

ПРАКТИКУМ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ НЕФТИ И ГАЗА»

для слушателей специальности
1-51 02 71 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений



Гомель, 2021

Содержание

Практическая работа 1. Свойства нефти, влияющие на технологию ее транспорта	3
Практическая работа 2. Тепловой расчет трубопровода	9
Практическая работа 3. Самотечные участки в трубопроводе	15
Практическая работа 4. Расчет гидравлического удара на участке трубопровода	20
Практическая работа 5. Расчет смеси нефтепродуктов	24
Список использованных источников	33

Практическая работа 1. Свойства нефти, влияющие на технологию ее транспорта

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

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

При изменении давления и температуры плотность нефти или нефтепродукта также изменяется, поэтому ρ – это функция от давления p и температуры T , так что $\rho = f(p, T)$.

С увеличением температуры плотность уменьшается по закону прямой (рисунок 1.1).

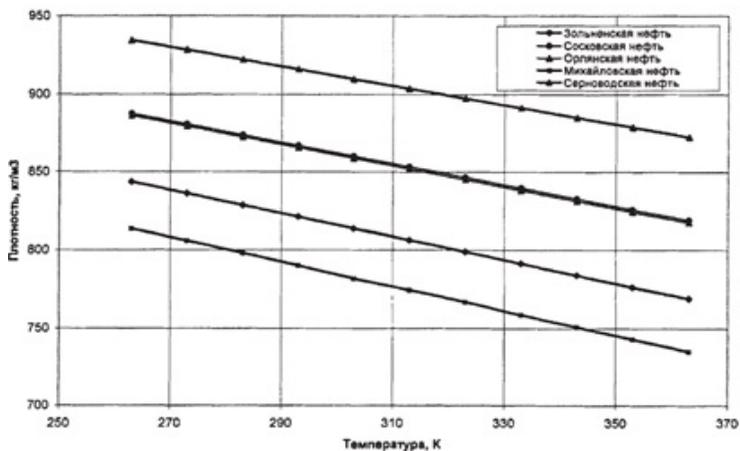


Рисунок 1 – Зависимость плотности нефти от температуры

Для определения плотности в лабораторных условиях, как правило, пользуются ареометром.

Для расчета плотности в зависимости от температуры используется формула:

$$\rho(T) = \rho_{20} [1 + \zeta(20 - T)], \quad (1.1)$$

где ζ – коэффициент объемного расширения, $1/^\circ\text{C}$; T – температура, $^\circ\text{C}$; 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 значение коэффициента ζ , представлено в таблице 1.1. Из формулы (1.1) 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 1.1 – Коэффициент теплового расширения, ζ

Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент ζ , 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

Вязкость – один из важнейших параметров нефти. От нее зависит вытехнологии перекачки, энергзатраты на транспортировку нефти и др. Вязкость (абсолютная, динамическая) характеризует силу трения (внутреннего сопротивления), возникающую между двумя смежными слоями внутри жидкости или газа на единицу поверхности при их взаимном перемещении (рисунок 1.2).

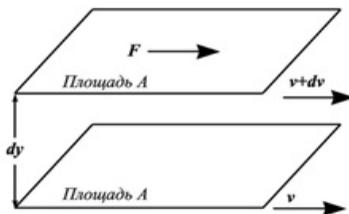


Рисунок 1.2 – Движение двух слоев жидкости относительно друг друга

Динамическая вязкость определяется по уравнению Ньютона:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.2)$$

где A – площадь перемещающихся слоев жидкости или газа; F – сила, требующаяся для поддержания разницы скоростей движения между слоями на величину dv ; dy – расстояние между движущимися слоями жидкости (газа); dv – разность скоростей движущихся слоев жидкости (газа); μ – коэффициент пропорциональности, абсолютная, динамическая вязкость.

Размерность динамической вязкости определяется из уравнения Ньютона:

- система СИ – (Па_{хс}, мПа_{хс}), паскаль /сек;
- система СГС – (пуаз (пз), сантипуаз (спз)) = (г/(смсек)).

С вязкостью связан параметр – текучесть (φ) – величина обратная вязкости:

$$\varphi = 1/\mu \quad (1.3)$$

Кроме динамической вязкости для расчетов используют также параметр кинематическая вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой с учетом силы тяжести.

$$\nu = \mu/\rho \quad (1.4)$$

Единицы измерения кинематической вязкости:

- система СИ – (м²/сек, мм²/сек);
- система СГС – (стоке (ст), сантистокс (сст)); сст = 1×10^{-4} м²/сек.

Для ньютоновских жидкостей величина кинематической вязкости может быть определена непосредственно, например, с использованием капиллярного вискозиметра Пинкевича.

Вязкость сепарированной нефти с возрастанием температуры уменьшается, а с возрастанием давления увеличивается.

Вязкость нефти уменьшается с повышением количества углеводородного газа, растворенного в ней, и тем больше, чем выше молекулярная масса газа.

При увеличении молекулярной массы углеводородного компонента от СН₄ к С₄Н₁₀ растворенного в нефти вязкость нефтей будет уменьшаться, за счет увеличения доли неполярных соединений (газ идеальная система).

Однако не все компоненты газа подчиняются такой закономерности.

С увеличением количества азота, растворенного в нефти вязкость нефти в пластовых условиях будет возрастать.

С увеличением молекулярной массы жидкого углеводородного компонента от C_5H_{12} и выше, растворенного в нефти, ее вязкость будет возрастать за счет увеличения доли полярных компонентов (нефть неидеальная система).

Вязкость смесей аренов больше вязкости смесей алканов. Поэтому, нефть с высоким содержанием ароматических углеводородов более вязкая, чем нефть парафинового основания

Чем больше в нефти содержится смол и асфальтенов (больше полярных компонентов), тем выше вязкость.

Вязкость сырой нефти больше вязкости сепарированной, вследствие большого количества растворенного газа, содержащегося в ней, пластовых температур.

Повышение температуры вызывает уменьшение вязкости нефти.

Понижение давления, ниже давления насыщения приводит к увеличению газового фактора и, как следствие, к уменьшению вязкости.

Повышение давления выше давления насыщения для пластовой нефти приводит к увеличению величины вязкости.

Задание 1: Вычислить плотность нефти по приведенным в таблице 1.2 данным.

Рекомендации к решению задания 1

1. Определить коэффициент теплового расширения нефти (ζ) для своего условия задачи по таблице 1.1.

2. По формуле (1.1) вычислить плотность нефти при заданной температуре.

Задание 2: Вычислить плотность нефтепродуктов при определенных температурных условиях, приведенных в таблице 1.3.

Дано: Плотность зимнего дизельного топлива при исходной температуре. Определить его плотность при изменении температуры. Допущение: примем коэффициент теплового расширения (ζ) дизельного топлива, таким же, как и для нефти с соответствующей плотностью (см. табл. 1.1)

Рекомендации к решению задания 2

1. Определить коэффициент теплового расширения нефти (ζ) для своего условия задачи по таблице 1.1.

2. По формуле (1.1) вычислить плотность нефти при заданных температурах.

Таблица 1.2 – Варианты к заданию 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность нефти при температуре 20°C, ρ_{20} , кг/м ³	845	865	870	760	820	720	840	730	860	740
Определить плотность нефти при температуре, T , °C	5	4,8	5,2	7,1	6,4	7,5	8,1	9,4	5,3	6,7
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Плотность нефти при температуре 20°C, ρ_{20} , кг/м ³	870	760	830	765	910	780	880	760	860	840
Определить плотность нефти при температуре, T , °C	5,6	7,4	7,8	9,1	8,2	9,5	6,3	6,9	7,7	8,6

Таблица 1.3 – Исходные данные к заданию 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность дизельного топлива, ρ , кг/м ³	839	835	830	835	820	820	839	832	828	825
Исходная температура, T , °C	12	10,6	11	11,5	11	10	12	12	11,5	10,5
Определить плотность нефти при температуре, T , °C	18	17	16,5	12,7	17,4	17,5	18,1	19,4	15,3	16,0
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Плотность нефти при температуре 20°C, ρ_{20} , кг/м ³	837	825	830	825	832	820	820	835	839	830
Исходная температура, T , °C	10,5	11,6	10,7	11	11,8	10,7	12,2	11,5	10,8	11,2
Определить плотность нефти при температуре, T , °C	15,6	17,4	17,8	19,1	18,2	19,5	16,3	16,9	17,7	15,8

Контрольные вопросы.

1. Что называется плотностью нефти? В каких единицах она измеряется? При помощи чего в лабораторных условиях измеряют плотность нефти?
2. Как нефти подразделяются по плотности? От каких показателей и как зависит плотность нефтей?
3. Что называется ньютоновскими и неньютоновскими жидкостями?
4. Что называется динамической вязкостью, в каких единицах она измеряется? По какой формуле определяется динамическая вязкость?
5. Что называется кинематической вязкостью, в каких единицах она измеряется? По какой формуле определяется кинематическая вязкость?
6. Какие существуют способы определения динамической и кинематической вязкости?
7. Как изменяется вязкость нефти в зависимости от внешних факторов и условий?

Практическая работа 2. Тепловой расчет трубопровода

Для снижения гидравлических потерь при перекачке высоковязких нефтей и нефтепродуктов в ряде случаев используют подогрев. При движении по трубопроводу нефтепродукт будет остывать. Распределение температуры нефтепродукта по длине трубопровода позволит в дальнейшем более точно определить гидравлические потери.

Задание: нефть с параметрами ρ , C_v и Q перекачивается по трубопроводу диаметром d с гидравлическим уклоном i_0 .

Определить, как влияют значения начальной температуры нефти $\bar{T} = 20, 40$ и 60 °С и температуры среды T_{cp} на значение температуры нефти по длине L трубопровода. Найти распределение температуры нефти по длине трубопровода при его идеальной теплоизоляции. Построить графические зависимости температуры нефти по длине трубопровода для обоих случаев. Сравнить полученные результаты.

Варианты заданий приведены в таблице 2. Расчетная схема приведена на рисунке 2.1.

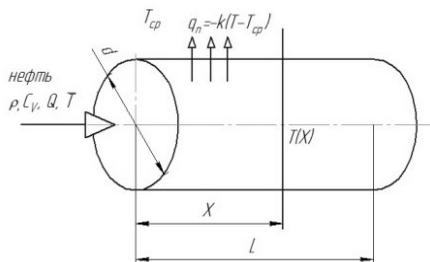


Рисунок 2.1 – Расчетная схема к решению задачи

Принятые допущения при решении задачи 2

1. Нефть в данном случае является несжимаемой средой.
2. Режим течения нефти (жидкости) в трубе стационарный.
3. Гидравлический уклон i_0 считается постоянной величиной, поскольку диссипация механической энергии при

Таблица 2.1 – Варианты заданий к практической работе 2

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
расход нефти $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,75	0,08	1,10	0,25	0,50	0,50	0,60	1,00	0,35	0,40
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{ м}$	0,80	0,90	0,50	0,20	0,25	0,60	0,30	0,40	0,70	0,80
длина трубопровода $L, \text{ км}$	120	50	100	40	70	110	30	15	90	80
гидравлический уклон трубопровода i_0	0,002	0,001	0,003	0,004	0,002	0,005	0,003	0,004	0,001	0,005
коэффициент теплопередачи $k, \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$	2	4	3	5	1	4	2	5	6	2
температура окружающей среды $T_{cp}, \text{ }^\circ\text{C}$	+8	+12	-3	-10	+20	+25	-5	+5	+30	-2
плотность нефти при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_{20}, \text{ кг}/\text{м}^3$	835	830	855	845	850	830	865	830	865	835
начальное значение температуры нефти $\bar{T}, \text{ }^\circ\text{C}$	20 40 60									
ускорение свободного падения $g, \text{ м}/\text{с}^2$	9,81									

Таблица 2.1 – Варианты заданий к практической работе 2

Исходные данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
расход нефти $Q, \text{м}^3/\text{с}$	0,7	0,28	0,9	0,55	0,65	0,35	0,4	0,85	0,6	0,45
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{м}$	0,70	0,75	0,65	0,25	0,20	0,75	0,45	0,30	0,55	0,65
длина трубопровода $L, \text{км}$	70	100	60	50	80	105	35	55	80	60
гидравлический уклон трубопровода i_0	0,003	0,002	0,004	0,001	0,005	0,002	0,005	0,001	0,001	0,003
коэффициент теплопередачи $k, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$	3	4	2	4	5	1	6	6	2	5
температура окружающей среды $T_{cp}, ^\circ\text{С}$	+8	+12	-3	-10	+20	+25	-5	+5	+30	-2
плотность нефти при $20 ^\circ\text{С}$ $\rho_{20}, \text{кг}/\text{м}^3$	835	830	855	845	850	830	865	830	865	835
начальное значение температуры нефти $\bar{T}, ^\circ\text{С}$	20 40 60									
ускорение свободного падения $g, \text{м}/\text{с}^2$	9,81									

стационарном режиме течения жидкости в трубе постоянного диаметра одинакова во всех сечениях трубопровода.

4. Плотность теплоемкость нефти определяются для начальной температуры и считаются постоянными на всей длине трубопровода.
5. Коэффициент теплопередачи k считается постоянным по всей длине трубопровода.

Рекомендации к решению задачи 2

Последовательно вычисляются параметры нефти:

1. Определяется коэффициент температурного расширения нефти и нефтепродуктов, $1/^\circ\text{C}$:

$$\zeta = \begin{cases} 0,001225 & \text{при } 700 \leq \rho_{20} < 719 \\ 0,001183 & \text{при } 720 \leq \rho_{20} < 739 \\ 0,001118 & \text{при } 740 \leq \rho_{20} < 759 \\ 0,001054 & \text{при } 760 \leq \rho_{20} < 779 \\ 0,000995 & \text{при } 780 \leq \rho_{20} < 799 \\ 0,000937 & \text{при } 800 \leq \rho_{20} < 819 \\ 0,000882 & \text{при } 820 \leq \rho_{20} < 839 \\ 0,000831 & \text{при } 840 \leq \rho_{20} < 859 \\ 0,000782 & \text{при } 860 \leq \rho_{20} < 879 \end{cases}$$

2. Зависимость изменения плотности от температуры:

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 + \zeta(20 - \bar{T})], \text{ кг/м}^3, \quad (2.1)$$

3. Определяется теплоёмкость нефти по приближённой зависимости:

$$C_V = \frac{30.877}{\sqrt{\rho}} \cdot (1.6873 + 0.0034 \cdot \bar{T}), \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}, \quad (2.2)$$

4. Уравнение притока тепла имеет вид:

$$\rho \cdot V \cdot \frac{dE_{\text{енумр}}}{dX} = \frac{4}{d} \cdot q_n - \rho g V \cdot i, \quad (2.3)$$

где $E_{внутр} = C_V \cdot T$ (при $C_V = const$) – внутренняя энергия;
 $q_n = -k \cdot (T - T_{cp})$ – тепловой поток; гидравлический уклон i
 может считаться постоянной величиной $i = -i_0$;

С учетом всех подстановок уравнение (2.3) примет вид:

$$\rho \cdot V \cdot C_V \frac{dT}{dX} = -\frac{4 \cdot k}{d} \cdot (T - T_{cp}) + \rho g V \cdot i_0$$

После интегрирования данного уравнения определяется константа интегрирования.

5. Константа интегрирования

$$T_{\ominus} = \frac{g i_0 \cdot \rho \cdot Q}{\pi d k}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (2.4)$$

6. Температура нефти в участке X трубопровода

$$T(X) = T_{cp} + T_{\ominus} + (\bar{T} - T_{cp} - T_{\ominus}) \cdot \exp\left(-\frac{\pi d k X}{C_V \cdot \rho \cdot Q}\right), \quad ^\circ\text{C}, \quad (2.5)$$

где $X = 0, 1 \dots L$ [км]; C_V [кДж/кг·°C].

7. Строится график распределения температуры нефти по длине трубопровода L при значениях начальной температуры нефти $\bar{T} = 20, 40$ и 60 °C (рисунок 2.2а).

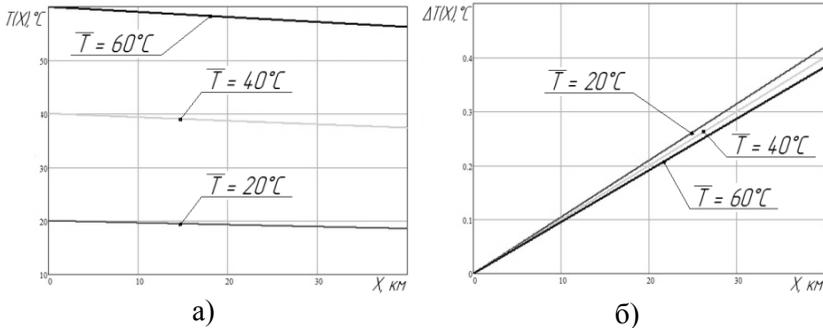
8. При идеальной теплоизоляции трубопровода $k = 0, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ уравнение (2.3) примет вид:

$$\rho \cdot V \cdot \frac{dE_{внутр}}{dX} = \rho g V \cdot i_0 \quad \text{или} \quad \rho \cdot V \cdot C_V \frac{dT}{dX} = \rho g V \cdot i_0, \quad (2.6)$$

Тогда изменение температуры нефти по длине идеально изолированного трубопровода:

$$\Delta T(X) = \frac{g i_0}{C_V} \cdot \int_{X=0}^{X=L} dX \quad \text{или} \quad \Delta T(X) = \frac{g i_0}{C_V} \cdot X, \quad ^\circ\text{C}, \quad (2.7)$$

9. Строится график распределения изменения температуры нефти ΔT по длине трубопровода L при значениях начальной температуры нефти $\bar{T} = 20, 40$ и 60 °С при его идеальной теплоизоляции (рисунок 2.2 б).



а) – с реальной теплоизоляцией; б) – с идеальной теплоизоляцией
 Рисунок 2.2 – Распределение температуры нефти T (а) и ее изменения ΔT (б) по длине трубопровода X в зависимости от ее начальной температуры \bar{T}

10. Полученные графические зависимости сравниваются и формулируется вывод по задаче.

Контрольные вопросы.

1. Зачем подогревают нефтепродукт при его перекачке?
2. От каких параметров зависит изменение температуры нефтепродукта по длине трубопровода?
3. Покажите, для вашего варианта заданий, как изменяется температура нефтепродукта по длине трубопровода? Происходит процесс нагрева или охлаждения нефтепродукта? Почему происходит именно этот процесс?
4. Как изменяется температура нефтепродукта по длине трубопровода при его идеальной теплоизоляции?
5. Сопоставьте температуры нефтепродукта на половине участка трубопровода при его идеальной и реальной изоляции.

Практическая работа 3. Самотечные участки в трубопроводе

При транспортировке нефтепродуктов в трубопроводе могут существовать режимы перекачки, в которых нефтепродукт на отдельных участках трубопровода движется неполным сечением или, как говорят, самотеком. **Самотечным** называется участок трубопровода, на котором нефть движется неполным сечением (самотеком) под действием силы тяжести.

Давление в образовавшейся парогазовой полости остается практически постоянным и равным давлению p_y упругости насыщенных паров нефтепродукта, поэтому течение на самотечном участке называется безнапорным. Однако, разность напоров между началом и концом самотечного участка все же существует, она равна разности геометрических высот этих сечений. Стационарные самотечные участки с расслоенным течением жидкости могут существовать только на нисходящих участках нефтепровода.

Одним из важных параметров самотечного участка трубопровода является его степень заполнения нефтепродуктом на данном участке σ .

По значению σ можно определить скорость течения нефтепродукта на самотечном участке, и уточнить коэффициент гидравлического сопротивления на нем.

Задание: определить, как влияют внутренний диаметр d и угол наклона $\alpha = 1, 2, 5$ и 10° трубопровода относительно горизонта на степень заполнения трубы нефтью, протекающей в самотечном режиме с расходом Q и кинематической вязкостью ν . Построить графические зависимости степени заполнения трубопровода σ от диаметра d и угла наклона к горизонту α .

Варианты заданий приведены в таблице 3. Расчетная схема приведена на рисунке 3.1.

Таблица 3 – Варианты заданий к практической работе 3

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
объёмный расход $Q, \text{м}^3/\text{с}$	0,25	0,50	0,70	0,30	0,60	0,25	0,50	0,70	0,30	0,60
кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6, \text{М}^2/\text{с}$	8,6	7,5	9,0	8,0	8,6	7,5	8,0	8,6	9,0	7,5
угол наклона профиля трубы к горизонту $\alpha, \text{град}$	1, 2, 5, 10									
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{м}$	0,2–1,0									
ускорение свободного падения $g, \text{м}/\text{с}^2$	9,81									

Таблица 3 – Варианты заданий к практической работе 3

Исходные данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
объёмный расход $Q, \text{м}^3/\text{с}$	0,30	0,60	0,35	0,25	0,70	0,60	0,35	0,30	0,40	0,45
кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6, \text{М}^2/\text{с}$	7,5	8,5	8,0	7,5	8,5	8,5	9,0	7,5	8,5	8,5
угол наклона профиля трубы к горизонту $\alpha, \text{град}$	1, 2, 5, 10									
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{м}$	0,2–1,0									
ускорение свободного падения $g, \text{м}/\text{с}^2$	9,81									

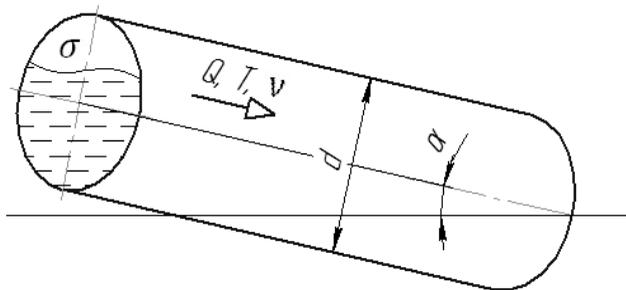


Рисунок 3.1 – Расчетная схема к решению задачи

Принятые допущения при решении задачи 3

1. Трубопровод гладкий, шероховатость при расчете коэффициента гидравлического сопротивления не учитывается.
2. При определении коэффициента гидравлического сопротивления переходный режим течения нефти считается по тем же уравнениям, как и турбулентный.

Рекомендации к решению задачи 3

1. Определяется средняя скорость потока

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (3.1)$$

2. Определяется число Рейнольдса

$$Re = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu}, \quad (3.2)$$

3. В зависимости от режима течения определяется коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda = \begin{cases} 64/Re & \text{при } Re < 2300 \\ 0.316/\sqrt[4]{Re} & \text{при } Re \geq 2300 \end{cases}, \quad (3.3)$$

4. Определяется гидравлический уклон на участке:

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d_i} \cdot \frac{V_{cp}^2}{2g}, \quad (3.4)$$

5. Вычисляется параметр γ :

$$\gamma = i/tg(\alpha), \quad (3.5)$$

6. Вычисляется степень заполнения трубопровода σ нефтью на данном участке:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma \geq 1 \\ 1 - 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2/\lambda} \cdot (1 - \sqrt{\gamma}) & \text{при } 32,32 \cdot \lambda \leq \gamma < 1 \\ 9,39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2\gamma/\lambda} + 0,113 & \text{при } 4,87 \cdot \lambda \leq \gamma < 32,32 \cdot \lambda \\ 0,1825 \cdot (2\gamma/\lambda)^{0,356} & \text{при } \gamma < 4,87 \cdot \lambda \end{cases} \quad (3.6)$$

7. Строятся графические зависимости степени заполнения трубопровода σ от его диаметра d и угла наклона к горизонту α (рисунок 3.2).
8. Формулируется вывод по задаче.

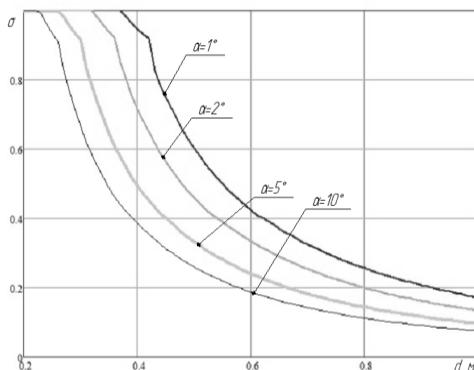


Рисунок 3.2 – Зависимости степени заполнения трубопровода σ от его диаметра d и угла наклона к горизонту α

Контрольные вопросы.

1. Какие участки трубопровода называются самотечными?
2. При помощи каких сил движется нефтепродукт на самотечных участках?
3. Чему равно давление в парогазовой полости на самотечном участке?
4. Какие параметры характеризуют самотечный участок трубопровода?
5. Как зависит степень заполнения на самотечном участке трубопровода от его диаметра и от угла наклона к горизонту?

Практическая работа 4. Расчет гидравлического удара на участке трубопровода

Если стационарное течение жидкости в трубопроводе нарушается путем резкого закрытия (или открытия) задвижки, включения (или отключения) насоса и т. д., то происходит резкое торможение (или ускорение) потока и ударное сжатие частиц жидкости – гидравлический удар.

Возможность гидравлического удара следует учитывать при проектировании и эксплуатации нефте- и нефтепродуктопроводов, поскольку ударное давление может намного превысить допустимые нормы, привести к разрыву трубы и возникновению аварийной ситуации. Скорость распространения волн гидравлического удара в стальных трубопроводах близка к значению 1000 м/с, а изменение скорости течения на 1 м/с вызывает изменение давления примерно на 9,0 атм.

Необходимость считаться с разрушительной силой гидравлического удара в трубопроводах, транспортирующих капельные жидкости (нефть, воду и т. п.), выражается в том, что на подобных трубопроводах (в отличие от газопроводов) никогда не устанавливают краны, быстро перекрывающие сечение трубопровода. На них применяют вентильные задвижки, производящие медленное перекрытие сечения и обеспечивающие безопасную остановку потока жидкости. На нефтеперекачивающих станциях применяют специальные устройства, призванные защитить трубопровод от последствий гидравлического удара. Например, на линиях всасывания нефтеперекачивающих станций устанавливают гасители гидравлического удара на случай, если станция внезапно отключится, и давление перед ней начнет повышаться. Принцип действия гасителей гидравлического удара состоит в отводе части жидкости из трубопровода в специальный резервуар для снижения темпа нарастания давления. Наибольшую опасность волны повышенного давления представляют

для тех участков трубопровода, где и без того существовало достаточно высокое статическое давление. Такие участки находятся вблизи нефтеперекачивающих станций, а также в наиболее низких сечениях трубопровода. Но и волны снижения давления могут вызывать опасные явления. В наиболее высоких сечениях трубопровода могут возникать парогазовые скопления, которые при возврате к стационарному режиму исчезают далеко не сразу. При этом они значительно уменьшают расход перекачки и вызывают повышенную вибрацию трубопровода.

Впервые правильное объяснение гидравлического удара дал Н.Е. Жуковский в конце XIX века в работе «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах» (1899).

Задание: определить, как влияют внутренний диаметр трубопровода $d = (0,05-1,0)$ м (при $\delta = 0,015$ м), толщина стенки $\delta = (0,01-0,06)$ м (при $d = 0,5$ м) и температура нефтепродукта $\bar{T} = -40; -20; 0; +20; +40$ °С на величину изменения давления ΔP в сечении трубопровода, которое находится перед внезапно закрывшейся задвижкой. Построить графические зависимости изменения давления ΔP в сечении трубопровода от диаметра трубопровода d , толщины стенки δ и температуры нефтепродукта \bar{T} . Варианты заданий приведены в таблице 4. Расчетная схема приведена на рисунке 4.1.

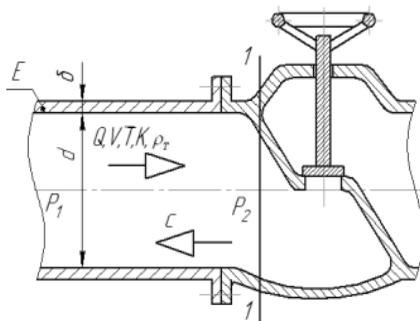


Рисунок 4.1 – Расчетная схема к решению задачи

Таблица 4 – Варианты заданий к практической работе 4

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
объемный расход нефтепродукта $Q, \text{м}^3/\text{с}$	0,25	0,50	0,70	0,30	0,60	0,25	0,50	0,70	0,30	0,60
плотность нефтепродукта при $+20^\circ\text{C}$ $\rho_{20}, \text{кг}/\text{м}^3$	870	750	870	750	870	750	870	750	870	750
объемный модуль упругости нефтепродукта $K, \text{ГПа}$	1,5	1,3	1,5	1,3	1,5	1,3	1,5	1,3	1,5	1,3
материал трубопровода		1Х18Н9	Д16Т		1Х18Н9	Д16Т		1Х18Н9	Д16Т	40Х
модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	206	185	70	206	185	70	206	185	70	206
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{м}$	0,05–1,0									
толщина стенки трубопровода $\delta, \text{м}$	0,01–0,06									
температура нефтепродукта $\bar{T}, ^\circ\text{C}$	-40; -20; 0; +20; +40									
унив. газовая пост. $R_0, \text{Дж}/\text{кмоль} \cdot \text{град}$	0,25									

Таблица 4 – Варианты заданий к практической работе 4

Исходные данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
объемный расход нефтепродукта $Q, \text{м}^3/\text{с}$	0,40	0,35	0,65	0,45	0,55	0,30	0,35	0,59	0,70	0,40
плотность нефтепродукта при $+20^\circ\text{C}$ $\rho_{20}, \text{кг}/\text{м}^3$	770	850	800	850	800	850	770	850	770	850
объемный модуль упругости нефтепродукта $K, \text{ГПа}$	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,5	1,5	1,3	1,5
материал трубопровода		1X18H9	Д16Т		1X18H9	Д16Т		1X18H9	Д16Т	40X
модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	200	190	90	190	200	85	195	190	85	200
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{м}$	0,05–1,0									
толщина стенки трубопровода $\delta, \text{м}$	0,01–0,06									
температура нефтепродукта $\bar{T}, ^\circ\text{C}$	-40; -20; 0; +20; +40									
унив. газовая пост. $R_0, \text{Дж}/\text{кмоль} \cdot \text{град}$	0,25									

Принятые допущения при решении задачи 4

1. Модуль Юнга E и коэффициент объемного расширения нефтепродукта K являются постоянными и не зависят от температуры.
2. Считается, что задвижка закрылась мгновенно.
3. При решении задачи инерционные свойства жидкости (измененное значение плотности) – присоединенная масса не учитываются.

Рекомендации к решению задачи 4

Расчеты проводятся: 1) для диапазона диаметров $d = (0,05-1,0)$ м при фиксированной толщине стенки $\delta = 0,015$ м; 2) для диапазона толщин стенок $\delta = (0,01-0,06)$ м при фиксированном диаметре $d = 0,5$ м.

1. Определяется средняя скорость транспортировки нефтепродуктов:

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

2. Определяется коэффициент температурного расширения нефти и нефтепродуктов, $1/^\circ\text{C}$:

$$\zeta = \begin{cases} 0,001225 & \text{при } 700 \leq \rho_{20} < 719 \\ 0,001183 & \text{при } 720 \leq \rho_{20} < 739 \\ 0,001118 & \text{при } 740 \leq \rho_{20} < 759 \\ 0,001054 & \text{при } 760 \leq \rho_{20} < 779 \\ 0,000995 & \text{при } 780 \leq \rho_{20} < 799 \\ 0,000937 & \text{при } 800 \leq \rho_{20} < 819 \\ 0,000882 & \text{при } 820 \leq \rho_{20} < 839 \\ 0,000831 & \text{при } 840 \leq \rho_{20} < 859 \\ 0,000782 & \text{при } 860 \leq \rho_{20} < 880 \end{cases}$$

3. Зависимость изменения плотности от температуры:

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 + \zeta(20 - \bar{T})], \text{ кг/м}^3, \quad (4.2)$$

4. Скорость c волны гидравлического удара:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho \cdot d}{\delta \cdot E}}}, \text{ м/с} , \quad (4.3)$$

5. Изменение давления ΔP по формуле Н. Е. Жуковского в сечении 1-1:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho \cdot c \cdot V_{cp}, \text{ Па} , \quad (4.4)$$

6. Строятся графические зависимости изменения давления ΔP в сечении трубопровода от диаметра трубопровода d , толщины стенки δ и температуры нефтепродукта \bar{T} (рисунок 4.2).

7. Формулируется вывод по задаче.

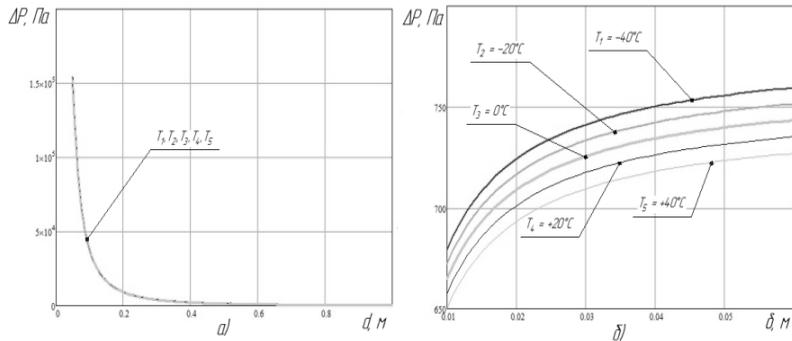


Рисунок 4.2 – Зависимости изменения давления ΔP в трубопроводе от диаметра d трубопровода и температуры \bar{T} (а) и от толщины стенки трубопровода δ и температуры \bar{T} (б)

Контрольные вопросы.

1. Что такое гидравлический удар и чем он опасен?
2. При каких процессах возникает гидравлический удар?
3. Кто является основоположником теории гидравлического удара?
4. Какими методами возможно защитить трубопровод от негативного влияния процесса гидравлического удара?
5. Как зависит повышение давления в трубопроводе при гидравлическом ударе от температуры, диаметра и толщины стенки?

Практическая работа 5. Расчет смеси нефтепродуктов

В настоящее время светлые нефтепродукты, бензины, керосины, дизельные топлива и др. перекачивают методом, получившим название **последовательная перекачка прямым контактированием**. Сущность последовательной перекачки прямым контактированием состоит в том, что разнородные нефтепродукты, объединенные в отдельные партии по несколько тысяч или десятков тысяч тонн каждая, закачивают в трубопровод последовательно, одна за другой, и транспортируют так до самого потребителя, так как сооружение отдельного трубопровода для каждого из выпускаемых нефтепродуктов нерентабельно. При этом каждая партия вытесняет предыдущую и в свою очередь вытесняется последующей.

Однако при всех своих достоинствах последовательная перекачка имеет один существенный недостаток, состоящий в смесеобразовании отдельных нефтепродуктов при их взаимном вытеснении в трубопроводе. Если смесеобразование, так называемых одноименных нефтепродуктов, например, различных сортов бензина, или различных сортов дизельного топлива, представляет сравнительно небольшую угрозу качеству нефтепродуктов, т. к. нефтепродукты, относящиеся к одной группе топлив, в большей степени совместимы друг с другом, чем нефтепродукты, относящиеся к различным группам; то смесеобразование разноименных нефтепродуктов, например, бензинов и дизельных топлив, бензинов и керосинов и т.д. представляет весьма серьезную угрозу их качеству. Тем не менее, последовательная перекачка нефтепродуктов прямым контактированием получила повсеместное и широкое распространение благодаря тому, что количество смеси, образующейся в зонах контакта последовательно движущихся партий невелико.

Образование смеси обусловлено объективными физическими процессами, присущими движению жидкости в трубопроводе. В-первых, жидкие нефтепродукты не являются твердыми елами, и вытеснение одного из них другим происходит неравномерно по сечению трубы. Скорости частиц жидкости в различных точках сечения трубопровода неодинаковы: у стенок трубопровода они равны нулю, а на его оси достигают максимального значения. Поэтому, вытеснение одного нефтепродукта другим происходит более интенсивно в центре трубы, в то время как у стенок трубопровода оно замедлено.

Неравномерность распределения в сечении трубопровода осредненных скоростей жидкости не является единственной причиной, ответственной за смесеобразование нефтепродуктов в зоне их контактирования. Как правило, светлые нефтепродукты перекачивают в турбулентном режиме, при котором частицы жидкости движутся в трубе не параллельно его стенкам, а совершают хаотические турбулентные движения. В турбулентных потоках существует интенсивное перемешивание различных частиц по сечению трубы за счет пульсаций скорости и хаотических движений отдельных частиц. Поэтому, *турбулентная диффузия* перемешивает клин вытесняющей и вытесняемой жидкостей по сечению трубопровода, обеспечивая их более или менее однородное распределение в каждом сечении.

Из вышесказанного следует, что чем меньше длина и объем области смеси, тем лучше. Поэтому, режимы транспортировки нефтепродуктов должны выбираться из условия минимального объема области смеси и возможностей нефтеперекачивающего оборудования.

Задание: определить, как влияют внутренний диаметр трубопровода $d = (0,1 - 1,0)$ м и объемный расход нефтепродуктов $Q = 0,01; 0,1; 0,5$ и $1,0$ м³/с на длину L_c и объем V_c области смеси при последовательной перекачке бензина (v_B) и дизельного топлива (v_T) в нефтепродуктопроводе длиной L с шероховатостью стенок Δ . Построить графические зависимости длины и объема области смеси в зависимости от диаметра трубопровода d и объемного расхода смеси Q .

Варианты заданий приведены в таблице 5. Расчетная схема приведена на рисунке 5.1

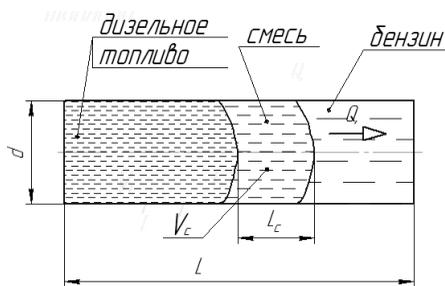


Рисунок 5.1 – Расчетная схема к решению задачи

Принятые допущения при решении задачи

1. Шероховатость стенок трубопровода учитывается только для турбулентного режима течения нефтепродуктов.
2. При определении коэффициента гидравлического сопротивления переходный режим течения нефтепродуктов считается по тем же уравнениям, как и турбулентный.
3. Объем V_c и длина L_c области смеси вычисляются к моменту времени t , когда нефтепродукты пройдут всю длину трубопровода L .

Таблица 5 – Варианты заданий к практической работе 5

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
длина трубопровода L , км	700	600	800	500	600	400	800	900	500	700
кинематическая вязкость бензина $\nu_B \cdot 10^6$, м ² /с	0,6	0,5	0,7	0,8	0,4	0,6	0,5	0,7	0,8	0,4
кинематическая вязкость дизельного топлива $\nu_T \cdot 10^6$, м ² /с	5,0	4,0	6,0	7,0	3,0	5,0	4,0	6,0	7,0	3,0
шероховатость стенок трубопровода Δ , мм	0,15	0,10	0,20	0,25	0,05	0,05	0,25	0,10	0,20	0,15
внутренний диаметр трубопровода d , м	0,1–1,0									
объемный расход нефтепродуктов Q , м ³ /с	0,01; 0,1; 0,5 и 1,0									

Таблица 5 – Варианты заданий к практической работе 5

Исходные данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
длина трубопровода L , км	800	500	700	700	500	600	900	700	800	600
кинематическая вязкость бензина $\nu_B \cdot 10^6$, м ² /с	0,4	0,7	0,5	0,4	0,8	0,7	0,5	0,6	0,4	0,8
кинематическая вязкость дизельного топлива $\nu_T \cdot 10^6$, м ² /с	3,0	6,0	7,0	5,0	4,0	3,0	7,0	4,0	6,0	5,0
шероховатость стенок трубопровода Δ , мм	0,10	0,20	0,15	0,10	0,25	0,05	0,15	0,05	0,15	0,20
внутренний диаметр трубопровода d , м	0,1–1,0									
объемный расход нефтепродуктов Q , м ³ /с	0,01; 0,1; 0,5 и 1,0									

Рекомендации к решению задачи 5

1. Определяется средняя скорость транспортировки нефтепродуктов:

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (5.1)$$

2. Определяются числа Рейнольдса для бензина (1) и для дизельного топлива (2):

$$Re_i = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu_i}, \quad (5.2)$$

3. В зависимости от режима течения определяются коэффициенты гидравлического сопротивления для бензина и дизельного топлива (для турбулентного режима течения коэффициент сопротивления λ определяется по формуле А.Д. Альтшуля):

$$\lambda_i = \begin{cases} 64/Re_i & \text{при } Re_i < 2300 \\ 0.11 \cdot \left(\frac{\Delta \cdot 10^{-3}}{d} + \frac{68}{Re_i} \right)^{0.25} & \text{при } Re_i \geq 2300 \end{cases}, \quad (5.3)$$

4. Определяется коэффициент продольного перемешивания:

$$K = 0.446 \cdot \left(\sqrt[4]{\lambda_1} + \sqrt[4]{\lambda_2} \right)^2 \cdot V_{cp} \cdot d, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad (5.4)$$

5. Рассчитывается объем смеси на момент времени t , когда нефтепродукты пройдут всю длину трубопровода L :

$$V_c = 6.58 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{K \cdot t}, \text{ м}^3 \text{ или}$$
$$V_c = 6.58 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{K \cdot \frac{L \cdot 10^3}{V_{cp}}}, \text{ м}^3, \quad (5.5)$$

где L – длина трубопровода [км].

6. Соответственно, длина L_c области смеси определится как:

$$L_c = \frac{V_c}{\pi \cdot d^2 / 4} = 6.58 \cdot \sqrt{K \cdot \frac{L \cdot 10^3}{V_{cp}}}, \text{ м}, \quad (5.6)$$

7. Строятся графические зависимости длины L_c и объема V_c области смеси в зависимости от диаметра трубопровода d и объемного расхода смеси Q (рисунок 5.2).

8. Формулируется вывод по задаче.

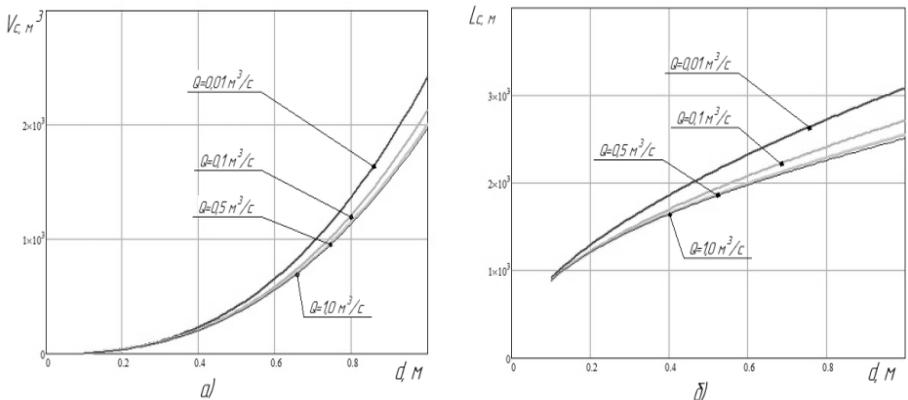


Рисунок 5.2 – Зависимости объема (а) и длины (б) области смеси от диаметра трубопровода d и объемного расхода смеси Q

Контрольные вопросы.

1. Как возможно перекачивать нефтепродукты? Какой из способов перекачки нефтепродуктов наиболее распространен.
2. Каковы причины появления смеси при перекачке нескольких нефтепродуктов друг за другом?
3. Смесеобразование нефтепродуктов при их последовательной перекачке – это положительный или отрицательный процесс?
4. Какие параметры в первую очередь влияют на объем смеси?
5. Как зависит объем и длина области смеси от диаметра трубопровода и от объемного расхода компонентов?

Список использованных источников

1 Дидковская, А.С. Компьютерный практикум по трубопроводному транспорту нефти и нефтепродуктов / А. С. Дидковская М.В. Лурье. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 126 с.

2 Лурье, М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2012. – 456 с.

3 Лурье, М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 349 с.

4 Коршак, А.А. Основы нефтегазового дела / Коршак А.А., Шаммазов А.М. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2005. – 528 с.

5 Макаров, С.С. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Математические модели в нефтегазовом комплексе» / С.С. Макаров, К.Э. Чекмышев. – Ижевск: Удмуртский университет, 2014. – 56 с.

6 Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов: учеб.-метод, комплекс для студ. спец. 1-70 05 01 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» / сост. В.К. Липский, М.Е. Демидова. – Новополюк: ПГУ, 2007. – 312с.