

**Н.В. Чухарева**

## **Расчет простых и сложных промышленных трубопроводов**

Методические указания к выполнению практических работ  
по дисциплине «Физико-химические основы и технологии подготовки,  
транспорта и хранения углеводородов»  
для студентов 3 курса, обучающихся  
по направлению «Нефтегазовое дело»,  
профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Технологические расчеты трубопроводов .....	4
1.1. Гидравлический расчет простых напорных трубопроводов .....	4
1.2. Определение потери напора на трение .....	6
1.3. Графоаналитический способ решения задач.....	9
1.4. Задания для самостоятельной работы.....	10
2. Гидравлические расчеты сложных трубопроводов .....	24
2.1. Гидравлический расчет трубопроводов I категории .....	24
2.2. Гидравлический расчет трубопроводов II категории, .....	25
2.3. Гидравлический расчет трубопроводов III категории.....	26
2.4. Увеличение пропускной способности трубопровода.....	27
2.5. Задания для самостоятельной работы.....	28
3. Расчет трубопроводов при неизотермическом движении однофазной жид- кости.....	39
3.1. Основы гидравлического расчета.....	39
3.2. Задания для самостоятельной работы.....	44

# 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

## 1.1. Гидравлический расчёт простых напорных трубопроводов

Гидравлический расчет трубопроводов охватывает решения трёх типов задач:

- определение диаметра трубопровода;
- определение начального давления ( $P_1$ ) при известном конечном;
- оценка пропускной способности ( $Q$ ).

Основные уравнения гидродинамики:

1. Объемный расход:

$$Q = \omega \cdot S, \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (1)$$

где  $\omega$  – линейная скорость, м/с;

$S$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

2. Массовый расход:

$$G = Q \cdot \rho = \omega \cdot S \cdot \rho, \quad \text{кг}/\text{с}. \quad (2)$$

Для трубопроводов круглого сечения, так как  $S = \frac{\pi d^2}{4} = 0,785 \cdot d^2$ ,

то формула (6.1) примет вид:

$$Q = 0,785 \cdot d^2 \cdot \omega \quad (3)$$

3. Уравнение неразрывности: в любой точке трубопровода массовый расход должен быть постоянным – частный случай выражения закона сохранения вещества:

$$G = Q \cdot \rho = \omega_1 \cdot S_1 \cdot \rho_1 = \omega_2 \cdot S_2 \cdot \rho_2 = \text{const}, \quad \text{кг}/\text{с}. \quad (4)$$

Если жидкость слабосжимаема (несжимаема), то  $\rho_1 = \rho_2$  и тогда

$$Q = \omega_1 \cdot S_1 = \omega_2 \cdot S_2 = \text{const}, \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (5)$$

то есть это уравнение материального баланса потока.

4. За основу гидравлических расчетов трубопроводов принимается уравнение Бернулли, частный случай выражения закона сохранения энергии, которое для идеальной жидкости имеет вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_2^2}{2 \cdot g}, \quad (6)$$

где  $P_1, P_2$  - давления в сечениях 1 и 2, Па;

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_1, \omega_2$  - средние линейные скорости в сечениях 1 и 2, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Каждый член уравнения (6.6) имеет размерность высоты и носит соответствующее название:

$Z_i$  – определяет высоту положения различных точек линии тока над плоскостью сравнения, геометрический напор; удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{P_i}{\rho \cdot g}$ , м – называется пьезометрический напор или статический напор; удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{\omega_i^2}{2 \cdot g}$ , м – называется динамический или скоростной напор, или удельная кинетическая энергия.

Сумма всех трех напоров определяет запас полной механической энергии потока в соответствующем сечении, отнесенной к единице силы тяжести, и называется полным напором  $H$ :

$$H_i = Z_i + \frac{P_i}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_i^2}{2 \cdot g}. \quad (7)$$

Реальная жидкость обладает вязкостью. В уравнении Бернулли появляется слагаемое, учитывающее потери энергии вследствие гидравлических сопротивлений на участке 1-2:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_2^2}{2 \cdot g} + h_{\Pi}, \quad (8)$$

где  $h_{\Pi}$  – напор на преодоление путевых сопротивлений, то есть на преодоление сил трения и местных сопротивлений трубопроводов:

$$h_{\Pi} = h_T + h_M, \quad (9)$$

где  $h_T$  – потеря напора за счет преодоления сил трения по длине трубопровода;

$h_M$  – потеря напора за счет местных сопротивлений.

При  $Z_1 = Z_2$  и  $\omega_1 = \omega_2$ :

$$h_{\Pi} = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g}, \quad \text{м.} \quad (10)$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h_{\Pi}, \quad \text{Па.} \quad (11)$$

## 1.2. Определение потерь напора на трение

Потеря напора на преодоление трения  $h_T$  по длине трубопровода круглого сечения при любом режиме течения определяется по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_T = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot g}, \text{ м.} \quad (12)$$

Из (6.11) следует, что

$$\Delta P = h \cdot \rho \cdot g, \text{ Па.} \quad (13)$$

Тогда потери давления составят

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho, \text{ Па.} \quad (14)$$

Если скорость  $\omega$  выразить через объемный расход и площадь сечения из уравнения (6.1):

$$\omega = \frac{Q}{S}, \text{ м/с.} \quad (15)$$

то уравнение (6.12) примет вид:

$$h_T = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2})^2}{2 \cdot g} = 0,083 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d^5} \cdot Q^2. \quad (16)$$

В наклонном трубопроводе:

$$h_T = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \pm \Delta Z, \text{ м.} \quad (17)$$

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho \pm \Delta Z \cdot \rho \cdot g, \quad (18)$$

«плюс» – когда сумма участков подъема по высоте больше суммы участков спуска; «минус» – когда наоборот.

где  $l$  – длина трубопровода, м;

$d$  – внутренний диаметр, м;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta Z$  – разность геодезических отметок начала и конца трубопровода, м;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления, который в общем случае зависит от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной

шероховатости стенки трубопровода:

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется:

$$\lambda = f(R_e, \varepsilon), \quad (19)$$

где  $\varepsilon$  – относительная шероховатость:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d}, \quad (20)$$

где  $\Delta$  – абсолютная эквивалентная шероховатость выбирается по таблице, мм;

$d$  – внутренний диаметр трубы, мм.

Абсолютная эквивалентная шероховатость – это такая высота шероховатости, при которой в квадратичной зоне сопротивления потери напора равны потерям напора для данной естественной шероховатости трубы.

Для ламинарного режима движения ( $R_e < Re_{кр} = 2320$ ) коэффициент гидравлического сопротивления зависит только от параметра Рейнольдса:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (21)$$

Если учесть, что

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \nu}. \quad (22)$$

и подставить выражение (6.21) в (6.22), то получим:

$$\lambda = \frac{64 \cdot \mu}{\omega \cdot d \cdot \rho} = \frac{64 \cdot \nu}{\omega \cdot d}. \quad (23)$$

В этом случае выражение (12) принимает вид формулы Пуазейля:

$$h_T = \frac{128 \cdot l \cdot \nu \cdot Q}{\pi \cdot d^4 \cdot g}, \quad (24)$$

$$\Delta P = \frac{32 \cdot \mu \cdot l \cdot \omega}{d^2}. \quad (25)$$

При турбулентном режиме движения ( $Re > Re_{кр}$ ) различают три зоны сопротивления.

1. Зона гидравлически гладких труб ( $Re_{кр} < Re \leq 10 \cdot \frac{d}{\Delta}$ ;  $\lambda = f(Re)$ ):

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (26)$$

Выражение (6.26) – формула Блазиуса, используемая при  $Re \leq 10^5$ . Здесь сопротивление шероховатых и гладких труб одинаково.

В зависимости от скорости течения и вязкости жидкости одна и та же труба может быть гидравлически гладкой и гидравлически шероховатой.

2. Переходная зона (смешанного трения) определяется соотношением  $(10 \cdot \frac{d}{\Delta} < Re \leq 500 \cdot \frac{d}{\Delta}; \lambda = f(Re, \varepsilon))$  и коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывают по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (27)$$

3. Зона шероховатых труб или квадратичная зона определяются соотношением  $(Re > 500 \cdot \frac{d}{\Delta}; \lambda = f(\varepsilon))$  и коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывают по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (28)$$

Для нефтепроводов наиболее характерны режимы гладкого или смешанного трения.

Разновидностью формулы Дарси-Вейсбаха, часто применяемой при технологических расчетах трубопроводов, является формула академика Лейбензона:

$$h_T = \beta \cdot \frac{Q^{2-m} \cdot \nu^m}{d^{5-m}} \cdot l, \quad (29)$$

$$\beta = \left( \frac{4}{\pi} \right)^{2-m} \cdot \frac{A}{2 \cdot g}, \quad (30)$$

где  $\beta, A, m$  - коэффициенты, зависящие от режима течения жидкости

Формула (6.29) в явной форме выражает зависимость  $h$  от  $Q$  и получается из выражения (6.12) при условии, что  $\lambda$  определяется выражением вида

$$\lambda = \frac{A}{Re^m}. \quad (31)$$

Формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от режима течения приведены в табл. 6.1.

Потеря напора на единицу длины трубопровода называется гидравлическим уклоном, который определяют из формулы

$$i = \frac{h_T}{l}. \quad (32)$$

Для наглядности и представления о гидравлическом уклоне сделаем построение гидравлического треугольника: отложим от начальной  $A'$  и конечной  $B'$  точек на профиле трассы трубопровода статические (пьезометрические) напоры  $H_1 = \frac{P_1}{\rho \cdot g}$ , и  $H_2 = \frac{P_2}{\rho \cdot g}$ , и концы полученных отрезков соединим прямой  $AB$ . Эта прямая называется линией падения напора или линией гидравлического уклона. Она показывает характер распределения напора по длине трубопровода.

Таблица 1

Формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления

Ламинарный режим	Турбулентный режим		
$Re < 2320$	Зона Блазиуса	Переходная зона	Квадратичная зона
$\lambda = \frac{64}{Re}$	$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$	$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$	$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$
Зона гидравлически гладких труб		Зона гидравлически шероховатых труб	
$m = 1$ $\beta = \frac{128}{\pi g}$	$m = 0,25$ $\beta = \frac{0,241}{g}$	$m = 0,125$ $\beta = 0,0185 \times \varepsilon^{0,125}$	$m = 0$ $\beta = \frac{8\lambda}{\pi^2 g}$

Из построения следует, что гидравлический уклон является тангенсом угла наклона этой прямой к горизонту:

$$i = \frac{H_1 - (H_2 + \Delta Z)}{l}, \quad (33)$$

то есть  $i = const$ .

Величина  $H_1 - (H_2 + \Delta Z) = h_T$  и характеризует потери напора на трение в трубопроводе и показывает, что разность статических напоров целиком затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений, возникающих при течении жидкости по трубопроводу.

Перед началом гидравлического расчета исследуется профиль трассы трубопровода для определения на нем перевальных точек и нахождения его расчетной длины. Эта длина может быть значительно меньше геометрической, а перевальная точка не обязательно является наивысшей точкой трассы. Достаточно закачать жидкость на перевальную точку, чтобы она самотеком достигла конца трубопровода.

### 1.3. Графоаналитический способ решения задач

Определение пропускной способности трубопровода по заданным параметрам его и жидкости, а также определение минимального диа-



метра трубопровода по заданным напору, параметрам жидкости и трубопровода, пропускной способности проводится графоаналитическим методом.

Рассмотрим алгоритм решения задач этого типа на примере второй задачи.

Графоаналитический способ решения основан на предварительном построении графической зависимости  $h_T = f(Q)$  – гидравлической характеристики трубопровода (рис. 6.1). Для этого выполняются операции:

1. последовательно задаем рядом произвольных значений  $Q$ ;
2. находим соответствующие средние линейные скорости  $\omega$ ;
3. рассчитываем соответствующие параметры  $Re$ ;
4. рассчитываем соответствующие параметры  $\lambda$ ;
5. для каждого принятого значения  $Q$  находим потери напора  $h_T$ ;
6. по полученным данным строим график  $h_T = f(Q)$ ;
7. отложив на оси ординат известное значение  $H$ , на оси абсцисс находят соответствующее ему искомое значение  $Q$ .

Аналогично решается и третья задача.

Задаются рядом  $d$ , находят для них  $h_T$ , строят график  $h_T = f(d)$  и по заданной величине  $H$  по графику находят соответствующее ему значение  $d$ .

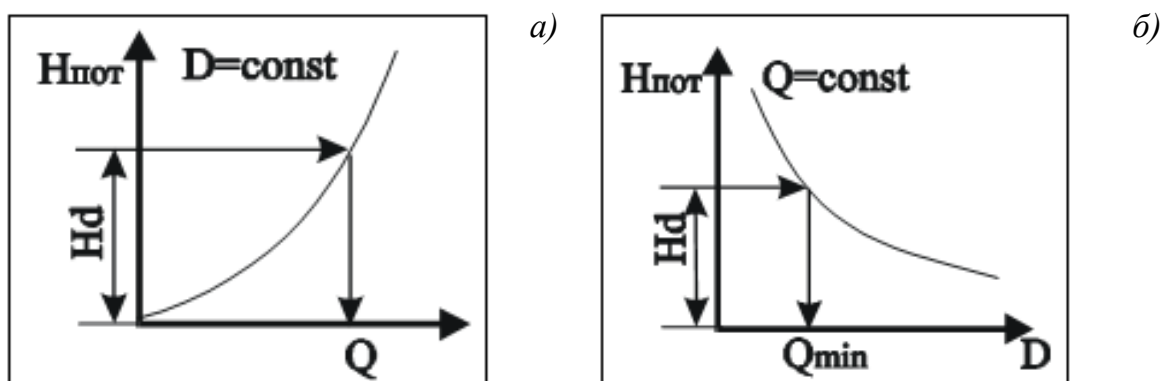


Рис. 1. Графоаналитический метод определения пропускной способности (а) и диаметра (б) простого напорного трубопровода

## 1.4. Задания для самостоятельной работы

### Типовая задача 1

#### Пример:

На устье фонтанной скважины поддерживают напор 85 м, (давление 0,67 МПа). Нефть плотностью 869 кг/м<sup>3</sup>, кинематической вязкостью 0,1376 10<sup>-4</sup>, м<sup>2</sup>/с транспортируется в однофазном состоянии по выкидной линии длиной 10000 м, диаметром 311 мм к «Спутнику», находя-

щемуся выше устья скважины на 12м. Определить пропускную способность выкидной линии.

**Решение:**

1. Для трубопроводов круглого сечения площадь поперечного сечения оценивается как

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,305^2 \text{ м}^2.$$

2. Расчёт линейной скорости потока по формуле (6.15):

$$\omega = \frac{Q}{S} = \frac{G}{\rho \cdot S} = \frac{3000}{869 \cdot 0,073} = 47,29 \text{ м/с}.$$

3. Расчёт числа Рейнольдса по формуле (6.22):

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \frac{0,68 \cdot 0,311 \cdot 1000}{0,1376} = 15369 > 2320 \rightarrow \text{Область Блазиуса}$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = 0,028.$$

4. Расчёт потерь давления по длине трубопровода по формуле (6.18):

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho \pm \Delta Z \cdot \rho \cdot g = 0,028 \cdot \frac{10000}{0,311} \cdot \frac{0,68^2}{2} \cdot 849 + 12 \cdot 849 \cdot 9,8 = 0,28 \text{ МПа}.$$

5. Расчёт начального давления:

$$P_H = P_K + \Delta P = 0,6 + 0,28 = 0,88 \text{ МПа}.$$

6. Расчёт начального напора:

$$H_i = \frac{P_i}{\rho \cdot g} = \frac{0,88 \cdot 10^6}{849 \cdot 9,81} = 106 \text{ м}.$$

Ответ: H=106 м.

**Задание:**

На ДНС в сепараторе первой ступени поддерживается определенное давление. Известна длина сборного коллектора, идущего от «Спутника» до ДНС, его внутренний диаметр, абсолютная эквивалентная шероховатость ( $\Delta=0,1$ ), разность геодезических отметок начала и конца трубопровода, количество перекачиваемой нефти, ее плотность, кинематическая вязкость.

Определить необходимый начальный напор.



Таблица 2

## Исходные данные к заданию 1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление конечное, МПа	0,6	0,2	0,5	0,8	0,4	0,6	0,3	0,5	0,1	0,4
Длина труб-да, км	10	9	8	4	12	5	15	4	20	10
Диаметр труб-да, мм	311	265	317	257	309	317	359	257	367	317
Разность геодезических отметок, м	12	-5	15	-8	10	5	-20	-3	-8	10
Массовый расход нефти, т/сут	3800	3200	3000	2500	3500	3200	4000	2500	3500	3200
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	849	848	921	823	869	869	892	892	862	823
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,1376	0,288	1,633	0,0835	0,403	0,403	0,397	0,397	0,1422	0,0835
Ответ, м	106	56	91	101	86	85	36	66,5	21	73

Продолжение таблицы 2

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Давление конечное, МПа	5	4	3	2	1	4	3,5	2	5,5	2,5
Длина труб-да, км	8	5	6	4	5	5	6	7	8	6
Диаметр труб-да, мм	211	205	200	205	211	305	317	265	305	265
Разность геодезических отметок, м	-5	10	-2	-3	3	8	7	-5	4	-6
Массовый расход нефти, т/сут	1900	2000	2000	1800	1600	3000	3200	2600	3000	2600
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	870	870	840	823	824	892	869	851	823	851
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,59	0,59	0,0765	0,0835	0,0514	0,397	0,403	1,64	0,0835	3,1
<i>Ответ, м</i>	<i>626</i>	<i>514</i>	<i>393,5</i>	<i>261</i>	<i>140</i>	<i>474,5</i>	<i>429</i>	<i>269,05</i>	<i>697</i>	<i>349,24</i>

Окончание таблицы 2

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Давление конечное, МПа	1	3	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5
Длина труб-да, км	7	9	12	11	10	9	8	7	6	5
Диаметр труб-да, мм	305	257	211	209	207	205	265	263	261	259
Разность геодезических отметок, м	10	-12	2	-2	3	-3	4	-4	5	-5
Массовый расход нефти, т/сут	3000	2500	2500	2400	2300	2200	3500	3400	3300	3200
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	869	892	892	862	780	840	823	869	851	823
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,403	0,397	0,397	0,1422	0,014	0,055	0,0835	0,403	3,1	0,0835
<i>Ответ, м</i>	<i>141</i>	<i>358,5</i>	<i>782</i>	<i>717,5</i>	<i>705</i>	<i>589</i>	<i>530</i>	<i>441</i>	<i>439,55</i>	<i>323</i>

## Типовая задача 2

### Пример:

Графоаналитически определить пропускную способность сборного коллектора, если известен начальный напор  $150 \text{ м}$ , длина коллектора  $3000 \text{ м}$ , его внутренний диаметр  $150 \text{ мм}$ , кинематическая вязкость  $0,165 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , абсолютная эквивалентная шероховатость  $0,1 \text{ мм}$  и объемные расходы:  $0,03$ ;  $0,035$ ;  $0,04$ ;  $0,045$ ;  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ .

### Решение:

1. Определим площадь

$$S = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,150^2 = 0,0177 \text{ м}^2.$$

2. Определим скорость по формуле (6.1)

$$\omega_1 = \frac{Q_1}{S} = \frac{0,03}{0,0177} = 1,6985 \text{ м/с};$$

$$\omega_2 = \frac{Q_2}{S} = \frac{0,035}{0,0177} = 1,9816 \text{ м/с};$$

$$\omega_3 = \frac{Q_3}{S} = \frac{0,04}{0,0177} = 2,2647 \text{ м/с};$$

$$\omega_4 = \frac{Q_4}{S} = \frac{0,045}{0,0177} = 2,5478 \text{ м/с};$$

$$\omega_5 = \frac{Q_5}{S} = \frac{0,05}{0,0177} = 2,8309 \text{ м/с}.$$

3. Определим число Рейнольдса по формуле (6.22)

$$\text{Re}_1 = \frac{\omega_1 \cdot d}{\nu} = \frac{1,6985 \cdot 0,15}{0,165 \cdot 10^{-4}} = 16331,8635;$$

$$\text{Re}_2 = \frac{\omega_2 \cdot d}{\nu} = \frac{1,9816 \cdot 0,15}{0,165 \cdot 10^{-4}} = 19053,8407;$$

$$\text{Re}_3 = \frac{\omega_3 \cdot d}{\nu} = \frac{2,2647 \cdot 0,15}{0,165 \cdot 10^{-4}} = 21775,818;$$

$$\text{Re}_4 = \frac{\omega_4 \cdot d}{\nu} = \frac{2,5478 \cdot 0,15}{0,165 \cdot 10^{-4}} = 24497,7952;$$

$$\text{Re}_5 = \frac{\omega_5 \cdot d}{\nu} = \frac{2,8309 \cdot 0,15}{0,165 \cdot 10^{-4}} = 27219,7724.$$

$$10 \cdot \frac{d}{\Delta} = 10 \cdot \frac{0,15}{0,1} = 15000 \div 500 \cdot \frac{d}{\Delta} = 500 \cdot \frac{0,15}{0,1} = 750000 \rightarrow \text{зона шероховатых труб}$$

или смешанного трения ( $10 \cdot \frac{d}{\Delta} < \text{Re} \leq 500 \cdot \frac{d}{\Delta}$ ):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25},$$

$\lambda_1=0,029;$   
 $\lambda_2=0,0281;$   
 $\lambda_3=0,0273;$   
 $\lambda_4=0,0266;$   
 $\lambda_5=0,0261.$

4. Определим потери напора на трение по формуле (6.16):

$$h_T = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \quad \text{м,}$$

$h_{\text{тр}1.}=85,2816 \text{ м;}$   
 $h_{\text{тр}2.}=112,3263 \text{ м;}$   
 $h_{\text{тр}3.}=142,6862 \text{ м;}$   
 $h_{\text{тр}4.}=176,3033 \text{ м;}$   
 $h_{\text{тр}5.}=213,1315 \text{ м.}$

5. Строим график  $hm=f(Q)$  и определяем пропускную способность сборного коллектора при известном начальном напоре.

**Задание:**

Графоаналитически определить пропускную способность сборного коллектора, если известен начальный напор, длина коллектора, его внутренний диаметр, разность геодезических отметок, плотность и кинематическая вязкость перекачиваемой нефти.



Таблица 3

## Исходные данные к заданию 2

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напор, м	160	120	110	90	105	115	110	180	110	105
Длина, м	2000	2500	2000	1000	1500	2000	1800	2000	1200	8000
Диаметр, мм	95	110	146	95	113	100	100	109	100	311
Кинематическая вязкость нефти $\cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup> /с	0,076	0,2	0,2	0,076	0,2	0,25	1	0,59	0,25	0,137
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2
Объемные расходы, м <sup>3</sup> /с										
Q <sub>1</sub>	0,018	0,018	0,02	0,025	0,030	0,012	0,013	0,016	0,012	0,10
Q <sub>2</sub>	0,016	0,016	0,025	0,022	0,025	0,013	0,014	0,018	0,014	0,12
Q <sub>3</sub>	0,014	0,014	0,03	0,020	0,022	0,014	0,015	0,019	0,016	0,14
Q <sub>4</sub>	0,012	0,012	0,04	0,018	0,020	0,015	0,016	0,020	0,018	0,16
Q <sub>5</sub>	0,010	0,010	0,05	0,016	0,018	0,016	0,017	0,022	0,020	0,18
Ответ, м <sup>3</sup> /с	0,0165	0,0167	0,038	0,0175	0,0223	0,0139	0,0147	0,0205	0,018	0,137

Продолжение таблицы 3

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Напор, м	100	230	125	425	95	1100	65	45	70	105
Длина, м	1000	2000	1000	3000	2500	6000	2000	1000	900	4500
Диаметр, мм	100	100	100	105	256	95	112	93	235	146
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,25	0,28	0,25	0,2	0,08	0,65	0,14	0,076	0,25	0,09
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1
Объемные расходы, м <sup>3</sup> /с										
Q <sub>1</sub>	0,012	0,018	0,03	0,01	0,10	0,025	0,012	0,018	0,10	0,03
Q <sub>2</sub>	0,014	0,019	0,025	0,015	0,12	0,022	0,014	0,016	0,12	0,025
Q <sub>3</sub>	0,016	0,02	0,02	0,02	0,14	0,020	0,016	0,014	0,14	0,02
Q <sub>4</sub>	0,018	0,021	0,015	0,025	0,16	0,018	0,018	0,012	0,16	0,015
Q <sub>5</sub>	0,02	0,022	0,01	0,03	0,18	0,016	0,020	0,010	0,18	0,01
<i>Ответ, м<sup>3</sup>/с</i>	<i>0,0188</i>	<i>0,0201</i>	<i>0,0222</i>	<i>0,026</i>	<i>0,154</i>	<i>0,0212</i>	<i>0,0147</i>	<i>0,0113</i>	<i>0,167</i>	<i>0,027</i>

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Напор, м	95	130	80	125	70	75	115	60	85	130
Длина, м	2700	2000	1000	1000	5500	2800	2800	1500	1900	6500
Диаметр, мм	115	115	120	85	198	120	156	105	115	305
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,95	0,28	0,25	0,32	0,07	0,022	0,2	0,25	0,25	0,137
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,2	0,2	0,2	0,15	0,1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,1
Объемные расходы, м <sup>3</sup> /с										
Q <sub>1</sub>	0,013	0,018	0,03	0,012	0,02	0,012	0,02	0,012	0,012	0,10
Q <sub>2</sub>	0,014	0,019	0,025	0,013	0,025	0,014	0,025	0,013	0,014	0,12
Q <sub>3</sub>	0,015	0,02	0,02	0,014	0,03	0,016	0,03	0,014	0,016	0,14
Q <sub>4</sub>	0,016	0,021	0,015	0,015	0,04	0,018	0,04	0,015	0,018	0,16
Q <sub>5</sub>	0,017	0,022	0,01	0,016	0,05	0,020	0,05	0,016	0,02	0,18
<i>Ответ, м<sup>3</sup>/с</i>	<i>0,0156</i>	<i>0,0213</i>	<i>0,0270</i>	<i>0,0134</i>	<i>0,044</i>	<i>0,0184</i>	<i>0,039</i>	<i>0,0132</i>	<i>0,0177</i>	<i>0,17</i>

### Типовая задача 3

#### Пример:

Задан перепад давления на сборном коллекторе  $\Delta P=0,08$  МПа. Известны: массовый расход нефти  $G=824$  т/сут, плотность нефти  $\rho=870$  кг/м<sup>3</sup> и ее кинематическая вязкость  $\nu=0,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с, длина его  $L=13$  км, шероховатость стенок трубы  $\Delta=0,15$  мм,  $d_1=0,25$ ,  $d_2=0,29$ ,  $d_3=0,35$ ,  $d_4=0,4$ ,  $d_5=0,45$  м. Определить диаметр коллектора для перекачки нефти.

Задача такого типа решается графоаналитическим способом, поскольку коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса, а, следовательно, и от неизвестного диаметра.

#### Решение:

1. Находим скорость по формуле (6.15)

$$\omega_1 = \frac{Q}{S} = \frac{G}{\rho \cdot S} = \frac{(824 \cdot 1000 / 3600)}{870 \cdot 0,785 \cdot 0,25^2} = 0,22 \text{ м/с};$$

$$\omega_2 = 0,17 \text{ м/с}; \omega_3 = 0,11 \text{ м/с}; \omega_4 = 0,09 \text{ м/с}; \omega_5 = 0,07 \text{ м/с}.$$

2. Находим параметр Рейнольдса по формуле (6.22)

$$\text{Re}_1 = \frac{\omega_1 \cdot d}{\nu} = 698,22;$$

$$\text{Re}_2 = 601,92; \text{Re}_3 = 498,73; \text{Re}_4 = 436,39; \text{Re}_5 = 387,90.$$

Так параметр Рейнольдса меньше 2320, следовательно, ламинарный режим течения.

3. Определим коэффициент гидравлического сопротивления по формуле (6.21):

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}},$$

$$\lambda_1=0,0917; \lambda_2=0,1063; \lambda_3=0,1283; \lambda_4=0,1467; \lambda_5=0,1650.$$

4. Определим перепад давления по формуле (6.14):

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho,$$

$$\Delta P_1=0,1035 \text{ МПа}; \Delta P_2=0,0572 \text{ МПа}; \Delta P_3=0,0269 \text{ МПа}; \Delta P_4=0,0158 \text{ МПа}; \Delta P_5=0,0099 \text{ МПа}.$$

5. Строим график  $\Delta P_Z = f(d)$ . Используя этот график и заданный перепад давления, определяем требуемый диаметр коллектора.

#### Задание:

Задан перепад давления на сборном коллекторе  $\Delta P$ . Известны: массовый расход нефти  $G$ , плотность нефти  $\rho$  и ее кинематическая вязкость  $\nu$ , длина его  $L$ , шероховатость стенок трубы  $\Delta$ . Определить диаметр коллектора для перекачки нефти.

Таблица 4

## Исходные данные к заданию 3

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15
Массовый расход нефти, т/сут	2740	8220	2740	1900	2500	3500	4000	5000	6000	3000
Перепад давления, МПа	0,25	0,15	0,02	0,3	0,04	0,25	0,25	0,3	0,3	0,065
Длина, км	18	10	15	10	12	15	20	30	20	15
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	860	860	860	849	848	848	870	869	870	892
Кинематическая вязкость нефти·10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,6	1,437	0,137	0,137	2,6	1,633	0,590	0,403	0,59	0,397
Диаметры, м										
d <sub>1</sub>	0,20	0,30	0,40	0,20	0,50	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35
d <sub>2</sub>	0,25	0,35	0,45	0,25	0,55	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40
d <sub>3</sub>	0,30	0,40	0,50	0,30	0,60	0,35	0,35	0,40	0,40	0,45
d <sub>4</sub>	0,35	0,45	0,55	0,35	0,65	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50
d <sub>5</sub>	0,40	0,50	0,60	0,40	0,70	0,45	0,45	0,50	0,50	0,55
Ответ, м	0,31	0,447	0,456	0,225	0,55	0,355	0,37	0,41	0,413	0,405

Продолжение таблицы 4

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,2	0,1	0,15	0,15	0,2	0,15	0,1	0,15	0,1	0,15
Массовый расход нефти, т/сут	300 0	7200	3200	2900	4600	5800	4300	5250	4300	3200
Перепад давления, МПа	0,55	0,25	0,02	0,45	0,02	0,25	0,7	0,5	0,25	0,065
Длина, км	11	10	18	10	12	6	14	18	13	14
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	860	860	856	849	848	848	870	870	860	875
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,6	1,437	0,137	0,137	0,6	1,8	0,7	1,4	1,7	0,5
Диаметры, м										
d <sub>1</sub>	0,22	0,30	0,5	0,22	0,50	0,23	0,25	0,30	0,30	0,35
d <sub>2</sub>	0,25	0,35	0,55	0,25	0,55	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40
d <sub>3</sub>	0,3	0,40	0,6	0,30	0,58	0,3	0,35	0,40	0,40	0,45
d <sub>4</sub>	0,35	0,45	0,65	0,35	0,65	0,35	0,40	0,45	0,45	0,50
d <sub>5</sub>	0,4	0,50	0,7	0,40	0,70	0,4	0,45	0,50	0,50	0,55
<i>Ответ, м</i>	<i>0,24</i>	<i>0,412</i>	<i>0,513</i>	<i>0,235</i>	<i>0,57</i>	<i>0,337</i>	<i>0,288</i>	<i>0,338</i>	<i>0,37</i>	<i>0,417</i>

Окончание таблицы 4

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,15	0,1	0,2	0,15	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,2
Массовый расход нефти, т/сут	175 0	6020	5500	4600	8800	1200	4300	4000	6050	2000
Перепад давления, МПа	0,75	0,65	0,2	1,25	0,1	0,45	1,1	0,25	0,7	0,4
Длина, км	18	10	17	10	11	19	20	23	20	14
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	850	865	855	846	877	890	845	888	836	864
Кинематическая вязкость нефти*10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,39 7	1,437	0,135	0,167	1,2	1,2	0,7	0,95	1,3	0,6
<i>Диаметры, м</i>										
d <sub>1</sub>	0,17	0,3	0,25	0,20	0,4	0,17	0,25	0,3	0,3	0,22
d <sub>2</sub>	0,2	0,32	0,3	0,25	0,45	0,2	0,3	0,32	0,35	0,23
d <sub>3</sub>	0,25	0,4	0,35	0,30	0,5	0,25	0,35	0,4	0,38	0,3
d <sub>4</sub>	0,3	0,45	0,4	0,35	0,55	0,3	0,4	0,45	0,45	0,35
d <sub>5</sub>	0,35	0,5	0,45	0,40	0,6	0,35	0,5	0,5	0,5	0,4
<i>Ответ, м</i>	<i>0,21</i>	<i>0,417</i>	<i>0,39</i>	<i>0,233</i>	<i>0,527</i>	<i>0,238</i>	<i>0,285</i>	<i>0,332</i>	<i>0,358</i>	<i>0,237</i>

## 2. Гидравлические расчёты сложных трубопроводов

Различают четыре категории сложных трубопроводов:

- I. Коллектор постоянного диаметра с распределенным по длине отбором продукции (раздаточный коллектор в резервуарах, отстойниках, сепараторах).
- II. Сборный коллектор переменного диаметра с распределенным по длине поступлением продукции (система сбора скважинной продукции).
- III. Коллектор с параллельным участком трубопровода (байпас на водоводах).
- IV. Замкнутый коллектор (кольцевой водовод).

### 2.1. Гидравлический расчет трубопровода I категории

Введем понятие о двух расходах:

- транзитный расход жидкости  $Q_T$ , который поступает на участки, примыкающие к рассматриваемому;
- путевой расход жидкости ( $Q_{II}$  – суммарный путевой расход жидкости), который отбирается по длине коллектора через как сумма всех отборов  $q_i$  по длине.

Уравнение материального баланса

$$Q = Q_T + Q_{II} = Q_T + \sum_{i=1}^n q_i, \quad (34)$$

где  $q_i$  - объёмные расходы жидкости в ответвлениях.

Расчетная схема сложного трубопровода I категории представлена на рис. 6.2.

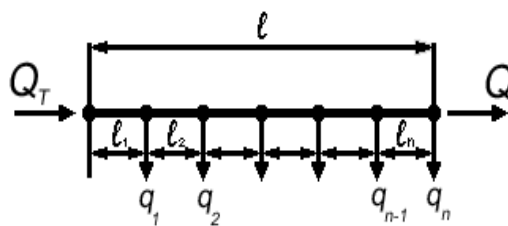


Рис. 2. Расчетная схема сложного трубопровода I категории

Поскольку диаметр раздаточного коллектора одинаков на всем протяжении, а расходы жидкости на различных участках разные, то и режимы течения на каждом участке могут быть разные (рис. 6.2).

Перепад давления при расчете сложных трубопроводов можно рассчитывать и по формуле Дарси-Вейсбаха и по формуле Лейбензона:



$$\Delta P = P_1 - P_2 = \beta \cdot \frac{Q^{2-m} \cdot v^m \cdot l}{d^{5-m}} \cdot \rho \cdot g, \quad \text{Па.} \quad (35)$$

Для рассматриваемого случая перепад на 1-ом участке трубопровода будет:

$$P - P_1 = \beta_1 \cdot \frac{(Q_T)^{2-m} \cdot v^m \cdot l_1}{d^{5-m}} \cdot \rho \cdot g. \quad (36)$$

На втором участке:

$$P_1 - P_2 = \beta_2 \cdot \frac{(Q_T - q_1)^{2-m} \cdot v^m \cdot l_2}{d^{5-m}} \cdot \rho \cdot g. \quad (37)$$

На n-ом участке:

$$P_{n-1} - P_n = \beta_n \cdot \frac{[Q_T - (q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1})]^{2-m} \cdot v^m \cdot l_n}{d^{5-m}} \cdot \rho \cdot g. \quad (38)$$

Общий перепад по всей длине коллектора:

$$P - P_n = \frac{v^m \cdot \rho \cdot g}{d} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{n-1} \left( Q_T - \sum_{i=1}^{n-1} q_i \right)^{2-m} \cdot l_i \cdot \beta_i \right]. \quad (39)$$

Таким образом, для сложного трубопровода I категории общий перепад давления равен сумме падений давления по участкам:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i. \quad (40)$$

**Алгоритм решения задачи на определение перепада давления:**

1. Находятся скорости движения жидкости по участкам.
2. Для каждого участка трубопровода определяется режим движения жидкости по значению параметра  $Re$  и  $\varepsilon$ .
3. Рассчитывается коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$ , если расчет ведется по формуле Дарси-Вейсбаха, или выбираются по табл. 6.1 значения коэффициентов  $\beta$  и  $m$ , если расчет ведется по формуле Лейбензона.
4. Рассчитываются потери давления на каждом участке.
5. Рассчитывается общая потеря давления по всей длине коллектора, как сумма потерь на отдельных участках.

## 2.2. Гидравлический расчет трубопровода II категории

Возможно два варианта трубопроводов данной категории.

Первый – последовательное соединение труб разного диаметра. В этом случае расход жидкости остается постоянным по всей длине трубопровода  $Q = const$ , а потери напора в трубопроводе будут равны сумме потерь напора на участках:

$$h_{T \text{ общ}} = h_{T1} + h_{T2} + \dots + h_i. \quad (41)$$

Второй вариант – переменный диаметр трубопровода и переменный по длине расход.

Уравнение материального баланса:

$$Q = Q_T + Q_{II} = Q_T + \sum_{i=1}^n q_i. \quad (42)$$

Так как диаметры труб по участкам разные, то на разных участках возможны различные режимы течения (рис. 6.3).

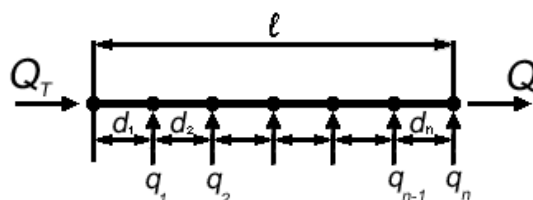


Рис. 3. Расчетная схема сложного трубопровода II категории

Алгоритм задачи на определение потери давления по всему трубопроводу аналогичен алгоритму предыдущей задачи.

### 2.3. Гидравлический расчет трубопровода III категории

Ответвления от основной магистрали могут быть замкнутыми и разомкнутыми.

Для замкнутых ответвлений – лупингов (от англ. – петля) – справедливы соотношения:

1. Расход, проходящий через весь разветвленный участок, равен сумме расходов в отдельных ветвях:

$$Q_{\text{ОБЩ}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (43)$$

- Потери напора для всего разветвления и в любой его ветви равны между собой, так как разность напоров в точках А и В одинакова для всех ветвей:

$$h_{\text{ОБЩ}} = h_1 = h_2 = h_n = H_A - H_B, \quad (44)$$

где  $Q_{\text{общ}}$  и  $h_{\text{общ}}$  – соответственно расход и потери напора на всем разветвленном участке.

Характеристика сложного трубопровода, имеющего замкнутое ответвление представлена на рис. 6.4.

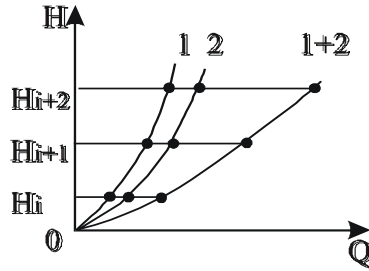


Рис. 6.4. Характеристика сложного трубопровода, имеющего замкнутое ответвление

## 2.4. Увеличение пропускной способности трубопровода

Для увеличения пропускной способности трубопровода можно использовать или вставку большего диаметра или лупинг. Ответить на вопрос: «Что лучше?» поможет расчет гидравлического уклона: лучшим будет тот вариант, где  $i$  - минимально.

Если трубопровод имеет вставку другого диаметра  $d_B$ , то гидравлический уклон в этой вставке определяется через гидравлический уклон и диаметр основной трубы:

$$i_B = i \cdot \left( \frac{d}{d_B} \right)^{5-m} \quad (45)$$

при этом  $Q_B = Q$ .

Если на трубопроводе есть замкнутый параллельный участок (лупинг), диаметром  $d_L$ , то его гидравлический уклон также определяется через гидравлический уклон и диаметр основного трубопровода:

$$i_L = \frac{i}{\left[ 1 + \left( \frac{d_L}{d} \right)^{\frac{5-m}{2-m}} \right]^{2-m}} \quad (46)$$

В этих формулах предполагается, что характер течения в основной трубе, во вставке и лупинге одинаков, то есть  $m$  – одинаково.

Если  $d_L = d$ , тогда при ламинарном течении ( $m = 1$ ):

$$i_L = 0,5 \cdot i; \quad (47)$$

при турбулентном, если  $m = 0,25$ :

$$i_L = 0,296 \cdot i; \quad (48)$$

если  $m = 0$ :

$$i_L = 0,25 \cdot i. \quad (49)$$

Чтобы проверить режим в лупинге, нужно знать расход жидкости через него. Как рассчитать его, зная расход в основной магистрали и диаметры трубопроводов?

Суммарный расход на сдвоенном участке:

$$Q = Q_{\text{Л}} + Q_{\text{М}}, \quad (50)$$

где  $Q_{\text{Л}}$  - расход в лупинге;

$Q_{\text{М}}$  - расход в основной магистрали на сдвоенном участке;

$Q$  - расход в одиночном трубопроводе.

Исходя из равенства потерь напора (или давления) на сдвоенном участке:  $\Delta P_{\text{Л}} = \Delta P_{\text{М}}$  и воспользовавшись формулой Лейбензона для расчета потери давления, можно записать для основного и параллельного трубопроводов:

$$\frac{Q_{\text{Л}}^{2-m}}{d_{\text{Л}}^{5-m}} = \frac{Q_{\text{М}}^{2-m}}{d_{\text{М}}^{5-m}}. \quad (51)$$

Сделаем преобразования:

$$\left(\frac{Q_{\text{Л}}}{Q_{\text{М}}}\right)^{2-m} = \left(\frac{d_{\text{Л}}}{d_{\text{М}}}\right)^{5-m} \quad \frac{Q_{\text{Л}}}{Q_{\text{М}}} = \left(\frac{d_{\text{Л}}}{d_{\text{М}}}\right)^{\frac{5-m}{2-m}} \quad Q_{\text{Л}} = Q_{\text{М}} \cdot \left(\frac{d_{\text{Л}}}{d_{\text{М}}}\right)^{\frac{5-m}{2-m}}. \quad (52)$$

Общий расход:

$$Q = Q_{\text{М}} + Q_{\text{М}} \cdot \left(\frac{d_{\text{Л}}}{d_{\text{М}}}\right)^{\frac{5-m}{2-m}} = Q_{\text{М}} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{\text{Л}}}{d_{\text{М}}}\right)^{\frac{5-m}{2-m}}\right], \quad d_{\text{М}} = d. \quad (53)$$

Отсюда:

$$Q_{\text{М}} = \frac{Q}{1 + \left(\frac{d_{\text{Л}}}{d}\right)^{\frac{5-m}{2-m}}}, \quad (54)$$

$$Q_{\text{Л}} = \frac{Q}{1 + \left(\frac{d}{d_{\text{Л}}}\right)^{\frac{5-m}{2-m}}}. \quad (55)$$

## 2.5. Задания для самостоятельной работы

### Типовая задача 1

#### Пример:

В начало сборного коллектора длиной 10 км, диаметром 0,2 м подают товарную нефть в количестве 180 м<sup>3</sup>/ч, вязкостью 20 мПа·с и плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>. Из сборного коллектора нефть отбирают в трех точках, соответственно, 20 м<sup>3</sup>/ч, 50 м<sup>3</sup>/ч, 100 м<sup>3</sup>/ч.

#### Решение:

Алгоритм решения данной задачи заключается в представлении сложного трубопровода состоящим из нескольких участков, различающихся по величине расходов. Каждый участок рассчитывается отдельно как простой трубопровод. Общий перепад давления равен сумме потерь давления по участкам.

1. Вначале определяют скорость нефти до первой точки отбора

$$\omega_1 = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot G}{(\pi \cdot d^2) \cdot \rho \left( 3600 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 800 \cdot 10^{-3} \right)} = 1,98 \text{ м/с.}$$

2. Режим движения на данном участке турбулентный, так как

$$\text{Re}_1 = \frac{\omega_1 \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,98 \cdot 0,2 \cdot 800}{20 \cdot 10^{-3}} = 15750 > 2320 \text{ (зона Блазиуса).}$$

3. Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  определяют для каждого участка в отдельности.

$$\lambda_i = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} = \frac{0,3164}{15750^{0,25}} = 0,028.$$

4. Потери давления на первом участке определяют по формуле:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho,$$

$$\Delta P = 0,028 \cdot \frac{4000}{0,2} \cdot \frac{1,98^2}{2} \cdot 800 = 0,875 \text{ МПа.}$$

5. Для определения потерь давления на втором участке вначале рассчитывают скорость потока нефти

$$\omega_2 = \frac{(G - q_1)}{\rho \cdot S} = \frac{4 \cdot (180 - 20)}{(3600 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 800 \cdot 10^{-3})} = 1,76 \text{ м/с.}$$

6. Режим движения на данном участке турбулентный, так как

$$\text{Re}_2 = \frac{\omega_2 \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,76 \cdot 0,2 \cdot 800}{20 \cdot 10^{-3}} = 14200 > 2320 ;$$

$$\lambda_2 = \frac{0,3164}{14200^{0,25}} = 0,0292.$$

7. Потери давления на втором участке

$$\Delta P_2 = 0,0292 \cdot \frac{200}{0,2} \cdot \frac{1,76^2}{2} \cdot 800 = 0,337 \text{ МПа.}$$

8. Аналогично скорость нефти на третьем участке:

$$\omega_3 = \frac{(G - (q_1 + q_2))}{\rho \cdot S} = \frac{4 \cdot (180 - (20 + 50))}{(3600 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 800 \cdot 10^{-3})} = 1,21 \text{ м/с.}$$

9. Режим движения на данном участке турбулентный, так как

$$\text{Re}_3 = \frac{\omega_3 \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,21 \cdot 0,2 \cdot 800}{20 \cdot 10^{-3}} = 9560 > 2320.$$

10. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda_3 = \frac{0,3164}{9560^{0,25}} = 0,0321.$$

11. Потери давления на третьем участке

$$\Delta P_3 = 0,0321 \cdot \frac{3000}{0,2} \cdot \frac{1,21^2}{2} \cdot 800 = 0,278 \text{ МПа}.$$

12. Скорость нефти на четвертом участке

$$\omega_3 = \frac{(G - (q_1 + q_2 + q_3))}{\rho \cdot S} = \frac{4 \cdot (180 - (20 + 50 + 100))}{(3600 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 800 \cdot 10^{-3})} = 1,11 \text{ м/с}.$$

13. Режим движения на данном участке:

$$\text{Re}_4 = \frac{\omega_4 \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,11 \cdot 0,2 \cdot 800}{20 \cdot 10^{-3}} = 884 > 2320 .$$

14. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda_4 = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{884} = 0,072.$$

15. Потери давления на четвертом участке

$$\Delta P_3 = 0,072 \cdot \frac{2800}{0,2} \cdot \frac{1,11^2}{2} \cdot 800 = 4879 \text{ Па}.$$

Общий перепад давления получают при сложении перепадов на отдельных участках

$$\Delta P = \sum P_i = 0,875 + 0,037 + 0,278 + 0,049 = 1,24 \text{ МПа}.$$

**Задание:**

Расстояния от начала коллектора и до точек отбора нефти, следующие  $l_1, l_2$ . Определить общий перепад давления  $\Delta P$ , если начальное давление равно  $P$ . Сборный коллектор проложен горизонтально и местных сопротивлений не имеет.

Таблица 5

## Исходные данные к заданию 1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина трубопровода, км	10	8	6	12	15	7	5	9	4	3
Длина первого участка, м	3500	2000	3000	6000	5000	1500	2000	3000	1000	1000
Длина второго участка, м	1000	2000	500	2000	3000	2500	1000	3000	1000	1000
Диаметр трубопровода, мм	205	219	312	426	426	312	217	219	247	219
Массовый расход нефти, т/ч	180	200	250	270	260	240	210	230	190	235
Отбор на 1 участке, т/ч	30	50	40	45	50	40	20	45	25	35
Отбор на 2 участке, т/ч	40	20	40	30	20	30	30	45	35	50
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	870	842	856	880	864	870	832	815	823	854
Динамическая вязкость нефти, Па·с	0,050	0,0149	0,023	0,002	0,04	0,025	0,032	0,027	0,019	0,012
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,15	0,10	0,12	0,15	0,10	0,12	0,15	0,10	0,12	0,01
<i>Ответы, МПа</i>	<i>1,503</i>	<i>0,784</i>	<i>0,216</i>	<i>0,062</i>	<i>0,143</i>	<i>0,215</i>	<i>0,876</i>	<i>1,486</i>	<i>0,243</i>	<i>0,421</i>

Продолжение таблицы 5

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Длина трубопровода, км	9	5	11	14	6	9	4	10	4	7
Длина первого участка, м	4200	1000	2500	6300	3000	1500	2000	5000	1500	3000
Длина второго участка, м	1000	3200	3500	2600	1000	4500	500	2800	1000	1300
Диаметр трубопровода, мм	200	319	242	405	426	290	215	236	247	370
Массовый расход нефти, т/ч	180	160	230	370	210	340	110	230	220	235
Отбор на 1 участке, т/ч	40	35	50	45	30	20	40	35	45	25
Отбор на 2 участке, т/ч	30	15	20	40	15	10	30	45	25	30
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	856	870	848	864	820	840	850	815	833	869
Динамическая вязкость нефти, Па·с	0,060	0,015	0,031	0,012	0,004	0,042	0,052	0,031	0,019	0,011
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,12	0,10	0,15	0,10	0,11	0,01	0,15	0,14	0,16	0,03
<i>Ответы, МПа</i>	<i>1,770</i>	<i>0,059</i>	<i>1,084</i>	<i>0,261</i>	<i>0,027</i>	<i>1,080</i>	<i>0,191</i>	<i>1,392</i>	<i>0,330</i>	<i>0,086</i>



Окончание таблицы 5

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Длина трубопровода, км	11	14	3	9	4	12	6	8	13	5
Длина первого участка, м	5500	4000	1000	3600	1500	3500	2200	3000	4800	1400
Длина второго участка, м	2000	4000	1500	5000	1000	3500	2800	2000	5400	1500
Диаметр трубопровода, мм	295	215	286	366	210	236	257	409	284	332
Массовый расход нефти, т/ч	210	150	250	240	180	255	160	330	246	235
Отбор на 1 участке, т/ч	20	55	35	40	50	30	25	45	45	40
Отбор на 2 участке, т/ч	10	30	20	35	15	25	40	45	20	30
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	876	840	864	873	855	869	878	840	842	836
Динамическая вязкость нефти, Па·с	0,06	0,0137	0,025	1,02	0,014	0,033	0,42	0,06	0,033	0,078
Давление начальное, МПа	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,4	3,6	3,8	4,0
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,12	0,15	0,1	0,2	0,13	0,11	0,15	0,10	0,014	0,14
<i>Ответы, МПа</i>	<i>0,546</i>	<i>0,733</i>	<i>0,176</i>	<i>1,423</i>	<i>0,427</i>	<i>1,870</i>	<i>1,024</i>	<i>0,169</i>	<i>0,803</i>	<i>0,137</i>

## Типовая задача 2

### Пример:

На нефтепроводе диаметром 500 мм, перекачивающем 70,0 т/ч нефти с плотностью 820 кг/м<sup>3</sup> и вязкостью 0,4 см<sup>2</sup>/с, имеется сдвоенный участок из труб с внутренним диаметром 300 мм и 500 мм одинаковой длины. Определить расходы и гидравлический уклон на сдвоенном участке.

### Решения:

1. Вычисляем объемный расход нефти:

$$Q = \frac{G \cdot 10^3}{\rho \cdot 3600} = \frac{70 \cdot 10^3}{820 \cdot 3600} = 0,0237, \quad \text{м}^3/\text{с}.$$

2. Рассчитываем скорость движения в трубопроводе:

$$\omega = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2 \cdot (10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 0,0237}{3,14 \cdot 0,5^2} = 0,1208, \quad \text{м/с}.$$

3. Рейнольдс:

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \frac{\omega \cdot d \cdot 10^{-3}}{\nu} = \frac{0,1208 \cdot 0,5}{0,4 \cdot 10^{-4}} = 1510,3654.$$

4. Определение режима движения и зоны сопротивления. Каждому режиму движения соответствуют коэффициенты формулы Лейбензона. (таблица 6.1.)

5. Рассчитываем гидравлический уклон трубопровода:

$$i = \beta \cdot \frac{Q^{2-m} \cdot \nu^m}{d^{5-m}} = \beta \cdot \frac{Q^{2-m} \cdot \nu^m}{d^{5-m} \cdot (10^{-3})^{5-m}} = 4,1596 \cdot \frac{0,0237 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4}}{0,5^4} = 0,631 \cdot 10^{-4}.$$

6. Скорость движения во вставке:

Расход через вставку равен расходу в трубопроводе, поэтому:

$$\omega_B = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2 \cdot (10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 0,0237}{3,14 \cdot 0,55^2} = 0,09986, \quad \text{м/с}.$$

7. Рейнольдс:

$$\text{Re}_B = \frac{\omega_B \cdot d_B \cdot 10^{-3}}{\nu} = \frac{0,09986 \cdot 0,55}{0,4 \cdot 10^{-4}} = 1373,0595.$$

8. Определение режима движения и выбор зоны сопротивления во вставке.

9. Расход через лупинг

$$Q_L = \frac{Q}{1 + \left(\frac{d}{d_L}\right)^{\frac{5-m}{2-m}}} = \frac{0,0237}{1 + \left(\frac{500}{500}\right)^4} = 0,01186, \quad \text{м}^3/\text{с}.$$

10. Скорость в лупинге:

$$\omega_{\text{Л}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{Л}}}{\pi \cdot d_{\text{Л}}^2 \cdot (10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 0,01186}{3,14 \cdot 0,5^2} = 0,0604, \text{ м/с}.$$

11. Рейнольдс:

$$\text{Re}_{\text{Л}} = \frac{\omega_{\text{Л}} \cdot d_{\text{Л}} \cdot 10^{-3}}{\nu} = \frac{0,0604 \cdot 0,5}{0,4 \cdot 10^{-4}} = 755,1827.$$

12. Определение режима движения и выбор зоны сопротивления для лупинга.

13. Если режимы движения и зоны сопротивления в трубопроводе, вставке и лупинге одинаковы, тогда: определяем гидравлические уклоны вставки и лупинга. (Если нет- решение прекращаем, требуется изменить диаметры лупинга или вставки)

14. Гидравлический уклон вставки:

$$i_{\text{В}} = i \cdot \left( \frac{d}{d_{\text{В}}} \right)^{5-m} = 0,631 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{500}{550} \right)^4 = 0,431 \cdot 10^{-4}.$$

15. Гидравлический уклон лупинга:

$$i_{\text{Л}} = \frac{i}{\left[ 1 + \left( \frac{d_{\text{Л}}}{d} \right)^{\frac{5-m}{2-m}} \right]^{2-m}} = \frac{0,631 \cdot 10^{-4}}{1 + \left( \frac{500}{500} \right)^4} = 0,316 \cdot 10^{-4}.$$

16. Сравниваем величину снижения потерь напора при вставке и при лупинге:

$$n_{\text{В}} = \frac{i}{i_{\text{В}}} = \frac{0,631 \cdot 10^{-4}}{0,431 \cdot 10^{-4}} = 1,4641 \text{ И } n_{\text{Л}} = \frac{i}{i_{\text{Л}}} = \frac{0,631 \cdot 10^{-4}}{0,316 \cdot 10^{-4}} = 2.$$

Если  $n_{\text{В}} > n_{\text{Л}}$  при вставке, если  $n_{\text{В}} < n_{\text{Л}}$  при лупинге.

В нашем случае  $n_{\text{В}} < n_{\text{Л}}$  при лупинге.

#### **Задание:**

Определить расходы и гидравлический уклон на сдвоенном участке нефтепровода с известным диаметром  $d$ , расходом  $Q/G$ , плотностью  $\rho$  и вязкостью  $\nu$ . На нефтепроводе имеется сдвоенный участок из труб с внутренним диаметром  $d_{\text{В}}$  и  $d_{\text{Л}}$  одинаковой длины.

Таблица 6

## Исходные данные к заданию 2

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объект	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	вода	вода
Расход	30 дм <sup>3</sup> /с	8 дм <sup>3</sup> /с	8 дм <sup>3</sup> /с	300 м <sup>3</sup> /ч	182 т/ч	300 м <sup>3</sup> /ч	182 т/ч	900 т/сут	8 дм <sup>3</sup> /с	8 дм <sup>3</sup> /с
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	819	860	860	910	895	910	895	860	991	991
Кинематич. вязкость, 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с	0,0182	0,5	0,5	0,5	0,42	0,5	0,42	0,15	0,00666	0,00666
Диаметр трубы, мм	150	100	100	257	156	257	156	205	80	80
Диаметр вставки, мм	200	150	150	309	203	308	203	309	100	100
Диаметр лупинга, мм	100	100	150	257	156	257	203	205	50	80
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5
Ответы:	Вст.	Вст.	Луп.	Вст.	Вст.	Вст.	Луп.	Вст.	Вст.	Вст.

Продолжение таблицы 6

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Объект	вода	вода	вода	вода	вода	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть
Расход	5 дм <sup>3</sup> /с	18 дм <sup>3</sup> /с	18 дм <sup>3</sup> /с	20 дм <sup>3</sup> /с	20 дм <sup>3</sup> /с	180 т /ч	180 т /ч	180 т /ч	80 т /ч	80 т /ч
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	1000	996	996	870	870	870	849	849
Кинематич. вязкость, ·10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с	0,0131	0,0131	0,0131	0,008	0,008	0,575	0,575	0,575	0,1376	0,1376
Диаметр трубы, мм	100	100	100	100	100	205	211	209	205	205
Диаметр вставки, мм	156	156	130	130	125	257	257	257	257	211
Диаметр лупинга, мм	156	100	156	130	130	205	257	209	257	211
Абсолютная эквивалент- ная шероховатость, мм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Ответы:</i>	<i>Луп.</i>	<i>Вст.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>

Окончание таблицы 6

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Объект	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть	нефть
Расход	90 т /ч	90 т /ч	85 т /ч	80 т /ч	185 т /ч	185 т /ч	185 т /ч	208 т /ч	208 т /ч	208 т /ч
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	921	921	870	870	869	869	869	892	892	892
Кинематич. вязкость, ·10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с	1,633	1,633	0,59	0,59	0,403	0,403	0,403	0,397	0,397	0,397
Диаметр трубы, мм	211	211	257	257	267	267	267	309	309	309
Диаметр вставки, мм	257	257	309	309	309	359	315	359	359	359
Диаметр лупинга, мм	257	211	309	257	309	359	315	359	315	309
Абсолютная эквивалент- ная шероховатость, мм	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Ответы:</i>	<i>Луп.</i>	<i>Вст.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Вст.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>	<i>Луп.</i>

### 3. Расчет трубопроводов при неизотермическом движении однофазной жидкости

#### 3.1. Основы гидравлического расчета

Говоря об изотермическом движении однофазных жидкостей по трубопроводам, мы полагали, что температура, а следовательно, плотность и вязкость жидкости, остается неизменной на всем протяжении потока и в любой точке его поперечного сечения. Однако, реальные потоки жидкости или подогревают в различных печах или теплообменниках или их естественная теплота рассеивается в окружающей среде.

При движении продукции скважины от забоя к устью и далее до установок подготовки нефти происходит постепенное понижение температуры и разгазирование флюидов (нефти и воды), транспортируемых по одному трубопроводу. С понижением температуры и разгазированием флюидов увеличивается вязкость нефти (эмульсии), понижается  $Re$  и, в конечном итоге, увеличивается гидравлическое сопротивление:

$$t \downarrow \rightarrow \nu \uparrow \rightarrow Re \downarrow \rightarrow \lambda \uparrow.$$

Падение температуры и глубокое разгазирование особенно нежелательны для высоковязких и парафинистых нефтей.

Также по этой причине транспортирование нефтей на месторождениях Севера должно осуществляться в газонасыщенном состоянии, чтобы снизить их вязкость, а следовательно, и потери от гидравлических сопротивлений.

Последняя ступень сепарации в данном случае должна устанавливаться на центральном пункте сбора нефти или на НПЗ.

Знание законов распределения температуры флюидов по длине нефтепровода необходимо как для проектировщиков нефтесборной системы, так и для эксплуатационников: для правильной расстановки подогревателей и настройки режима их работы.

Для установления закона изменения температуры жидкости по длине трубопровода выделим на расстоянии  $X$  от начала трубопровода элементарный участок длиной  $dX$  и составим для него уравнение теплового баланса.

Потери теплоты от элементарного участка  $dX$  в единицу времени в окружающую среду составят:

$$dq = k(t - t_0) \cdot \pi \cdot d \cdot dX, \quad (56)$$

где  $\pi \cdot d \cdot dX$  – поверхность охлаждения элементарного участка, м;  
 $k$  – коэффициент теплопередачи от нефти в окружающую среду.

При движении жидкости через рассматриваемый участок  $dX$  она охладится на  $dt$  °С и потеряет количество теплоты, равное:

$$d_q = -G \cdot C_p \cdot dt. \quad (57)$$

- так как температура жидкости по мере удаления от начала трубопровода падает.

При установившемся режиме потери теплоты жидкостью должны быть равны теплоте, отдаваемой ею в окружающую среду:

$$k(t - t_0) \cdot \pi \cdot d \cdot dX = -G \cdot C_p \cdot dt, \quad (58)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи от нефти в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup> К);

$t$  – температура жидкости на расстоянии  $X$  от начала трубопровода;

$t_0$  – температура окружающей среды;

$d$  – внутренний диаметр трубопровода;

$G$  – массовый расход нефти, кг/с;

$C_p$  – удельная массовая теплоемкость нефти, кДж/(кг град).

При этом  $t_H > t > t_0$ .

При стационарном режиме изменением  $k$  по длине трубопровода можно пренебречь.

Формулу Шухова используют для расчета температуры в любой точке неизотермического трубопровода:

$$t = t_0 + (t_H - t_0) \cdot e^{\frac{-k \cdot \pi \cdot d \cdot x}{G \cdot C_p}}. \quad (59)$$

Это и есть закон распределения температуры жидкости по длине трубопровода.

Температура в конечной точке трубопровода при  $x=l$

$$t_K = t_0 + (t_H - t_0) \cdot e^{-Шу}, \quad (60)$$

где  $Шу$  – параметр Шухова:

$$Шу = \frac{k \cdot \pi \cdot d \cdot l}{G \cdot C_p}. \quad (61)$$

В неизотермическом трубопроводе в общем случае могут наблюдаться два режима течения: на начальном участке при сравнительно высокой температуре жидкости – турбулентный режим, а в конце – ламинарный. Температура, соответствующая переходу турбулентного режима в ламинарный, называется *критической*:

$$t_{KP} = t_x + \frac{1}{u} \cdot \ln \frac{v_x \cdot \pi \cdot d \cdot Re_{KP}}{4 \cdot Q}, \quad (62)$$

где  $t$  – температура нефти, при которой требуется узнать вязкость, °С;



$t_x$  - произвольная температура, выбранная в рабочем интервале температур;

$\nu_x$  - кинематическая вязкость нефти при температуре  $t_x$ .

Если мы не располагаем экспериментальной кривой температурной зависимости вязкости, то для аналитического определения показателя крутизны вискограммы и необходимо знать вязкость нефти  $\nu_1$  и  $\nu_2$  при двух температурах  $t_1$  и  $t_2$ :

$$u = \frac{\ln \frac{\nu_1}{\nu_2}}{t_2 - t_1}. \quad (63)$$

Для ориентировочного определения вязкости нефтей в зависимости от их температуры и плотности можно пользоваться графическими зависимостями.

Очевидно, что при  $t_{KP} \geq t_H$  в трубопроводе только ламинарный режим, а при  $t_{KP} \leq t_K$  - режим только турбулентный. При  $t_H > t_{KP} > t_K$  в трубопроводе имеют место оба режима.

Длина турбулентного участка  $l_T$  определится из формулы Шухова:

$$l_T = \frac{G \cdot C_P}{\pi \cdot d \cdot k_T} \cdot \ln \frac{t_H - t_0}{t_{KP} - t_0}. \quad (64)$$

По этой же формуле определится длина ламинарного участка, заменяя  $t_H$  на  $t_{KP}$  - в числителе и  $t_{KP}$  на  $t_K$  - в знаменателе, а также  $K_T$  на  $K_L$ .

Если в трубопроводе два режима, то температура потока в конце трубопровода:

$$t_K = t_0 + (t_H - t_0) \cdot e^{-\frac{\pi \cdot d \cdot l}{G \cdot C_P}} \cdot \left( \frac{t_{KP} - t_0}{t_H - t_0} \right)^{1 - \frac{\pi \cdot d \cdot l}{G \cdot C_P}}. \quad (65)$$

Коэффициент теплопередачи в зависимости от внутреннего  $\alpha_1$  и внешнего  $\alpha_2$  коэффициентов теплоотдачи, а также от термического сопротивления стенки трубы, изоляции, отложения парафина и определяется из формулы:

$$\frac{1}{k \cdot d} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \sum_i \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{ni}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_n}. \quad (66)$$

где  $\lambda_i$ ,  $d_{ni}$ ,  $d_i$  - соответственно коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град), наружный и внутренний диаметры трубы, изоляции, м;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·град).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  определяют из формулы Михеева: для  $Re \leq 2000$

$$Nu = 0,17 \cdot Re_n^{0,33} \cdot Pr_n^{0,43} \cdot Gr_n^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (67)$$

для  $Re \leq 10000$

$$Nu = 0,021 \cdot Re_n^{0,8} \cdot Pr_n^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (68)$$

где  $Nu, Re, Pr, Gr$  - соответственно критерии Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа;

$Gr_{cm}$  - критерий Грасгофа, определяемый при температуре стенки.

Все остальные параметры рассчитывают при средней температуре потока.

*Критерии Нуссельта:*

$$Nu = \frac{\alpha_1 \cdot d}{\lambda}, \quad (69)$$

характеризует интенсивность перехода теплоты на границе поток - стенка.

*Критерий Рейнольдса:*

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot v}, \quad (70)$$

характеризует отношение сил инерции и трения в потоке.

*Критерий Прандтля:*

$$Pr = \frac{v \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda}, \quad (71)$$

характеризует отношение вязкостных и температуропроводных свойств теплоносителя.

*Критерий Грасгофа:*

$$Gr = \frac{d^3 \cdot g \cdot \beta \cdot (t_n - t_{cm})}{\nu^2}, \quad (72)$$

характеризует соотношение сил трения, инерции и подъемной силы, обусловленной различием плотностей в отдельных точках неизотермического потока,

где  $\beta$  - коэффициент объемного расширения нефти,  $1/^\circ C$ ;

$g$  - ускорение свободного падения,  $m/s^2$ ;

$t_n$  и  $t_{cm}$  - соответственно температура потока и внутренней поверхности стенки трубы,  $^\circ C$ ;

$c_p$  - массовая теплоемкость жидкости,  $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$ .

Индекс “п” показывает, что все параметры вычисляются при средней температуре потока  $t_n = \frac{1}{2} \cdot (t_n + t_k)$ , а индекс “ст” - при средней температуре стенки трубопровода.

В интервале температур, в котором работают промышленные трубопроводы, массовая теплоемкость  $C_p$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и плотность нефти  $\rho$  изменяются в узких пределах  $C_p = 1,6 - 2,5$  кДж/(кг·°С),  $\lambda = 0,1 - 0,16$  Вт/(м·°С).

Поэтому для ориентировочных расчетов и их можно считать постоянными.

Для более точных расчетов массовую теплоемкость нефтей (Дж/(кг·грС)) определяют по (6.128) а коэффициент теплопроводности нефтей  $\lambda$  (Вт/(м·грС)) по формуле Крэгга-Смита:

$$\lambda = \frac{0,101}{\rho_{15}} \cdot (1 - 0,00054 \cdot t), \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{С}}, \quad (73)$$

$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\rho_{15}}} \cdot (0,403 + 0,810 \cdot 10^{-3} \cdot t), \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{С}}, \quad (74)$$

где  $\rho_{15}$  - плотность нефти при 15 °С, т/м<sup>3</sup>;  
 $t$  - температура нефти, °С.

Массовая теплоемкость углеродистых сталей и отложений парафина равна 0,5 и 2,9 кДж/(кг·°С). Для определения плотности нефти пользуются формулой Д.И. Менделеева:

$$\rho_{20} = \rho(T) / [1 + \beta(20 - T)], \quad \text{кг/м}^3, \quad (75)$$

где  $\rho_{20}$  - плотность нефти при 20 °С;  
 $\beta$  - коэффициент объемного расширения нефти, 1/°С (обычно  $\beta = 0,000066$  1/°С).

Для определения внешнего коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  подземного трубопровода пользуются теоретической формулой Форхгеймера-Власова:

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot \lambda_{gp}}{d_n \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot H_o}{d_n} + \sqrt{\left( \frac{2 \cdot H_o}{d_n} \right)^2 - 1} \right)}, \quad (76)$$

где  $H_o$  - глубина заложения трубопровода в грунт до его оси, м;  
 $\lambda_{gp}$  - коэффициент теплопроводности грунта.

При  $\frac{2 \cdot H_o}{d_n} > 2$  имеем:  $\alpha_2 = \frac{2 \cdot \lambda_{gp}}{d_n \cdot \ln \frac{4 \cdot H_o}{d_n}}$ .

Для подземных изолированных трубопроводов при турбулентном режиме  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Поэтому для приближенных расчетов величиной  $1/\alpha_1$  можно пренебречь т.е. в этом случае принимается  $t_n \approx t_{om}$ .

Для ориентировочных расчетов коэффициент теплоотдачи  $k$  можно принимать, Вт/(см<sup>2</sup>·°C), для сухого песка –  $116 \cdot 10^{-6}$  для влажной глины –  $145 \cdot 10^{-6}$ , для мокрого песка –  $348 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.2. Задания для самостоятельной работы

#### Типовая задача 1

##### Пример:

##### Алгоритм решения задачи :

1. Определяем коэффициент крутизны вискограммы.
2. Рассчитываем критическую температуру и устанавливаем режим движения нефти в трубопроводе.
3. Рассчитываем длину турбулентного участка (если установлено два режима движения нефти в трубопроводе).
4. Рассчитываем температуру нефти в конце трубопровода.
5. Рассчитываем температуру нефти по длине трубопровода – 6 точек.

Определить режимы движения нефти в трубопроводе длиной  $L=8$  км и внутреннем диаметром  $d=511$  мм при определенной его пропускной способности  $G=75,7$  кг/с, температуре нефти в начале  $t_H=50$  °C и необходимой температуре в конце трубы  $t_K=35$  °C. Температура окружающей среды  $t_0=-8$  °C. Тепловая изоляция отсутствует. Рассчитать температуру нефти по длине трубопровода (минимум 6 точек) и температуру нефти в конце трубопровода.

##### Решение:

1. Определим коэффициент крутизны вискограммы:

$$u = \frac{\ln \frac{v_1}{v_2}}{t_2 - t_1} = \frac{\ln \frac{0,339}{0,076}}{80 - 50} = 0,04981 / ^\circ C .$$

2. Рассчитываем приближенную критическую температуру не учитывая изменение плотности, как мало влияющий фактор:

$$t_{KP} = t_2 + \frac{1}{u} \cdot \ln \frac{v_2 \cdot \pi \cdot d \cdot \text{Re}_{KP}}{4 \cdot G} = 80 + \frac{1}{0,0498} \ln \frac{0,076 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 511 \cdot 10^{-3} \cdot 2320 \cdot 912}{4 \cdot 75,7} = 30,6 ^\circ C .$$

3. Рассчитываем длины участков:

Так как  $t_{KP} < t_i$ , то течение в начале турбулентное

а) турбулентный:

$$l_T = \frac{G \cdot C_p}{\pi \cdot d \cdot k_T} \cdot \ln \frac{t_H - t_0}{t_{KP} - t_0} = \frac{75,7 \cdot 1985}{12,99 \cdot 3,14 \cdot 0,511} \cdot \ln \left( \frac{50 - (-8)}{30,6 - (-8)} \right) = 2934 \text{ м.}$$

Так как  $l_T < L$ , то на участке имеем два вида течения

б) *ламинарный*:

$$l_{\text{л}} = L - l_T = 8000 - 2934 = 5066 \text{ м.}$$

4. Рассчитываем температуру нефти в конце трубопровода:  
Воспользуемся формулой Шухова для ламинарного участка:

$$t_{\text{кон}} = t_o + \left( (t_H - t_o) \cdot \exp\left(\frac{-k_{\text{л}} \cdot \pi \cdot d \cdot l_{\text{л}}}{G \cdot C_p}\right) \right) =$$

$$= -8 + \left( (30,6 - (-8)) \cdot \exp\left(\frac{-11,86 \cdot 3,14 \cdot 0,511 \cdot 5066}{75,7 \cdot 1985}\right) \right) = 12,3 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

5. Рассчитываем температуру нефти по длине трубопровода:  
При  $x < l_T$  используем формулу Шухова в виде:

$$t_x = t_0 + (t_H - t_0) \cdot \exp\left(\frac{-k_T \cdot \pi \cdot d \cdot x}{G \cdot C_p}\right).$$

При  $x > l_T$  используем формулу Шухова в виде:

$$t_x = t_0 + (t_{\text{сп}} - t_0) \cdot \exp\left(\frac{-k_{\text{л}} \cdot \pi \cdot d \cdot (x - l_T)}{G \cdot C_p}\right).$$

Распределение температуры нефти по длине трубопровода представлено на рис. 6.5.

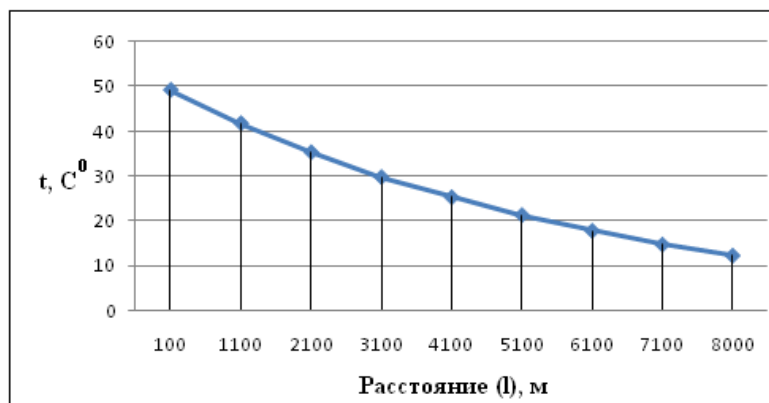


Рис. 5. Температура нефти по длине трубопровода

Ответ: В трубопроводе 2 режима течения,

$l_{\text{тр}} = 2,934 \text{ км}$ ;  $l_{\text{л}} = 5,066 \text{ км}$ ;  $t_{\text{кон}} = 12,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; требуется изоляция.

**Задание:**

Определить режимы движения нефти в трубопроводе длиной  $L$  и внутреннем диаметром  $d$  при определенной его пропускной способности  $Q$ , температуре нефти в начале  $t_H$  и необходимой температуре в конце трубы  $t_K$ . Температура окружающей среды  $t_O$  известна. Тепловая изоляция отсутствует. Рассчитать температуру нефти по длине трубопровода (минимум 6 точек) и температуру нефти в конце трубопровода.

Таблица 7

Исходные данные к заданию

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>L</b> , км	6,4	20	5	8	28	5	14,3	10	8	30
<b>d</b> , мм	201	259	201	209	400	209	359	511	408	359
<b>G</b> , кг/с	29,79	64,17	42,55	34,04	142,5	43,5	132,1	75,7	69,6	132,1
$\rho_{293}$ , кг/м <sup>3</sup>	851	930	851	851	950	870	950	912	870	950
<b>t<sub>H</sub></b> , °C	70	70	42	74	65	72	69	80	70	64
<b>t<sub>K</sub></b> , °C	25	35	33	20	35	30	33	45	40	46
<b>t<sub>o</sub></b> , °C	0	2	0	3	0	0	0	-8	-10	0
<b>C<sub>p</sub></b> , Дж/(кг*К)	2000	1884	1959	2000	2094	2005	2094	1985	2005	2094
<b>t<sub>1</sub></b> , °C	30	10	30	30	40	30	30	50	30	40
<b>t<sub>2</sub></b> , °C	40	60	40	40	60	50	70	80	70	60
<b>v<sub>1</sub></b> *10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,65	3,1	0,65	0,65	1,32	0,312	2,8	0,339	0,312	0,84
<b>v<sub>2</sub></b> *10 <sup>-4</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,17	0,58	0,17	0,17	0,324	0,066	0,21	0,076	0,066	0,15
<b>k<sub>T</sub></b> , Вт/(м <sup>2</sup> *К)	14,91	5,4	14,72	14,91	14,57	15,18	13,76	12,99	15,18	14,28
<b>k<sub>L</sub></b> , Вт/(м <sup>2</sup> *К)	12,97	5,35	12,78	12,97	12,49	13,07	12,38	11,86	13,76	12,49
<i>Ответ: (T, T и Л, Л) t<sub>K</sub>, °C</i>	<i>T и Л 25,68</i>	<i>T 34,86</i>	<i>T и Л 24,1</i>	<i>T и Л 25,6</i>	<i>T и Л 13,58</i>	<i>T 40,67</i>	<i>T и Л 31,26</i>	<i>T и Л 15,08</i>	<i>T 16,24</i>	<i>T и Л 12,60</i>

Продолжение таблицы 7

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>L</b> , км	8	17	7	9	11	5	8	5	4	25
<b>d</b> , мм	302	247	302	210	402	211	359	311	406	302
<b>G</b> , кг/с	32,25	49,78	56,55	34,04	125,5	36,7	111,1	67,9	58,9	99,1
$\rho_{293}$ , кг/м <sup>3</sup>	861	910	876	845	934	845	912	934	863	878
<b>t<sub>н</sub></b> , °С	65	67	42	53	58	53	62	53	51	50
<b>t<sub>к</sub></b> , °С	22	37	33	24	36	30	31	32	34	35
<b>t<sub>о</sub></b> , °С	-4	2	-3	3	1	-9	2	-8	-10	3
<b>C<sub>p</sub></b> , Дж/(кг*К)	1900	1899	1977	2077	2044	2075	2011	1921	2012	2034
<b>t<sub>1</sub></b> , °С	30	10	30	30	40	30	30	50	30	40
<b>t<sub>2</sub></b> , °С	40	60	40	40	60	70	70	80	70	60
$\nu_1 \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /с	0,67	2,1	0,72	0,65	1,22	0,312	2,8	0,339	0,312	0,84
$\nu_2 \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /с	0,18	0,48	0,23	0,17	0,314	0,066	0,21	0,076	0,066	0,15
<b>k<sub>T</sub></b> , Вт/(м <sup>2</sup> *К)	14,87	5,36	14,52	14,11	14,27	15,23	13,76	12,99	15,18	14,28
<b>k<sub>L</sub></b> , Вт/(м <sup>2</sup> *К)	12,97	5,35	12,78	12,27	12,29	13,17	12,38	11,86	13,76	12,49
<i>Ответ: (T, T и Л, Л) t<sub>к</sub>, °С</i>	<i>T и Л 8,64</i>	<i>T 32,78</i>	<i>T и Л 16,97</i>	<i>T и Л 19,17</i>	<i>T и Л 28,16</i>	<i>T 22,96</i>	<i>T 36,42</i>	<i>T 29,5</i>	<i>T 21,74</i>	<i>T и Л 13,07</i>

Окончание таблицы 7

<i>Исходные данные</i>	<i>Варианты</i>									
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
<b>L</b> , км	4	5	5	8	3	4	9	8	6	7
<b>d</b> , мм	511	259	706	206	404	209	359	511	408	209
<b>G</b> , кг/с	49,79	64,17	42,55	34,04	141	73,5	132,1	75,7	169,6	52,1
$\rho_{293}$ , кг/м <sup>3</sup>	851	930	851	862	933	900	950	912	870	950
<b>t<sub>н</sub></b> , °С	45	70	42	55	45	51	62	50	70	61
<b>t<sub>к</sub></b> , °С	25	35	33	20	25	30	30	35	40	36
<b>t<sub>о</sub></b> , °С	0	12	0	6	7	6	0	-8	-10	1
<b>C<sub>p</sub></b> , Дж/(кг*К)	2000	1884	1959	2000	2100	2010	1994	1985	2005	2094
<b>t<sub>1</sub></b> , °С	30	20	30	30	40	30	30	50	30	40
<b>t<sub>2</sub></b> , °С	40	60	40	40	60	45	70	80	50	60
$\nu_1 \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /с	0,86	2,4	0,35	0,65	1,32	0,312	1,0	0,339	0,312	0,84
$\nu_2 \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /с	0,2	0,48	0,03	0,17	0,324	0,066	0,21	0,076	0,066	0,15
<b>k<sub>T</sub></b> , Вт/(м <sup>2</sup> *К)	14,91	7,4	14,72	13,41	14,57	15,18	13,76	12,99	14,18	14,28
<b>k<sub>L</sub></b> , Вт/(м <sup>2</sup> *К)	12,97	6,35	12,78	12,97	12,49	13,07	12,38	11,86	12,76	12,49
<i>Ответ: (T, T и Л, Л)</i> <b>t<sub>к</sub></b> , °С	<i>T и Л</i> 18,67	<i>T</i> 57,22	<i>T и Л</i> 7,33	<i>T и Л</i> 23,76	<i>T</i> 38,51	<i>T</i> 40,36	<i>T</i> 36,49	<i>T и Л</i> 12,32	<i>T</i> 48,06	<i>T</i> 33,87



Учебное издание

ЧУХАРЕВА Наталья Вячеславовна

***РАСЧЕТ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ПРОМЫСЛОВЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ***