

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/°C
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 $\cong 1,5 \cdot 10^9$ 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.

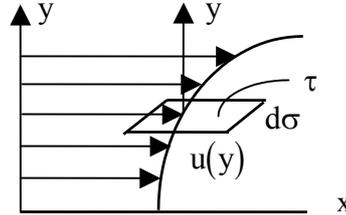


Рис. 1.1. К определению закона вязкого трения

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:

$$[\tau] = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \frac{\text{М} \cdot \text{Л} / \text{Т}^2}{\text{Л}^2} = \frac{\text{М}}{\text{Л} \cdot \text{Т}^2}.$$

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].

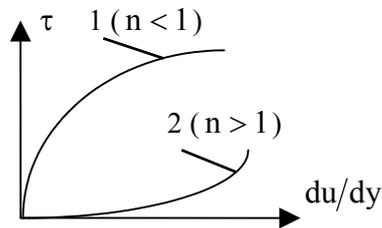


Рис. 1.2. Кривые течения степенной жидкости:
1- псевдопластичной; 2 - дилатантной

Кривые течения, то есть зависимости касательного напряжения τ трения от du/dy (1/с), 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.

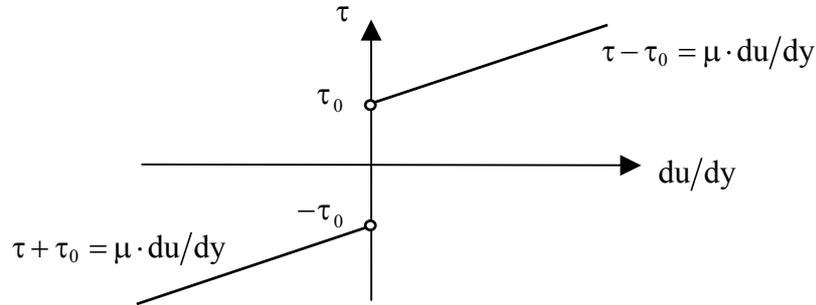


Рис. 1.3. Кривая течения вязко-пластичной жидкости

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/м с²). 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/°С), 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 °С. Определить, какое давление будет в испытуемом участке, если температура нефтепродукта (и трубы) понизится на 3 °С, т.е. станет равной 7 °С.

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 дробинка ($d = 0,5$ 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

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

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

\dot{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*.

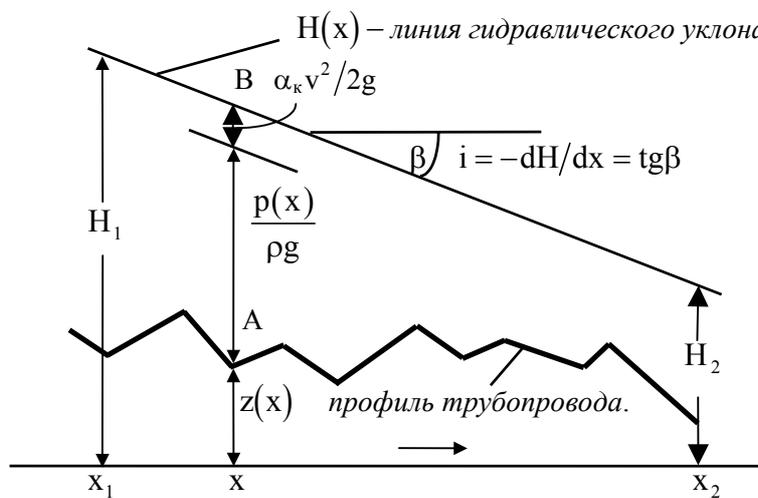


Рис. 1.4. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

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, м ³ /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. Потери 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 ($D = 530 \times 7 \text{ мм}$, $\Delta = 0,2 \text{ мм}$; $L = 120 \text{ км}$; $z_n = 50 \text{ м}$, $z_k = 100 \text{ м}$), 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_B участка нефтепродуктопровода ($D = 530 \times 8 \text{ мм}$, $\Delta = 0,15 \text{ мм}$, $L = 125 \text{ км}$, $z_n = 50 \text{ м}$, $z_k = 150 \text{ м}$, где z_n, z_k – высотные отметки начала и конца участка, соответственно) составляет на бензине ($\rho_B = 740 \text{ кг/м}^3$, $\nu_B = 0,6 \text{ сСт}$) 8,0 млн.т/год. Какова пропускная способность G_D того же участка трубопровода на дизельном топливе ($\rho_D = 840 \text{ кг/м}^3$, $\nu_D = 6,0 \text{ сСт}$), 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 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.

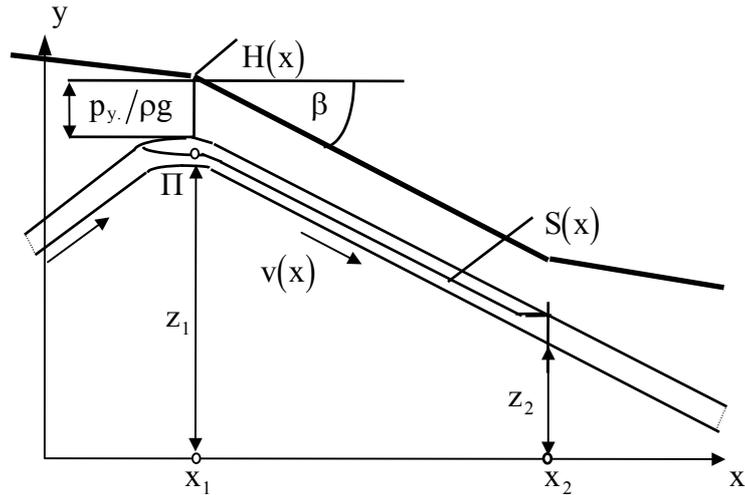


Рис. 1.5. Самотечный участок в трубопроводе

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 $\operatorname{tg}|\beta|$ 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.

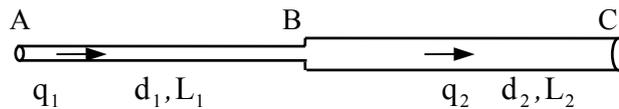


Рис. 1.6. Участок трубопровода со вставкой

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, d_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.

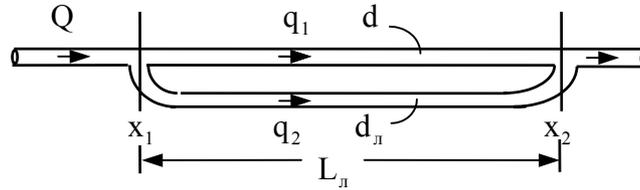


Рис. 1.7. Схема участка трубопровода с лупингом

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

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

и

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

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:

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

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

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:

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

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

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:

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

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:

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

(х - 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, $p_v = 0,01$ 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:

x, 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:

x, 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 ($\nu = 8$ 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 ($D_{\text{в}} = 720 \times 10$ мм, $\Delta_{\text{в}} = 0,15$ мм). Какой длины должна быть такая вставка?

Ответ. 45,655 км.

45. Перекачка авиационного керосина (топлива самолета ТС-1), $\rho = 820$ кг/м³, $\nu = 2,5$ 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 ($\nu = 0,6$ 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 ($D_{\text{л}} = 530$ мм, $\delta_{\text{л}} = 8$ мм), если извест

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

Ответ. $d_3 = 799$ мм.

48. По горизонтальному участку нефтепровода ($D = 820$ мм, $\delta = 10$ мм, $L = 120$ км) перекачивают сырую нефть ($\nu = 25$ 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, $\nu = 25$ 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, $\nu = 4$ 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_v (в линии всасывания насоса) к сечению с большим значением напора H_n (в линии нагнетания).

Величина $H = H_n - H_v$ разности напоров между линиями нагнетания и всасывания, то есть создаваемый насосом напор, называется *дифференциальным напором* насоса

$$H = H_n - H_v = \frac{P_n - P_v}{\rho g}. \quad (38)$$

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 станционных 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 станционных 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	a, м	b, м/(м ³ /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 м ³ /ч	405	251	$0,812 \cdot 10^{-5}$
НМ 2500-230 на подачу 1250 м ³ /ч	425	245	$0,160 \cdot 10^{-4}$
НМ 3600-230	450	304	$0,579 \cdot 10^{-5}$
НМ 3600-230 на подачу 2500 м ³ /ч	430	285	$0,644 \cdot 10^{-5}$
НМ 3600-230 на подачу 1800 м ³ /ч	450	273	$0,125 \cdot 10^{-4}$
НМ 5000-210	450	272	$0,260 \cdot 10^{-5}$
НМ 5000-210 на подачу 3500 м ³ /ч	470	286	$0,529 \cdot 10^{-5}$
НМ 5000-210 на подачу 2500 м ³ /ч	480	236	$0,484 \cdot 10^{-5}$
НМ 7000-210	455	299	$0,194 \cdot 10^{-5}$
НМ 10000-210 на подачу 7000 м ³ /ч	505/484	305	$0,208 \cdot 10^{-5}$
НМ 10000-210 на подачу 5000 м ³ /ч	475/455	263	$0,197 \cdot 10^{-5}$

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

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

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: $q_1 = q_2 = Q$; $H = H_1 + H_2$.

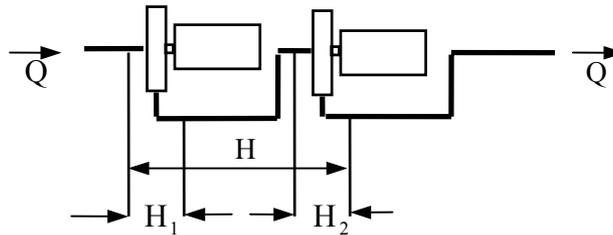
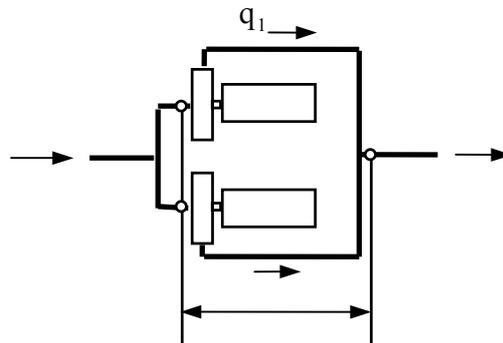


Рис. 1.8. Последовательное соединение насосов

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: $Q = q_1 + q_2$, $H = H_1 = H_2$.



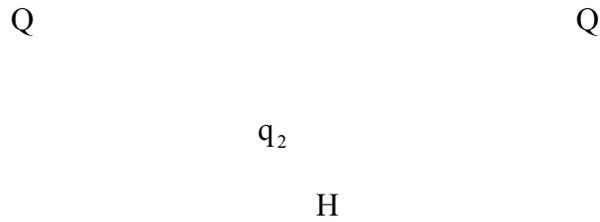


Рис. 1.9. Параллельное соединение насосов

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_k рабочего колеса или частоты ω вращения его вала. Измененная характеристика насоса при изменении диаметра D'_k рабочего колеса или частоты ω' его вращения, связана с характеристикой насоса при номинальных значениях $D_{k,0}, \omega_0$ этих параметров формулами:

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

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

$$H = 270 - 0,465 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 \text{ и } H = 260 - 0,430 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2,$$

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 $\text{м}^3/\text{ч}$), соединенные параллельно, перекачивают вместе $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$. 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 $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

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, $\text{м}^3/\text{ч}$), соединенные параллельно, перекачивают нефть с суммарным расходом $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$, 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, $\text{м}^3/\text{ч}$), соединенные параллельно, перекачивают нефть с суммарным расходом $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$, 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, м³/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 м³/ч, имеет гидравлическую $(Q - H)$ – характеристику: $H = 273 - 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2$ (H - напор, м; Q - расход, м³/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, м³/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, м³/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:

$$[z_n + h_n + F(Q)] - [z_k + h_k] = h_{n-k}(Q) \quad (49)$$

или

$$[z_n + h_n + F(Q)] - [z_k + h_k] = i(Q) \cdot L = \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (49')$$

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

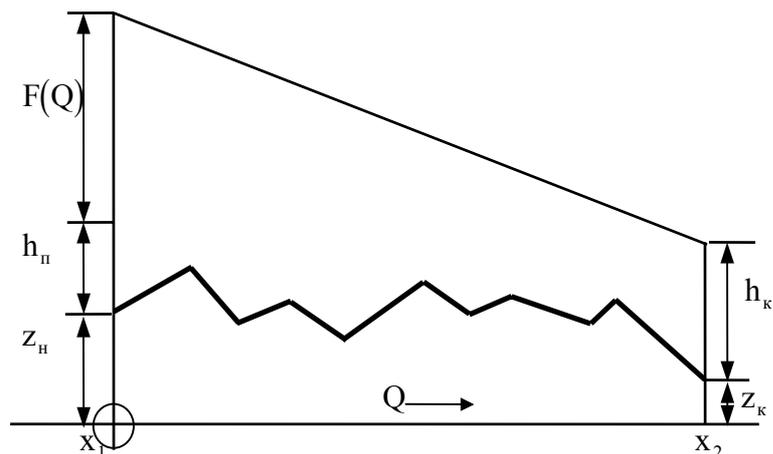


Рис. 1.10. Иллюстрация к уравнению баланса напоров

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:

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

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; $h_{n1}, h_{n2}, \dots, h_{n,n}$ – 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 м³/ч), осуществляют перекачку дизельного топлива ($\rho = 830$ кг/м³, $\nu = 9$ сСт) по участку трубопровода ($D = 530 \times 8$ мм, $L = 120$ км, $\Delta = 0,2$ мм, $z_n = 50$ м, $z_k = 100$ м). Найти расход перекачки и давление в начале участка, если давление p_k в конце участка составляет 0,3 МПа, подпор h_n перед станцией равен 30 м и, кроме того известно, что самотечных участков в трубопроводе нет.

Ответ. 1071 м³/ч, 4,79 МПа.

72. В практически горизонтальном нефтепродуктопроводе ($D = 325 \times 7$ мм, $L = 140$ км, $\Delta = 0,1$ мм) ведется перекачка дизельного топлива ($\rho = 840$ кг/м³, $\nu = 5$ 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 м³/ч). Как и насколько изменится расход перекачки, если один из насосов отключить? Принять $h_n = h_k$.

Ответ. Уменьшится с 301,8 до 218,4 м³/ч.

73. По участку нефтепровода ($D = 820 \times 10$ мм, $L = 125$ км, $\Delta = 0,2$ мм, $z_n = 75$ м, $z_k = 140$ м) ведется перекачка сырой нефти ($\rho = 870$ кг/м³, $\nu = 9$ 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 м³/ч). Определить пропускную способность участка, если известно, что в трубопроводе самотечных участков нет.

Ответ. 3008 м³/ч.

74. Для перекачки бензина ($\rho = 735$ кг/м³, $\nu = 0,6$ сСт) по участку нефтепродуктопровода ($D = 530 \times 7$ мм, $L = 130$ км, $\Delta = 0,15$ мм, $z_n = 25$ м, $z_k = 117$ м) используют два насоса с характеристиками $H = 280 - 0,253 \cdot 10^{-3} Q^2$ (H – в м, Q – в м³/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 м³/ч.

75. Перекачка сырой нефти ($\rho = 870$ кг/м³, $\nu = 25$ 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 м³/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 м³/ч). Определить расход перекачки, если известно, что участок нефтепровода ($D = 820 \times 10$ мм, $L = 150$ км, $z_n = 80$ м, $z_k = 120$ м, $h_n = 70$ м, $h_k = 40$ 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 м³/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, $z_{\text{п}} = 20$ 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 ($z_c = 200$ 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

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

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

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

Здесь $p_{\text{в.}} = p_{\text{атм.}} - p_{\text{у.}}$ – 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 *больших* размеров разность ΔH напоров, входящая в формулу (53), **не выражается** формулой (54) через высотные отметки сечений трубопровода.

Для расчетов используют систему уравнений

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

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.

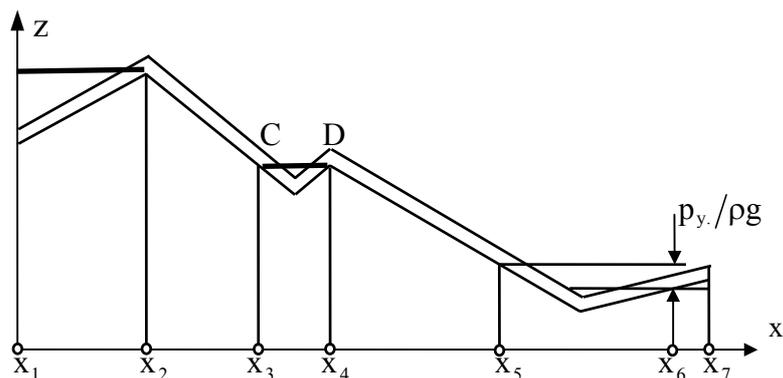


Рис. 1.11. Расчет остаточного объема жидкости в трубопроводе

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:

$$V_{\text{ост.}} = \sum_i V_{\text{C}_i\text{D}_i} \quad (60)$$

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, $p_v = 70$ 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, $v = 15$ 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, $v = 15$ 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 пробилла 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 \bar{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:

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

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 $\bar{p}(x,0)$ 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^+ :

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

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 ($D = 720 \times 10^{-3}$ 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 δp 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.

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.

Ответ. 0,252 МПа ($\approx 2,57$ 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 ($\rho_0 = 840 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 10 \text{ сСт}$) 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 ($\rho_0 = 900 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 25 \text{ сСт}$, $K = 1,3 \cdot 10^9 \text{ Па}$) 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 разнородные 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 $\theta_{д/б}$ дизельного топлива в бензине и $\theta_{б/д}$ бензина в дизельном топливе представляются формулами:

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

$$\theta_{б/д} = \frac{11,37}{T_{в} + 55} \cdot \lg \frac{T_{в}}{T_{в}^0}, \quad (77)$$

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

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 Съенитцера - 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 $c = 1/2$, 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 $V_{пс}$ партии s -го нефтепродукта, поступающий на приемный пункт трубопровода и обеспечивающий полную раскладку образовавшейся смеси, определяется формулой:

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

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 ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$, $v_2 = 9 \text{ сСт}$) 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 ($v_2 = 4$ 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 ($\rho_2 = 840 \text{ кг/м}^3$, $v_2 = 9$ 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: $\rho = 735 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,6$ 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 эпюру 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 °С) и коэффициент λ_n (Вт/м \cdot °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: $C_{ст.} \approx 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$, но коэффициент $\lambda_{ст.}$ ее теплопроводности во много раз больше коэффициента теплопроводности нефти: $\lambda_{ст.} \approx 40 \div 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.

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

Коэффициенты теплопроводности $\lambda_{из.}$ изоляционных материалов также сильно зависят от конкретных свойств изоляции и могут изменяться от 0,02 до 0,2 Вт/(м \cdot °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, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; α_2 – коэффициент теплоотдачи от трубы в грунт (или от поверхности грунта в окружающий воздух), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

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 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

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 ($\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$), 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 ($\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 1900 \text{ Дж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$), при 20°C равна 40 сСт, а при нагреве до 50°C она уменьшается до $8,4$ 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 ($\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$) 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 $1,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})$. 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 окружающего 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:

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

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 ($\lambda_{гр} = 1,8$ Вт/(м⁰С)). Для уменьшения тепловых потерь транспортируемой нефти ($T_0 = 40$ °С) труба имеет слой тепловой изоляции ($\delta_{из.} = 50$ мм, $\lambda_{из.} = 0,25$ Вт/(м⁰С)). Температура $T_{нар.}$ 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 $T_{нар.}$ 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°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 ν – 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°C . Заполнить пустующие ячейки нижеследующей таблицы:

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

Ответ.

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	1000	800	600
$h_r, \text{ м}$	592	412	264
$T, ^\circ\text{C}$	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 $T_1 = 50^\circ\text{C}$ и $\nu_2 = 40 \text{ сСт}$ при $T_2 = 20^\circ\text{C}$) с подогревом, при этом начальная температура T_0 нефти равна 50°C , а температура $T_{\text{нар.}}$ окружающей среды составляет 10°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 – в м, Q – в $\text{м}^3/\text{ч}$, $h_k = h_{\text{п}}$). 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 $\rho_{ст.}$ составляет примерно 0,7 кг/м³.

Относительной плотностью Δ газа по воздуху называется отношение $\rho_{г.}/\rho_{в.}$ плотности $\rho_{г.}$ природного газа к плотности $\rho_{в.}$ 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 $\rho_{ст.}$ природного газа представляется в виде: $\rho_{ст.} = (\rho_{в.})_{ст.} \cdot \Delta$, причем $(\rho_{в.})_{ст.} \approx 1,204$ 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 представляются в виде

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

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.

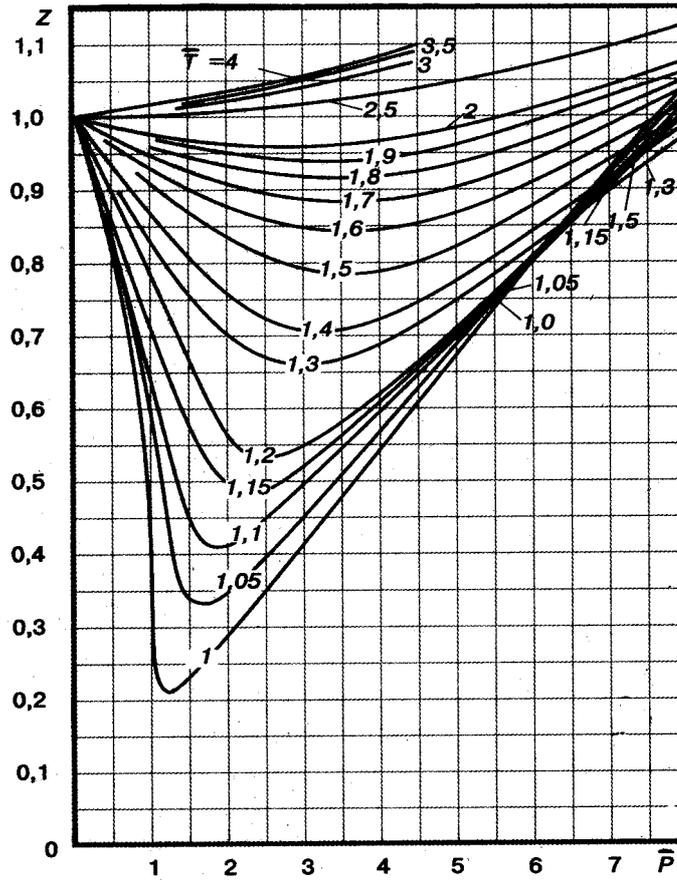


Рис. 1.12. Зависимость $Z(\bar{p}, \bar{T})$ от $\bar{p} = p/p_{кр.}$ и $\bar{T} = T/T_{кр.}$.

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:

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

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-

лени 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 ныщенность 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 $+10^{\circ}\text{C}$ на входе до $+30^{\circ}\text{C}$ 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 $+15^{\circ}\text{C}$ на входе до $+38^{\circ}\text{C}$ 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 ($p_{\text{ст.}} = 0,1013$ МПа, $T = 293$ 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 $p_{\text{ср.}}$ на участке газопровода представляется выражением:

$$p_{\text{ср.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(p_{\text{н.}} + \frac{p_{\text{к.}}^2}{p_{\text{н.}} + p_{\text{к.}}} \right), \quad (112)$$

где $p_{\text{к.}}$ – давление в конце участка газопровода, то есть при $x = L$, где L – протяженность участка.

Давления $p_{\text{н.}}$, $p_{\text{к.}}$ в начале и в конце участка газопровода связаны соотношением:

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

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

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

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

$$Q_{\text{к.}} = 0,0384 \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{н.}}^2 - p_{\text{к.}}^2}{ZT\lambda \cdot L \cdot \Delta}} \cdot d^5 \quad (\text{м}^3/\text{с}), \quad (115)$$

где Δ – плотность газа по воздуху ($Q_{\text{к.}} = \dot{M} / \rho_{\text{ст.}} = \dot{M} \cdot R T_{\text{ст.}} / p_{\text{ст.}}$; $R = R_{\text{в.}} / \Delta$; $R_{\text{в.}} = 287,1$ Дж/(кг К) – газовая постоянная воздуха; $(\rho_{\text{в.}})_{\text{ст.}} \approx 1,204$ кг/м³; $T_{\text{ст.}} = 293$ К, $p_{\text{ст.}} = 0,1013 \cdot 10^6$ 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); $a = \alpha \rho d / M C_p$ (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 $0,3^{\circ}\text{C}/\text{МПа}$), 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. $\text{м}^3/\text{сутки}$. Температура газа в начале участка газопровода составляет 35 $^{\circ}\text{C}$, а в его конце 15 $^{\circ}\text{C}$. Каково среднее значение коэффициента α теплопередачи на этом участке, если температура окружающего грунта составляет 10 $^{\circ}\text{C}$?

Ответ. $2,06$ Вт/(м^2 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 выражать 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 со-

членения 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 °С. Найти коммерческий расход газа

Ответ. 36,82 млн. м³/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 ($T = 15^{\circ}\text{C}$), среднее значение коэффициента Z сжимаемости принять равным 0,9.

Ответ. 24,8 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$.

208. На участке газопровода ($D = 1020 \times 10$ мм, $L = 120$ 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 ($D = 1020 \times 12$ мм, $L = 120$ км), имеющим лупинг ($D_{\text{л.}} = 820 \times 10$ мм, $L_{\text{л.}} = 40$ 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 $+10^{\circ}\text{C}$, 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 ($D_1 = 530 \times 8$ мм), а на остальных 50 км он – однострубный ($D_2 = 720 \times 10$ мм). В одном из вариантов проекта модернизации газопровода решено заменить двухтрубную часть участка однострубной с диаметром $D_2 = 720 \times 10$ 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 ≈ 7 %.

211. Участок газопровода состоит из двух параллельных трубопроводов: первый $D_1 = 1020 \times 12$ 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 $Q_k = 28$ млн. m^3 /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. m^3 /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 $15^\circ C$, а коэффициент сжимаемости $Z \cong 0,9$.

Ответ. 15,79 млн. m^3 /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, $T_{cp} = 12^\circ C$, $Z = 0,92$) составляет 32,5 млн. m^3 /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:

$$\varepsilon_n = f_1(\rho_{\text{в.}}, p_{\text{в.}}, Q_{\text{в.}}, n, D, \dots); \quad N_n = f_2(\rho_{\text{в.}}, p_{\text{в.}}, Q_{\text{в.}}, n, D, \dots);$$

$$\eta_n = f_3(\rho_{\text{в.}}, p_{\text{в.}}, Q_{\text{в.}}, n, D, \dots),$$

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 ε_{n_0} , N_{n_0} , η_{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:

$$Z_{пр.} = 0,91; \quad R_{пр.} = 490 \text{ Дж/кг К}; \quad T_{пр.} = 288 \text{ К}; \quad n = n_0.$$

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*:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n_0} \left(Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.} \left(\frac{n_0}{n} \right)_{пр.}^2, (Q_v)_{пр.} \right); \quad (129)$$

$$N_n = \rho_v \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \cdot \left(\frac{N}{\rho_v} \right)_{пр.} \left(Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.} \left(\frac{n_0}{n} \right)_{пр.}^2, (Q_v)_{пр.} \right); \quad (130)$$

$$\eta_n = \eta_{n_0} \left(Z_{пр.} R_{пр.} T_{пр.} \left(\frac{n_0}{n} \right)_{пр.}^2, (Q_v)_{пр.} \right), \quad (131)$$

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_n в линии нагнетания связана с температурой T_v в линии всасывания формулой:

$$\frac{T_n}{T_v} = \left(\frac{p_n}{p_v} \right)^{\frac{m-1}{m}} = \varepsilon^{\frac{m-1}{m}}, \quad (132)$$

где m – показатель политропы ($m = 1,25 \div 1,30$).

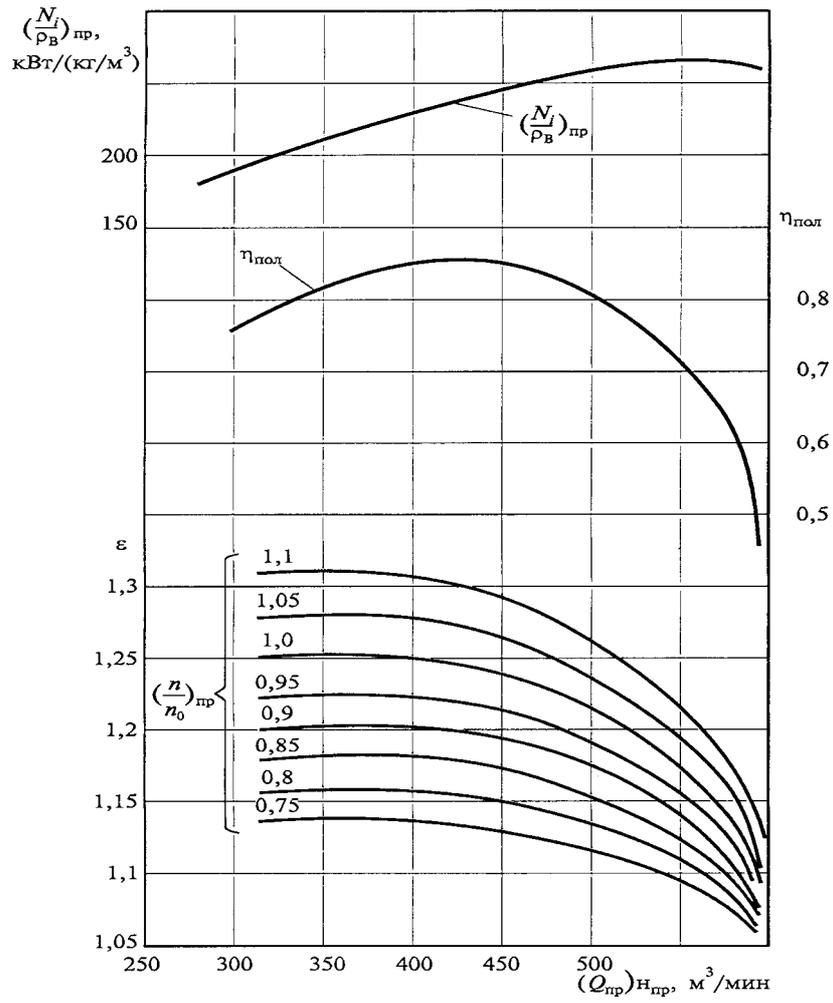


Рис. 1.13. Приведенные характеристики нагнетателя 370-18-1 при $T_{пр.} = 288 \text{ K}$; $Z_{пр.} = 0,9$; $R_{пр.} = 490 \text{ Дж}/(\text{кг K})$

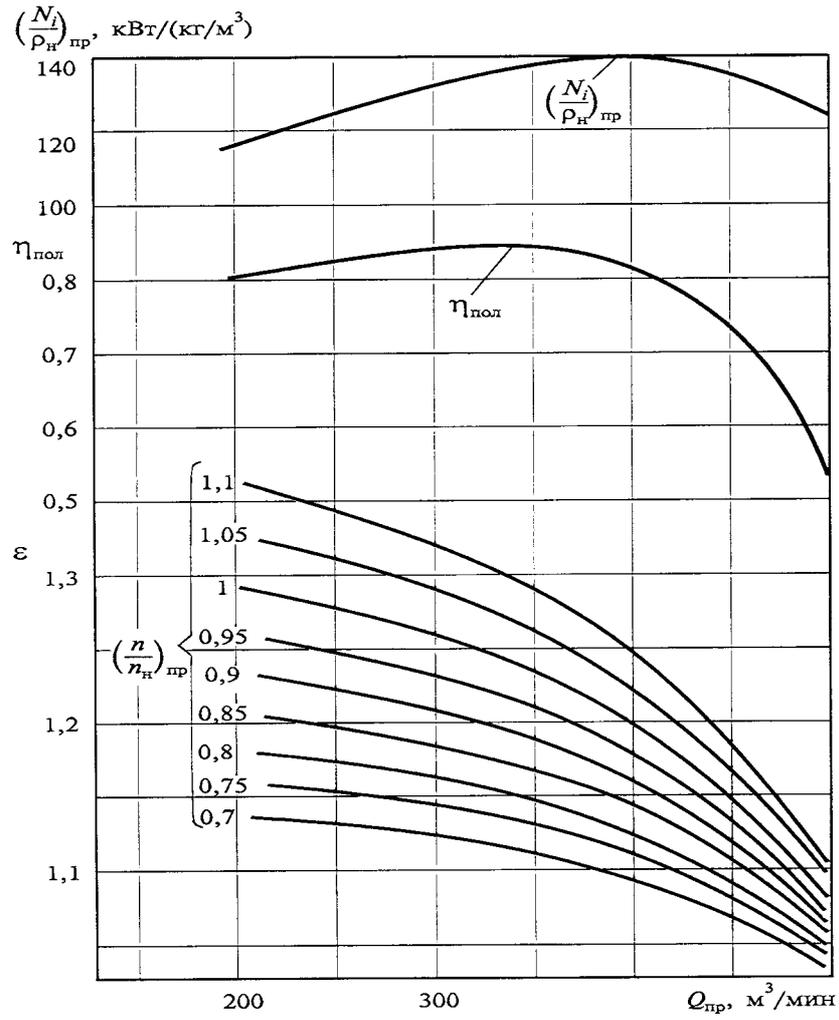


Рис. 1.14. Приведенные характеристики нагнетателя Н-300-1,23 при $T_{пр.} = 288$ К; $Z_{пр.} = 0,91$; $R_{пр.} = 490$ Дж/(кг К).

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 $\varepsilon = p_{н.}/p_{в.}$; $Q_{в.пр.}$ – 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 $\varepsilon = p_{н.}/p_{в.}$; $Q_{в.пр.}$ – 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 p_2 ротора второго нагнетателя должно быть подобрано так, чтобы общая степень сжатия $p_{н2}/p_{в1}$ 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 $p_{в.1} = 3,2$ МПа, $T_{в.1} = 15$ °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):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho + \rho v^2) = -\lambda(Re, k) \frac{1}{d} \frac{\rho v^2}{2}, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e_{\text{внут.}}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(e_{\text{внут.}} + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \rho v \right] = \frac{4}{d} \cdot \Theta_n. \end{cases} \quad (135)$$

Эта система служит для нахождения трех неизвестных функций $\rho(x, t)$, $v(x, t)$ 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:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_{ст.} c^2 \cdot \frac{\partial q_k}{\partial x} = 0, \\ \rho_{ст.} \frac{\partial q_k}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda c^2 \rho_{ст.}^2}{2\gamma d} \cdot \frac{q_k^2}{p}, \end{cases} \quad (138)$$

где $q_k(x, t) = \dot{M}/S = \rho(x, t) \cdot v(x, t)/\rho_{ст.}$ – *массовая скорость газа* (м/с), представляющая собой удельный (то есть рассчитанный на единицу площади сечения трубопровода) массовый расход газа, выраженный в стандартных куб. м.: $\dot{M} = \rho_{ст.} q_k S$. Система уравнений (138) содержит две неизвестные функции: $p(x, t)$ и $q_k(x, t)$ 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 ($\rho_{ст.} \partial q_k / \partial t \ll \partial p / \partial x$) и считают, что движущая сила – градиент давления – уравновешивается только силой $-\lambda c^2 \rho_{ст.}^2 / 2\gamma d \cdot q_k^2 / p$ трения газа о внутреннюю поверхность трубопровода.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda c^2 \rho_{ст.}^2}{2\gamma d} \cdot \frac{q_k^2}{p}.$$

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_n в

сечении $x = 0$ и p_k в сечении $x = L$, то начальное условие можно принять в виде:

$$p^2(x, 0) = p_n^2 - \frac{p_n^2 - p_k^2}{L} \cdot x \quad \text{- для уравнения (139);}$$

$$q_k^2(x, 0) = \frac{\gamma d}{\lambda c^2 \rho_{ст.}} \cdot \frac{p_n^2 - p_k^2}{L} = \text{const.} \quad \text{- для уравнения (140).}$$

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:

$$x = 0: \varepsilon = \frac{p_n(0, t)}{p_v} = \Phi[q_k(0, t)] \quad \text{или} \quad p(L, t) = f_1(t); \quad (141)$$

$$x = L: p_k(L, t) = f_1(t) \quad \text{или} \quad q_k(L, t) = f_2(t). \quad (142)$$

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 $\Delta = 0,59$; $Z_{\text{ср.}} = 0,9$; $T_{\text{ср.}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R = 490 \text{ Дж/(кг К)}$.

Ответ. $a^2 = 1,64 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$.

239. Удельный массовый расход газа $q_{\text{к.}}(x, t) = \dot{M}/S$ в переходном процессе, происходящем на участке газопровода ($D = 1020 \times 10 \text{ мм}$, $S = \pi d^2/4$, $L = 150 \text{ км}$), 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 $1,64 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ (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 $x = L = 150 \text{ км}$ газопровода? Под *временем достижения* понимается момент времени, когда изменение $\Delta Q_{\text{к.}}(L, t)$ расхода газа в сечении $x = 150 \text{ км}$ 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 ($\approx 16,7 \text{ мин}$).

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 осталось 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°C , 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 см^2 . Какой объем газа ($R = 500\text{ Дж}/(\text{кг К})$, $\gamma = C_p/C_v = 1,31$) 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 $+10^{\circ}\text{C}$? 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 ($\gamma = 1,31$, $R = 487\text{ Дж}/(\text{кг К})$) 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 $+10^{\circ}\text{C}$. 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 ($\gamma = 1,31$, $R = 487\text{ Дж}/(\text{кг К})$) 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 $+10^{\circ}\text{C}$. Газ считать совершенным.

Ответ. 17,15 кг/с ($24,15\text{ м}^3/\text{с}$) и 1,29 кг/с ($1,82\text{ м}^3/\text{с}$).

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.