \frac{8314}{17,8} \cong 467 \text{ Дж/(кг К)},$$

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot \frac{4,3}{4,8} \cdot \left(\frac{288}{194}\right)^{-3,668} \cong 0,910,$$

$$c = \sqrt{\gamma \cdot ZRT} = \sqrt{1,232 \cdot 0,91 \cdot 467 \cdot 288} \cong 388 \text{ м/с}.$$

237. При мгновенном закрытии крана в газопроводе возникает волна повышенного давления, в которой сжатие частиц газа происходит настолько быстро, что оно не сопровождается теплообменом. Поэтому скорость возникающей волны давления равна адиабатической скорости звука.

Рассчитываем параметры газа:

$$R = \frac{R_{\text{возд.}}}{\Delta} = \frac{287,1}{0,59} \cong 486,6 \text{ Дж/(кг К)},$$

$$Z = 1 - 0,4273 \cdot \frac{5,2}{4,55} \cdot \left(\frac{303}{205}\right)^{-3,668} \cong 0,884,$$

$$\gamma = C_p/C_v = 2400/1913 = 1,255,$$

$$c = \sqrt{\gamma \cdot ZRT} = \sqrt{1,255 \cdot 0,884 \cdot 486,6 \cdot 303} \cong 404 \text{ м/с}.$$

238. Определим сначала параметр $c/\sqrt{\gamma} = \sqrt{ZRT}$, называемый *изотермической скоростью звука* в газе:

$$c/\sqrt{\gamma} = \sqrt{ZRT} = \sqrt{0,9 \cdot 490 \cdot 288} \cong 356,4 \text{ м/с}.$$

Далее по формуле (116) вычисляем коэффициент λ гидравлического сопротивления:

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{2k}{d}\right)^{0,2} = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,05}{996}\right)^{0,2} \cong 0,011.$$

По формулам (124) и (122) рассчитываем коммерческие расходы газа *до* (индекс 0) и *после* (индекс 1) отключения ГПА. Имеем:

$$A = 17,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{996^{2,6}}{\sqrt{0,9 \cdot 288 \cdot 0,59}} \cong 85,9,$$

$$(Q_{к.})_0 = 85,9 \cdot \sqrt{\frac{5,1^2 - 3,8^2}{120}} \cong 26,67 \text{ млн.м}^3/\text{сутки},$$

$$(Q_{к.})_1 = 85,9 \cdot \sqrt{\frac{4,5^2 - 3,8^2}{120}} \cong 18,90 \text{ млн.м}^3/\text{сутки}.$$

Вычислим среднюю скорость v_0 газа на участке газопровода *до* отключения ГПА:

$$\rho_{ср.} \cdot v_0 \cdot S = \rho_{ср.} (Q_{к.})_0 \Rightarrow v_0 = \frac{\rho_{ср.} (Q_{к.})_0}{\rho_{ср.0} / (ZRT_{ср.}) \cdot \pi d^2 / 4}.$$

Поскольку $\rho_{ср.} = \rho_{возд.} \cdot \Delta = 1,204 \cdot 0,59 \cong 0,710 \text{ кг/м}^3$, а $\rho_{ср.}$ согласно (112) составляет:

$$\rho_{ср.0} = \frac{2}{3} \cdot \left(5,1 + \frac{3,8^2}{5,1 + 3,8}\right) = 4,48 \text{ МПа},$$

находим:

$$v_0 = \frac{0,710 \cdot 26,67 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600)}{4,48 \cdot 10^6 / (0,9 \cdot 490 \cdot 288) \cdot 3,14 \cdot 0,996^2 / 4} \cong 8,0 \text{ м/с}.$$

Аналогично вычисляем скорость v_1 газа на участке газопровода *после* отключения ГПА:

$$v_1 = \frac{\rho_{ср.} (Q_{к.})_1}{\rho_{ср.1} / (ZRT_{ср.}) \cdot \pi d^2 / 4},$$

$$\rho_{ср.1} = \frac{2}{3} \cdot \left(4,5 + \frac{3,8^2}{4,5 + 3,8}\right) = 4,15 \text{ МПа},$$

$$v_1 = \frac{0,710 \cdot 18,9 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600)}{4,15 \cdot 10^6 / (0,9 \cdot 490 \cdot 288) \cdot 3,14 \cdot 0,996^2 / 4} \cong 6,0 \text{ м/с.}$$

Таким образом, из-за отключения одного из ГПА средняя скорость газа на участке газопровода уменьшилась с 8,0 до 6,0 м/с, поэтому среднюю скорость $v_{\text{ср.}}$ в рассматриваемом *переходном процессе* можно принять равной $\approx 7,0$ м/с.

Далее имеем:

$$a^2 = \frac{(c\sqrt{\gamma})^2 d}{\lambda \cdot v_{\text{ср.}}} = \frac{(356,4)^2 \cdot 0,996}{0,011 \cdot 7} \cong 1,64 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с.}$$

239. Решение уравнения (140) типа теплопроводности с начальным условием $q_{\text{к.}}(x,0) = 0$ и краевыми условиями: $q_{\text{к.}}(0,t) = q_* = \text{const.}$ и $q \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$, имеет на полуоси $x > 0$, как известно, см. формулы (71) и (72), следующий вид:

$$q_{\text{к.}}^2(x,t) = q_*^2 \cdot \text{erf}\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) = q_*^2 \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2a\sqrt{t}} e^{-\zeta^2} d\zeta\right).$$

Понимая под q_*^2 изменение квадрата коммерческого расхода газа, имеем:

$$\frac{[Q_{\text{к.}0} + \Delta Q_{\text{к.}}(L,t)]^2 - Q_{\text{к.}0}^2}{[Q_{\text{к.}0} + \Delta Q_{\text{к.}0}]^2 - Q_{\text{к.}0}^2} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{L/2a\sqrt{t}} e^{-\zeta^2} d\zeta.$$

Из условия задачи можно вычислить левую часть последнего равенства. Имеем:

$$\frac{[Q_{\text{к.}0} + 0,01 \cdot (0,25 \cdot Q_{\text{к.}0})]^2 - Q_{\text{к.}0}^2}{[Q_{\text{к.}0} + 0,25 \cdot Q_{\text{к.}0}]^2 - Q_{\text{к.}0}^2} \cong 0,0089.$$

Отсюда получаем уравнение

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{150000/\sqrt{41,64 \cdot 10^6 \cdot t}} e^{-\zeta^2} d\zeta = 0,9911$$

для определения искомого момента t времени.

Используя таблицы значений интеграла вероятностей [11], находим:

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{150000/\sqrt{4 \cdot 1,64 \cdot 10^6 \cdot t}} e^{-\zeta^2} d\zeta = 0,955 \text{ при } \frac{150000}{\sqrt{4 \cdot 1,64 \cdot 10^6 \cdot t}} \approx 1,85.$$

или $t \cong 1002$ с (16,7 мин).

240. Для описания переходного процесса на участке газопровода используем уравнение (139), а также выражения (141) и (142):

$$\frac{\partial p^2(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 p^2(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1), \quad \dot{M}^2 = -S^2 \cdot \frac{\gamma d}{\lambda c^2} \cdot \frac{\partial p^2}{\partial x}, \quad (2)$$

где \dot{M} – массовый расход газа; $a^2 = c^2 d / (\gamma \lambda v_{cp.})$; $c^2 / \gamma = Z_{cp.} R T_{cp.}$; $v_{cp.} = 0,5(v'_{cp.} + v''_{cp.})$; $v'_{cp.}, v''_{cp.}$ – средние скорости газа в *старом* и *новом* стационарных режимах; $S = \pi d^2 / 4$ – площадь сечения трубопровода.

В *новом* стационарном режиме

$$p^{*2}(x) = p_{н.}^{*2} - \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^{*2}}{L} \cdot x, \quad \dot{M}^2 = \frac{\gamma d S^2}{\lambda c^2} \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^{*2}}{L},$$

поэтому решение задачи можно представить в виде:

$$p^{*2}(x,t) = p_{н.}^{*2} - \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^{*2}}{L} \cdot x + (p_{н.}^{*2} - p_{н.}^{*2}) \cdot \Phi(x,t), \quad (3)$$

где $\Phi(x,t)$ – неизвестная безразмерная функция, характеризующая отклонение давления в сечении x газопровода в момент времени t от значения в *новом* стационарном режиме. Очевидно, что функция $\Phi(x,t)$, как и функция $p^{*2}(x,t)$ удовлетворяет основному уравнению (1).

Кроме того, функция $\Phi(x,t)$ удовлетворяет следующим *краевым* и *начальным* условиям:

В начале участка (при $x = 0$): $\Phi(0,t) = 0$ для всех $t > 0$.

В конце участка (при $x = L$): $\Phi(L,t) = 0$ для всех $t > 0$.

При $t = 0$ (начальное условие) на участке $0 \leq x \leq L$ газопровода существовал стационарный режим с давлениями p_n в начале участка и p_k в его конце. Учитывая это обстоятельство и представление (3), полагаем:

$$p^{*2}(x,t) = p_n^{*2} - \frac{p_n^{*2} - p_k^{*2}}{L} \cdot x + (p_n^{*2} - p_n^{*2}) \cdot \Phi(x,0) \equiv p_n^{*2} - \frac{p_n^{*2} - p_k^{*2}}{L} \cdot x,$$

откуда имеем: $\Phi(x,0) = 1 - x/L$.

Решение уравнения (1) с полученными краевыми и начальными условиями *методом разделения переменных*. Согласно этому методу, функция $\Phi(x,t)$ представляется в виде ряда, каждый член которого есть произведение функции, зависящей только от t , на функцию, зависящую только от x :

$$\Phi(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_n(t) \cdot R_n(x). \quad (4)$$

Потребуем, чтобы каждый член этого ряда в отдельности удовлетворял уравнению (1). Получим:

$$\frac{d\Theta_n(t)}{dt} \cdot R_n(x) = a^2 \cdot \Theta_n(t) \cdot \frac{d^2 R_n(x)}{dx^2}$$

или, разделив обе части уравнения на произведение $\Theta_n(t)R_n(x)$:

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{1}{\Theta_n(t)} \frac{d\Theta_n(t)}{dt} = \frac{1}{R_n(x)} \cdot \frac{d^2 R_n(x)}{dx^2}.$$

Левая часть этого уравнения зависит только от t , правая — только от x . Такое может быть только в случае, если каждая из этих частей есть константа. Имеем:

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{1}{\Theta_n(t)} \frac{d\Theta_n(t)}{dt} = \frac{1}{R_n(x)} \cdot \frac{d^2 R_n(x)}{dx^2} = -\mu_n^2 = \text{const}.$$

Для существования решения эта константа (см. учебники по уравнениям математической физики) должна быть отрицательной, поэтому мы обозначили ее $(-\mu_n^2)$.

Далее имеем:

$\frac{d^2 R_n(x)}{dx^2} + \mu_n^2 \cdot R_n(x) = 0$, откуда находим общее решение:

$$R_n(x) = A_n \sin(\mu_n x) + B_n \cos(\mu_n x).$$

Постоянные A_n и B_n интегрирования определяем из крайних условий, то есть условий при $x = 0$ и $x = L$:

$$R_n(0) = 0: A_n \sin(\mu_n 0) + B_n \cos(\mu_n 0) = 0;$$

$$R_n(L) = 0: A_n \sin(\mu_n L) + B_n \cdot \cos(\mu_n L) = 0.$$

Отсюда заключаем, что $B_n = 0$ и $A_n \sin(\mu_n L) = 0$.

Очевидно, что для существования *ненулевого* решения, необходимо, чтобы $\sin(\mu_n L) = 0$, то есть $\mu_n L = \pi n$ или $\mu_n = \pi n/L$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Числа μ_n называются *собственными числами* рассматриваемой краевой задачи.

Из уравнения для определения функции Θ_n находим:

$$\frac{d\Theta_n(t)}{dt} = -a^2 \cdot \mu_n^2 \cdot \Theta(t) \Rightarrow \Theta_n(t) = e^{-a^2 \cdot \mu_n^2 \cdot t},$$

следовательно, имеем:

$$\Phi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\pi n \frac{x}{L}\right) \cdot e^{-a^2 \cdot \pi^2 n^2 / L^2 \cdot t}.$$

Функция $\Phi(x, t)$ удовлетворяет уравнению (1) и крайним условиям, поскольку этому уравнению и этим условиям удовлетворяет каждый ее член. Таким образом, остается подобрать лишь неизвестные коэффициенты A_n так, чтобы выполнялось начальное условие. Подставляя в полученное решение $t = 0$, имеем:

$$\Phi(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\pi n \frac{x}{L}\right) \cdot e^{-a^2 \cdot \pi^2 n^2 / L^2 \cdot 0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\pi n \frac{x}{L}\right) \equiv 1 - \frac{x}{L}$$

или

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\pi n \frac{x}{L}\right) \equiv 1 - \frac{x}{L}.$$

Можно проверить справедливость следующих тождеств:

$$\int_0^L \sin\left(\pi n \frac{x}{L}\right) \cdot \sin\left(\pi m \frac{x}{L}\right) dx = \begin{cases} 0, & \text{если } m \neq n, \\ \frac{L}{2}, & \text{если } m = n, \end{cases}$$

где m и n – целые положительные числа. Поэтому, умножая обе части последнего тождества на $\sin(\pi m x/L)$ и интегрируя полученное произведение от 0 до L , получаем:

$$A_m \cdot \frac{L}{2} = \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot \sin\left(\pi m \frac{x}{L}\right) dx.$$

Интеграл в правой части полученного равенства вычисляется интегрированием *по частям* – он равен $L/\pi m$, следовательно, $A_m = 2/\pi m$. Окончательно имеем:

$$\Phi(x, t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi n} \cdot \sin\left(\pi n \frac{x}{L}\right) \cdot e^{-\frac{a^2 \pi^2 n^2}{L^2} t}. \quad (5)$$

Массовый расход \dot{M} газа в новом стационарном режиме равен, согласно (2):

$$\dot{M}_*^2 = -\frac{S^2 \gamma d}{\lambda c^2} \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2}{L},$$

а в текущий момент времени в конце участка газопровода, то есть при $x = L$, он определяется выражением:

$$\dot{M}^2(L, t) = -\frac{S^2 \gamma d}{\lambda c^2} \cdot \frac{\partial p^2}{\partial x} = \dot{M}_*^2 + \frac{S^2 \gamma d}{\lambda c^2} (p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2) \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=L},$$

$$\dot{M}^2(L, t) = \dot{M}_*^2 \cdot \left[1 + \frac{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2} \right] \cdot L \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=L}.$$

Отсюда следует:

$$\frac{\dot{M}_*^2 - \dot{M}^2}{\dot{M}_*^2} = \frac{\dot{M}_* - \dot{M}}{\dot{M}_*} \cdot \frac{\dot{M}_* + \dot{M}}{\dot{M}_*} = -\frac{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2} \cdot L \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=L}.$$

Поскольку нас интересуют моменты времени, в которые $\dot{M}(L, t) \approx \dot{M}_*$, то отношение $(\dot{M} + \dot{M}_*)/\dot{M}_* \approx 2$, следовательно:

$$\frac{\dot{M}_* - M}{M_*} \cong -\frac{1}{2} \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2} \cdot L \left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_{x=L} \approx 0,01 \text{ или}$$

$$-L \left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_{x=L} \approx 0,02 \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2}.$$

Вычисляя левую часть этого равенства на основе решения (5), имеем:

$$-L \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi n} \cdot \frac{\pi n}{L} \cos(\pi n) \cdot e^{-\frac{a^2 \pi^2 n^2}{L^2} t} \right] \approx 0,02 \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2} \text{ или}$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n) \cdot e^{-\frac{a^2 \pi^2 n^2}{L^2} t} \approx 0,01 \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2},$$

то есть получаем уравнение для определения искомого момента времени t .

Экспоненты в левой части полученного уравнения с ростом номера n уменьшаются, поэтому члены ряда с номерами 2,3,4 и т.д. будут значительно меньше члена ряда с номером $n = 1$. Если ограничиться первым членом ряда в решении задачи, то уравнение упрощается:

$$e^{-\frac{a^2 \pi^2}{L^2} t} = 0,01 \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2} \Rightarrow t = \frac{L^2}{a^2 \pi^2} \cdot \ln \left(100 \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2} \right).$$

Подставляя сюда $a^2 = d \cdot Z_{ср} \cdot RT_{ср.} / (\lambda v_{ср.})$, получаем ответ:

$$t = \frac{\lambda v_{ср.} L^2}{\pi^2 d \cdot Z_{ср.} RT_{ср.}} \cdot \ln \left(100 \cdot \frac{p_{н.}^{*2} - p_{н.}^2}{p_{н.}^{*2} - p_{к.}^2} \right).$$

241. В решении предыдущей задачи № 240 была получена формула, определяющая время переходного процесса, о котором идет речь. Для того чтобы воспользоваться этой формулой, вычислим коэффициент λ гидравлического сопротивления и среднюю скорость $v_{ср.}$ в переходном процессе. Имеем:

$$\lambda = 0,067 \cdot (2 \cdot 0,05 / 1000)^{0,2} \cong 0,0106.$$

Далее вычисляем расходы, средние давления и средние скорости газа начального и конечного стационарных режимов:

$$\dot{M}_0 = \sqrt{\frac{(3,14 \cdot 1^2 / 4)^2 \cdot 1}{0,0106 \cdot 0,9 \cdot 500 \cdot 293 \cdot 10^5} (5,5^2 - 3,5^2) \cdot 10^{12}} \cong 281,7 \text{ кг/с},$$

$$\dot{M}_1 = \sqrt{\frac{(3,14 \cdot 1^2 / 4)^2 \cdot 1}{0,0106 \cdot 0,9 \cdot 500 \cdot 293 \cdot 10^5} (4,5^2 - 3,5^2) \cdot 10^{12}} \cong 187,8 \text{ кг/с};$$

$$p_{\text{cp},0} = 4,574 \text{ МПа}, \quad p_{\text{cp},1} = 4,021 \text{ МПа},$$

$$v_{\text{cp},0} = \frac{281,7}{4,574 \cdot 10^6 / (0,9 \cdot 500 \cdot 293) \cdot 3,14 \cdot 1^2 / 4} \cong 10,3 \text{ м/с},$$

$$v_{\text{cp},1} = \frac{187,8}{4,021 \cdot 10^6 / (0,9 \cdot 500 \cdot 293) \cdot 3,14 \cdot 1^2 / 4} \cong 7,8 \text{ м/с}.$$

$$v_{\text{cp}} = 0,5 \cdot (10,3 + 7,8) \cong 9 \text{ м/с}.$$

Теперь можно использовать полученную при решении задачи № 240 формулу

$$t = \frac{\lambda v_{\text{cp}} L^2}{\pi^2 d \cdot Z_{\text{cp}} \cdot R T_{\text{cp}}} \cdot \ln \left(100 \cdot \frac{p_{\text{н}}^{*2} - p_{\text{к}}^{*2}}{p_{\text{н}}^{*2} - p_{\text{к}}^{*2}} \right).$$

Имеем:

$$t = \frac{0,0106 \cdot 9 \cdot (10^5)^2}{3,14^2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 500 \cdot 293} \cdot \ln \left(100 \cdot \frac{5,5^2 - 4,5^2}{5,5^2 - 3,5^2} \right) \cong 2948 \text{ с}.$$

или ≈ 49 мин.

242. Рассчитаем сначала коэффициент a^2 в уравнении

$$\frac{\partial q_{\text{к}}^2(x,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 q_{\text{к}}^2(x,t)}{\partial x^2}, \quad a^2 = \frac{c^2 d}{\gamma \lambda \cdot v_{\text{cp}}}.$$

Имеем: $c/\gamma = \sqrt{Z_{\text{cp}} \cdot R T_{\text{cp}}} = \sqrt{0,92 \cdot 500 \cdot 283} \cong 360,8 \text{ м/с},$

$$\lambda = 0,067 \left(\frac{2k}{d} \right)^{0,2} = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,03}{800} \right)^{0,2} \cong 0,01,$$

$$\rho_{\text{ст.}} = \rho_{\text{возд.}} \Delta = 1,204 \cdot 0,6 \cong 0,722 \text{ кг/м}^3,$$

$$\dot{M}_0 = 0,722 \cdot 15 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600) \cong 125,35 \text{ кг/с},$$

$$\dot{M}_1 = 0,722 \cdot 10 \cdot 10^6 / (24 \cdot 3600) \cong 83,56 \text{ кг/с}.$$

Согласно формуле (111), имеем:

$$p_{\text{к.}}^2 = p_{\text{н.}}^2 - \frac{16 \cdot \dot{M}^2 \cdot \lambda \cdot ZRTL}{\pi^2 d^5}.$$

Отсюда получаем:

$$p_{\text{к.}}^2 = (5,5 \cdot 10^6)^2 - \frac{16 \cdot 125,35^2 \cdot 0,01 \cdot 0,92 \cdot 500 \cdot 283 \cdot 1,25 \cdot 10^5}{3,14^2 \cdot 0,8^5},$$

и далее находим: $p_{\text{к.}} \cong 4,19 \text{ МПа}$.

По той же формуле (111) можно получить давление в начале участка при новом расходе:

$$p_{\text{н.}}^2 = p_{\text{к.}}^2 + \frac{16 \cdot \dot{M}_1^2 \cdot \lambda \cdot ZRTL}{\pi^2 d^5}$$

$$p_{\text{н.}}^2 = (4,19 \cdot 10^6)^2 + \frac{16 \cdot 83,56^2 \cdot 0,01 \cdot 0,92 \cdot 500 \cdot 283 \cdot 1,25 \cdot 10^5}{3,14^2 \cdot 0,8^5},$$

откуда находим: $p_{\text{н.}} \cong 4,81 \text{ МПа}$.

В первом случае $p_{\text{ср.}} \approx 4,88 \text{ МПа}$, во втором – $4,51 \text{ МПа}$.

По формуле $v = \dot{M} / \rho S$ находим средние скорости $v_{\text{ср.0}}$ и $v_{\text{ср.1}}$. Имеем:

$$v_{\text{ср.0}} = \frac{125,35}{4,88 \cdot 10^6 / (0,92 \cdot 500 \cdot 283) \cdot 3,14 \cdot 0,8^2 / 4} = 6,65 \text{ м/с},$$

$$v_{\text{ср.1}} = \frac{83,56}{4,51 \cdot 10^6 / (0,92 \cdot 500 \cdot 283) \cdot 3,14 \cdot 0,8^2 / 4} = 4,80 \text{ м/с},$$

поэтому в качестве $v_{\text{ср.}}$ можно принять скорость, равную среднему арифметическому найденных: $5,73 \text{ м/с}$.

$$a^2 = \frac{c^2 d}{\gamma \lambda \cdot v_{\text{ср.}}} = \frac{360,8^2 \cdot 0,8}{0,01 \cdot 5,73} \cong 1,82 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Решение уравнения (140), подобно тому, как это делалось при решении задачи № 240, будем искать в виде ряда. Для этого положим:

$$q_{k.}^2(x, t) = q_{k.1}^2 + (q_{k.0}^2 - q_{k.1}^2) \cdot \Phi(x, t),$$

где $\Phi(x, t)$ – искомая безразмерная функция. Эта функция удовлетворяет уравнению (139), а также начальному и крайним условиям:

В начале участка (при $x = 0$): $\Phi(0, t) = 0$ для всех $t > 0$.

В конце участка (при $x = L$): $p(L, t) = \text{const.}$: из (139) следует $(\partial^2 p^2 / \partial x^2)_{x=L} = 0$ и с учетом (141) - $(\partial \Phi / \partial x)_{x=L} = 0$ для всех $t > 0$.

Поскольку при $t = 0$

$$q_{k.}^2(x, 0) = q_{k.1}^2 + (q_{k.0}^2 - q_{k.1}^2) \cdot \Phi(x, 0) = q_{k.0}^2,$$

то начальное условие имеет вид:

$$\Phi(x, 0) = 1.$$

Согласно методу разделения переменных, ищем функцию $\Phi(x, t)$ в следующем виде:

$$\Phi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_n(t) \cdot R_n(x).$$

Потребуем, чтобы каждый член этого ряда в отдельности удовлетворял исходному дифференциальному уравнению. Получим:

$$\frac{d\Theta_n(t)}{dt} \cdot R_n(x) = a^2 \cdot \Theta_n(t) \cdot \frac{d^2 R_n(x)}{dx^2}$$

или, разделив обе части уравнения на произведение $\Theta_n(t) R_n(x)$:

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{1}{\Theta_n(t)} \frac{d\Theta_n(t)}{dt} = \frac{1}{R_n(x)} \cdot \frac{d^2 R_n(x)}{dx^2}.$$

Левая часть этого уравнения зависит только от t , правая – только от x . Такое может быть только в случае, если каждая из этих частей есть константа. Имеем:

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{1}{\Theta_n(t)} \frac{d\Theta_n(t)}{dt} = \frac{1}{R_n(x)} \cdot \frac{d^2 R_n(x)}{dx^2} = -\mu_n^2 = \text{const.}$$

Отсюда находим:

$$R_n(x) = A_n \sin(\mu_n x) + B_n \cos(\mu_n x); \quad \Theta_n(t) = e^{-\mu_n^2 a^2 t}.$$

Используя граничные условия, получаем:

$$R_n(0) = 0: A_n \sin 0 + B_n \cos 0 = 0 \Rightarrow B_n = 0;$$

$$dR_n/dx|_{x=L} = 0: \mu_n A_n \cos(\mu_n L) = 0 \Rightarrow \mu_n L = \frac{\pi}{2}(2n+1).$$

Таким образом,

$$\Phi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left[\frac{\pi}{2}(2n+1) \frac{x}{L} \right] \cdot e^{-\mu_n^2 a^2 t}; \quad \mu_n = \frac{\pi}{2L}(2n+1).$$

Для нахождения коэффициентов A_n этого ряда используем начальное условие $\Phi(x, 0) \equiv 1$. Подставив в выражение для $\Phi(x, t)$ значение $t = 0$, найдем:

$$\Phi(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left[\frac{\pi}{2}(2n+1) \frac{x}{L} \right] \equiv 1.$$

Умножив обе части этого равенства на $\sin(\mu_n x/L)$ и проинтегрировав полученный результат по x от 0 до L , получим уравнение для определения A_n :

$$A_n \cdot \int_0^L \sin \left[\frac{\pi}{2}(2n+1) \frac{x}{L} \right]^2 dx = \frac{L}{\mu_n}, \quad \Rightarrow \quad A_n = \frac{4}{\pi(2n+1)}.$$

Здесь учтено, что

$$\int_0^L \sin \left[\frac{\pi}{2}(2n+1) \frac{x}{L} \right] \sin \left[\frac{\pi}{2}(2m+1) \frac{x}{L} \right] dx = 0, \quad \text{если } m \neq n.$$

Таким образом, решение задачи имеет вид:

$$q_{к.}^2(x,t) = q_{к.1}^2 + \frac{4}{\pi} (q_{к.0}^2 - q_{к.1}^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin(\mu_n x) \cdot e^{-\mu_n^2 a^2 t},$$

где $\mu_n = \pi(2n+1)/2L$ и $a^2 = 1,82 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$.

По условию задачи ищется момент времени t , в который при $x/L = 25/125 = 0,2$ расход \dot{M} газа равен $10,5$ млн.м³/сутки, то есть

$$\frac{q_{к.}^2(0,2L,t) - q_{к.1}^2}{q_{к.0}^2 - q_{к.1}^2} = \frac{\dot{M}^2 - \dot{M}_1^2}{\dot{M}_0^2 - \dot{M}_1^2} = \frac{10,5^2 - 10^2}{15^2 - 10^2} = 0,082.$$

Следовательно, требуется найти t из уравнения:

$$\frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2n+1} \sin\left(\frac{\pi}{2}(2n+1) \cdot 0,2\right) \cdot e^{-\mu_n^2 a^2 t} \right\} = 0,082.$$

Вычислим первые два члена этого ряда:

$$n = 1: 0,344 \cdot \exp(-22,18 \cdot a^2 t / L^2),$$

$$n = 2: 0,255 \cdot \exp(-61,60 \cdot a^2 t / L^2).$$

Отсюда видно, что члены ряда быстро убывают с ростом номера n , если $a^2 t / L^2$ не слишком мало. Поэтому, если ограничиться только первым членом ряда, получим уравнение

$$0,344 \cdot \exp\left(-22,18 \cdot \frac{1,82 \cdot 10^6 \cdot t}{125000^2}\right) = 0,082$$

для определения искомого момента t времени. Решив его, найдем: $t \cong 555 \text{ с}$ ($\approx 9,25$ мин).

243. Найдем сначала давление p_* газа в сечении утечки.

Для этого воспользуемся формулой

$$p^2(x) = p_n^2 - (p_n^2 - p_{к.}^2) \cdot x/L.$$

Подставив в нее исходные данные из условия, получим:

$$p_*^2 = 5,5^2 - (5,5^2 - 3,5^2) \cdot 30/150 \Rightarrow p_* = 5,162 \text{ МПа}.$$

Далее воспользуемся формулами (144):

$$p_c = p_* \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}; \quad T_c = T_* \cdot \frac{2}{\gamma + 1}; \quad v_c = \sqrt{\frac{2\gamma R T_*}{\gamma + 1}}.$$

Имеем:

$$R = R_{\text{возд.}} / \Delta = 287,1 / 0,62 \cong 463,1 \text{ Дж/(кг К)},$$

$$p_c = 5,162 \cdot \left(\frac{1,37 + 1}{2} \right)^{\frac{1,37}{1-1,37}} \cong 2,753 \text{ МПа},$$

$$T_c = (273 + 12) \cdot \frac{2}{1,37 + 1} \cong 240,5 \text{ К};$$

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,37 \cdot 463,1 \cdot 285}{1,37 + 1}} \cong 390,6 \text{ м/с}.$$

Отсюда находим массовый расход \dot{M}_y утечки:

$$\dot{M}_y = \rho_c v_c S_c = \frac{2,753 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 463,1 \cdot 240,5} \cdot 390,6 \cdot (20 \cdot 10^{-6}) \cong 0,215 \text{ кг/с}.$$

За сутки будет потеряно: $24 \cdot 3600 \cdot 0,215 \cong 18,5 \cdot 10^3$ кг газа или, учитывая, что плотность газа при стандартных условиях равна $1,204 \cdot 0,62 \cong 0,746$ кг/м³, объем потерянного в утечке газа составит $\approx 24,85$ тыс. м³.

244. Поскольку отверстие в газопроводе мало, допустимо считать, что утечка газа не влияет на распределение давления по длине газопровода, которое имеет вид:

$$p^2(x) = p_n^2 - (p_n^2 - p_k^2) \cdot x/L,$$

следовательно, давление p_* в месте повреждения трубопровода можно рассчитать по этой формуле:

$$p_* = \sqrt{5,8^2 - (5,8^2 - 3,5^2) \cdot 80/120} \cong 4,4 \text{ МПа}.$$

Отношение $p_*/p_{\text{атм.}}$ равно $4,4/0,1013 \cong 43,4$. Поскольку эта величина значительно больше критического отношения

$$\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{1,31+1}{2}\right)^{\frac{1,31}{1,31-1}} \cong 1,84,$$

отделяющего звуковой режим истечения газа от дозвукового, то в данном случае истечение газа через отверстие будет звуковым, и скорость v_c истечения равна местной скорости звука:

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,31 \cdot 500 \cdot 283}{1,31+1}} \cong 400,6 \text{ м/с.}$$

Давление p_c , температура T_c и плотность ρ_c газа на срезе выходного отверстия определяются формулами (144):

$$p_c = 4,4 \cdot \left(\frac{1,31+1}{2}\right)^{\frac{1,31}{1-1,31}} \cong 2,393 \text{ МПа,}$$

$$T_c = (273+10) \cdot \frac{2}{1,31+1} \cong 245 \text{ К;}$$

$$\rho_c = \frac{p_c}{RT_c} = \frac{2,393 \cdot 10^6}{500 \cdot 245} \cong 19,53 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, массовый расход \dot{M}_y утечки будет равен:

$$\dot{M}_y = \rho_c v_c S_c = 19,53 \cdot 400,6 \cdot (4 \cdot 10^{-4}) \cong 3,129 \text{ кг/с.}$$

За сутки будет потеряно: $24 \cdot 3600 \cdot 3,129 \cong 270,35 \cdot 10^3$ кг газа или, учитывая, что плотность газа при стандартных условиях равна $1,204 \cdot (287,1/500) \cong 0,691$ кг/м³, объем потерянного газа составит $\approx 391,24$ тыс. м³.

245. Атмосферное давление, как известно, равно 0,1013 МПа, поэтому легко проверить, что в первом случае превышение давления в трубопроводе над атмосферным больше, а во втором случае меньше величины $(p^*/p_{\text{атм.}})_{\text{кр.}}$:

$$\left(\frac{p_*}{p_{\text{атм.}}}\right)_{\text{кр.}} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{1,35+1}{2}\right)^{\frac{1,35}{1,35-1}} \cong 1,863,$$

определяющей режим истечения газа из короткого насадка (свечи). Действительно:

$$\frac{1,2}{0,1013} = 11,8 > 1,863; \quad \frac{0,12}{0,1013} = 1,18 < 1,863.$$

Отсюда следует, что в первом случае режим истечения будет *звуковым*, а во втором – *дозвуковым*.

Для звукового режима истечения имеем:

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,35 \cdot 487 \cdot 283}{1,35+1}} \cong 398 \text{ м/с};$$

для дозвукового:

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,35 \cdot 487 \cdot 283}{1,35-1} \left[1 - \left(\frac{0,1013}{0,12}\right)^{\frac{1,35-1}{1,35}}\right]} \cong 214 \text{ м/с}$$

246. При решении предыдущей задачи № 245 было установлено, что в первом случае режим истечения газа - звуковой, скорость истечения составляет 398 м/с; во втором случае режим истечения – дозвуковой, скорость истечения составляет 214 м/с.

1. Рассмотрим звуковой режим ($p_* = 1,2$ МПа):

$$\rho_{\text{ст.}} = 0,1013 \cdot 10^6 / (487 \cdot 293) \cong 0,710 \text{ кг/м}^3,$$

$$p_c = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = 1,2 \cdot \left(\frac{1,35+1}{2}\right)^{\frac{1,35}{1-1,35}} \cong 0,644 \text{ МПа},$$

$$T_c = T_* \frac{2}{\gamma+1} = 283 \cdot \frac{2}{1,35+1} \cong 240,9 \text{ К},$$

Отсюда, в частности, следует, что газ, истекая в атмосферу через свечу, охлаждается из-за адиабатического расширения от $+10$ °С до $-32,1$ °С.

$$\rho_c = \frac{p_c}{RT_c} = \frac{0,644 \cdot 10^6}{487 \cdot 240,9} \cong 5,489 \text{ кг/м}^3,$$

$$\dot{M}_{y.} = \rho_c v_c S_c = 5,489 \cdot 398 \cdot (3,14 \cdot 0,1^2 / 4) \cong 17,15 \text{ кг/с}$$

(или $17,15/0,710 \cong 24,15 \text{ м}^3/\text{с}$).

2. Рассмотрим теперь дозвуковой режим истечения, скорость истечения составляет 214 м/с.

$$p_c = p_{\text{атм.}} = 0,1013 \text{ МПа},$$

$$T_c = T_* \cdot (p_{\text{атм.}}/p_*)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 283 \cdot (0,1013/0,12)^{\frac{1,35-1}{1,35}} \cong 270,84 \text{ К}.$$

В этом случае газ охлаждается меньше, чем в случае звукового истечения, всего до $-2,16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Далее находим:

$$\rho_c = \frac{p_c}{RT_c} = \frac{0,1013 \cdot 10^6}{487 \cdot 270,84} \cong 0,768 \text{ кг/м}^3,$$

$$\dot{M}_{y.} = \rho_c v_c S_c = 0,768 \cdot 214 \cdot (3,14 \cdot 0,1^2 / 4) \cong 1,29 \text{ кг/с}$$

(или $1,29/0,710 \cong 1,82 \text{ м}^3/\text{с}$).

247. Очевидно, что режим истечения газа в диапазоне указанных давлений будет *критическим*, то есть скорость газа на срезе свечи будет равна местной скорости звука.

Учитывая, что $R = R_{\text{возд.}}/\Delta = 287,1/0,62 \cong 463,1 \text{ Дж/(кг К)}$, и используя формулу (145) для определения времени t истечения газа при критическом режиме, имеем:

$$t = \frac{3,14 \cdot 1,196^2 / 4 \cdot 3000}{3,14 \cdot 0,084^2 / 4} \cdot \frac{\ln(4,0/2,0)}{\left(\frac{2}{1,34+1}\right)^{\frac{1}{1,34-1}} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,34 \cdot 463,1 \cdot 283}{1,34+1}}},$$

откуда находим: $t \cong 1727 \text{ с}$ ($\approx 29 \text{ мин}$). При этом скорость v_c истечения, согласно (144), будет равна:

$$v_c = \sqrt{\frac{2\gamma RT_*}{\gamma+1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,34 \cdot 463,1 \cdot 283}{1,34+1}} \cong 387,4 \text{ м/с}.$$

248. При истечении газа из отключенного участка трубопровода в данном случае реализуются оба режима истечения – *критический* и *докритический* – в зависимости от того больше или меньше давление в сечении установки свечи величины:

$$\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \cdot p_{\text{атм.}} = \left(\frac{1,31+1}{2}\right)^{\frac{1,31}{1,31-1}} \cdot 0,1013 \cdot \cong 0,186 \text{ МПа.}$$

Рассмотрим сначала первую стадию процесса – критический режим истечения газа $0,186 \leq p < 2,0$ МПа. Время t_1 такого истечения определяется формулой (145):

$$t_1 = \frac{V}{S_c} \cdot \frac{\ln(p_0/p_t)}{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2\gamma RT_*}{\gamma+1}}}$$

Сначала вычисляем: $V = 3,14 \cdot 0,8^2 / 4 \cdot 5000 = 2512 \text{ м}^3$ - объем участка; $S_c = 3,14 \cdot 0,15^2 / 4 \cong 0,0177 \text{ м}^2$ – площадь выходного отверстия; $R = R_{\text{возд.}} / \Delta = 287,1 / 0,59 \cong 487 \text{ Дж/(кг К)}$. Затем вычисляем время t_1 :

$$t_1 = \frac{2512}{0,0177} \cdot \frac{\ln(2/0,186)}{\left(\frac{2}{1,31+1}\right)^{\frac{1}{1,31-1}} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,31 \cdot 487 \cdot 283}{1,31+1}}} \cong 1357 \text{ с.}$$

Для второй, дозвуковой, стадии истечения, в которой давление уменьшается от 0,186 до 0,1013 МПа, справедлива формула (148):

$$t_2 \cong 1,33 \cdot \frac{V}{S_c} \cdot \frac{1}{\sqrt{RT_*}} = 1,33 \cdot \frac{2512}{0,0177} \cdot \frac{1}{\sqrt{487 \cdot 283}} \cong 508 \text{ с.}$$

Общее время ($t_1 + t_2$) опорожнения участка газопровода составляет $1357 + 508 = 1865$ с или ≈ 31 мин.

249. Длину области газозоудшной смеси, образующуюся при вытеснении природного газа воздухом из 25-км трубопровода, вычисляем по формуле (143). Имеем:

$$l_c = 6,22 \cdot d^{0,45} \cdot \sqrt{L} = 6,22 \cdot 800^{0,45} \cdot \sqrt{25} \cong 630 \text{ м.}$$

250. Для того чтобы концентрация маркера в середине "метки" уменьшилась не более чем на 0,01%, необходимо, чтобы протяженность "метки" равнялась длине области смеси газа, помеченного маркером, и не помеченного им. Согласно формуле (143) имеем:

$$l_c = 6,22 \cdot d^{0,45} \cdot \sqrt{L} = 6,22 \cdot 1000^{0,45} \cdot \sqrt{750} \cong 3813 \text{ м.}$$

Рекомендуемая литература

1. Трубопроводный транспорт нефти и газа (под общей ред. проф. В.А. Юфина)// - М.: Недра, 1978.
2. Алиев Р.А., Белоусов В.Д., Немудров А.Г. и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа// - М.: Недра, 1988.
3. Трубопроводный транспорт нефти, т.1 (Васильев В.Г., Коршак А.А., Лурье М.В., Писаревский В.М. и др.; под общей ред. С.М. Вайнштока)// - М.: Недра, 2002.
4. Ишмухаметов И.Т., Исаев С.Л., Лурье М.В., Макаров С.П. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов// - М.: "Нефть и газ", 1999.
5. Колпаков Л.Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов// - М.: Недра, 1985.
6. Лурье М.В. Сборник задач по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа// - М.: Нефть и газ, 1995.
7. Козаченко А.Н., Никишин В.И., Поршаков Б.П. Энергетика трубопроводного транспорта газов// - М.: ГУП "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001.
8. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта углеводородов// - М.: ГУП "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002.
9. Лурье М.В. Техника научных исследований. Размерность, подобие и моделирование явлений в проблемах транспорта и хранения нефти и газа// - М.: ГУП "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001.
10. Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов// - М.: Недра, 1982.
11. Справочник по специальным функциям// - М.: Наука, 1979, с.131-132.