

**С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев**

**Методические указания  
к выполнению практических работ  
по дисциплине «Математические модели в  
нефтегазовом комплексе»**



**Ижевск  
2014**

Министерство образования и науки РФ  
ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет»  
Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых  
месторождений

**С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев**

**Методические указания  
к выполнению практических работ  
по дисциплине «Математические модели в  
нефтегазовом комплексе»**



**Ижевск  
2014**

УДК 517.958:622.692.4.033(075.8)  
ББК 39.77-082в631.0я73-5  
М152

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ  
(протокол № 7, от 23.12.2014)*

**Рецензент:** д.т.н., профессор Н. В. Митюков

**С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев**  
М152 Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Математические модели в нефтегазовом комплексе». – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2014. – 56 с.

Учебно-методическое пособие составлено на основе требований Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Методическое пособие состоит из десяти практических работ, которые посвящены изучению математических моделей процессов, возникающих при транспортировке нефте- и газопродуктов.

Пособие предназначено для студентов бакалавриата по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» для профилей подготовки «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти» и «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов нефтегазового производства».

УДК 517.958:622.692.4.033(075.8)  
ББК 39.77-082в631.0я73-5

© С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, 2014  
© ФГБОУ ВПО «Удмуртский  
государственный университет», 2014

## Содержание

Предисловие	4
Практическая работа №1. Знакомство с программной средой MathCAD	5
Практическая работа №2. Тепловой расчёт трубопровода	9
Практическая работа №3. Определение изменения объёма трубопровода в зависимости от изменения температуры и давления	14
Практическая работа №4. Определение зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диаметра трубопровода и расхода перекачки	18
Практическая работа №5. Определение процента увеличения скорости нефтепродуктов в трубопроводе при применении анти-турбулентной присадки	22
Практическая работа №6. Самотёчные участки в трубопроводе	27
Практическая работа №7. Расчёт нефтепровода совместно с насосной станцией	31
Практическая работа №8. Расчёт центробежного нагнетателя	37
Практическая работа №9. Расчёт гидравлического удара на участке трубопровода	41
Практическая работа №10. Расчёт смеси нефтепродуктов	46
Список рекомендуемой литературы	52
Приложение 1. Значения констант анти-турбулентных присадок	52
Приложение 2. Приведенные характеристики центробежного нагнетателя 370 - 18 -1	53
Приложение 3. Структура отчёта	54

## Предисловие

Современные технические средства открывают новые пути повышения качества подготовки специалистов во всех областях техники, в т.ч. в области трубопроводного транспорта нефти и газа. Математические модели в нефтегазовом комплексе представляет собой учебное пособие нового типа, позволяющее осуществлять, так называемые, *численные эксперименты* тех или иных технологических процессов транспортирования нефти или газа по трубопроводам. Фактически речь идет о компьютерном моделировании этих процессов, являющемся альтернативой физическому моделированию на лабораторных стендах. Это направление обучения будущих специалистов представляется прогрессивным и способствующим повышению качества обучения.

Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Математические модели в нефтегазовом комплексе» являются дополнением к лекционному курсу, которое поможет учащемуся закрепить теоретические навыки, полученные на лекциях, путем решения поставленных задач с применением программной среды MathCad. Студенты могут использовать пособие при подготовке к экзамену.

Методические указания содержат десять практических работ, соответствующих задачам при транспортировке нефте- и газо- продуктов.

Учебно-методическое пособие, в первую очередь, предназначено для студентов бакалавриата по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» для профилей подготовки «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти» и «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов нефтегазового производства».

## Практическая работа №1. Знакомство с программной средой MatCAD

Для выполнения практических работ по дисциплине «Математические модели в нефтегазовом комплексе» в среде MathCAD необходимо знание языка и базовых операторов. Для ознакомления с программной средой MathCAD предлагается выполнить следующие задания:

1. Найти значение аргумента функции  $y = f(x)$ , при условии, что  $y = 0$ .
2. Вычислить функцию  $y = f(x)$  в диапазоне значений аргумента  $x = 0..10$ .
3. Вычислить функцию  $z = f(x)$  при условии:  $z = y$ , при  $y < 8$  и  $z = 2y$ , при  $y \geq 8$ .
4. Построить на одном графике функции  $z = f(x)$  и  $y = f(x)$ .

Исходные данные приведены в таблице №1.

### Рекомендация к решению работы № 1

1. Поиск значения аргумента функции  $y = f(x)$ , при условии, что  $y = 0$ .
  - 1.1 Открывается MathCAD. На свободном поле (в левом верхнем углу) через знак присвоения задаётся начальное приближение аргумента, близкое к значению корня уравнения, например "x:=4".
  - 1.2. Через знак присвоения набирается выражение для функции  $y = f(x)$ , следует набирать  $y(x)$ , а не  $y$  (например,  $y(x):=4x^2 + 3x - 2$ , а не  $y := 4x^2 + 3x - 2$ ).
  - 1.3. MathCAD выполняет команды слева направо и сверху вниз, поэтому выражение  $y = f(x)$  должно быть расположено слева и ниже выражения "x:=".

Таблица 1 – Варианты заданий к практической работе №1

Последняя цифра шифра зачётной книжки	Исходные данные
	$y = f(x)$
0	$y = -x^2 + 8x + 2$
1	$y = 12 \cdot \ln(x^2 + 1) - 2.2x - 18$
2	$y = x^2 - 8x + 1$
3	$y = 7 \cdot \ln(x + 2) - 0.18x^2 - 1$
4	$y = x^2 - 7x - 9$
5	$y = x^2 - 2x - 4$
6	$y = 5 \cdot \exp(0.2x) - 10$
7	$y = x^2 + 2x - 2$
8	$y = -5 \cdot \exp(0.2x) + 16$
9	$y = 0.3x^3 - 2x^2$

1.4. Определяется значение корня уравнения при помощи оператора "root": "root( $y(x)$ ,  $x$ ) = ". Например, нахождение аргумента функции  $y(x) = 4x^2 + 3x - 2$  при  $y(x) = 0$  с использованием оператора root: " $x := 0.5$   
 $y(x) := 4x^2 + 3x - 2$  root( $y(x)$ ,  $x$ ) = ".

2. Вычисление функции  $y = f(x)$

2.1. Сначала набирается диапазон значений аргумента  $x := 0,1..10$  (используется знак присвоения " $:=$ ", а не знак " $=$ "). Набирается первое значение аргумента, через запятую последующее значение (так задаётся шаг вычислений) и конечное значение. Диапазон ставится кнопкой переменная-диапазон  на панели инструментов "вектора или матрицы" .

- 2.2. Через знак присвоения набирается выражение для функции  $y = f(x)$ , следует набирать  $y(x)$ , а не  $y$  (например,  $y(x) := 4x^2 + 3x - 2$ , а не  $y := 4x^2 + 3x - 2$ ).
- 2.3. Набирается значение " $x =$ " (равно, а не присвоить), и появится столбец со всеми значениями  $x$ . Также после ввода " $y =$ " появится столбец со всеми вычисленными значениями  $y(x)$ .
3. Вычисление функции  $z = f(x)$ .
- 3.1. Условие –  $z = y$ , при  $y < 8$  и  $z = 2y$ , при  $y \geq 8$  записывается следующим образом: записывается функция " $z(x) :=$ ", далее нажимается кнопка "Ъ" на английском языке, или оператор "Add Line" на панели инструментов "программирование"; после чего появятся 2 строки, в верхнюю строку записывается " $y(x) \text{ if } y(x) < 8$ ", а в нижнюю " $2y(x) \text{ if } y(x) \geq 8$ ". Оператор программирования "If" находится на панели инструментов "программирование".
- 3.2. Набирается значение " $x =$ " (равно, а не присвоить), и появится столбец со всеми значениями  $x$ , также после ввода " $z(x) =$ " появится столбец со всеми вычисленными значениями  $z$ .
4. Построение на одном графике функций  $z = f(x)$  и  $y = f(x)$ .
- 4.1. Для построения графика необходимо: на панели инструментов "график" выбрать опцию график  $X - Y$  . После чего появится два вложенных друг в друга квадрата с несколькими точками. Сначала курсор подводится к средней точке оси абсцисс и выставляется значение " $x$ ", далее курсор подводится к средней точке оси ординат

и выставляется значение " $y(x)$ ". Щёлкаем мышью вне графика, и на экране появится график (см. рисунок 1.1). Цвет линии, тип сетки и другие параметры графика можно изменять, если кликнуть на график правой клавишей мыши и в открывшемся окне выбрать "формат".

4.2. Для построения функции " $z(x)$ " на одном графике вместе с функцией " $y(x)$ " необходимо: после значения " $y(x)$ " нажать ";," и в появившейся второй строке указывается функция " $z(x)$ ". Щёлкаем мышью вне графика, и на экране появится график (см. рисунок 1.2).

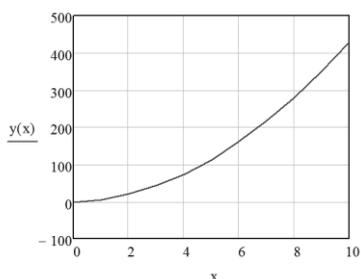


Рисунок 1.1 – График функции  $y = f(x)$

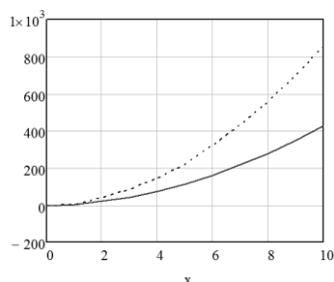


Рисунок 1.2 – Графики функций  $y = f(x)$  и  $z = f(x)$

5. Формулируется вывод по задаче.

Вопросы для самоконтроля

1. Как вводить значения в среде MathCAD?
2. Как записываются функции в среде MathCAD?
3. В чём разница между знаками "=" и ":=" ?
4. Какое действие выполняет оператор "root"?
5. Как записываются условия в среде MathCAD?
6. Как построить графики в среде MathCAD? Как построить две функции на одном графике?

## Задача №2. Тепловой расчёт 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  $\rho, C_v$  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. Расчётная схема приведена на рисунке 2.1.

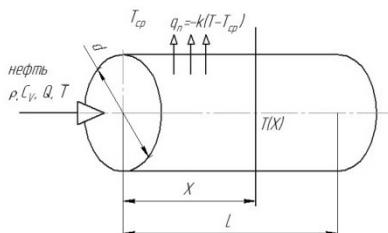


Рисунок 2.1 – Расчётная схема к решению задачи №2

### 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 – Варианты заданий к практической работе №2

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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 $k, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	2	4	3	5	1	4	2	5	6	2
температура окружающей среды $T_{cp}, ^\circ\text{C}$	+8	+12	-3	-10	+20	+25	-5	+5	+30	-2
плотность нефти при $20 ^\circ\text{C}$ $\rho_{20}, \text{кг}/\text{м}^3$	835									
начальное значение температуры нефти $\bar{T}, ^\circ\text{C}$	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.

- Плотность и теплоёмкость нефти определяются для начальной температуры и считаются постоянными на всей длине трубопровода.
- Коэффициент теплопередачи  $k$  считается постоянным по всей длине трубопровода.

### Рекомендации к решению задачи № 2

Последовательно вычисляются параметры нефти

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

$$\zeta = \begin{cases} 0.001225 & \text{при } 700 \leq \rho_{20} < 720 \\ 0.001183 & \text{при } 720 \leq \rho_{20} < 740 \\ 0.001118 & \text{при } 740 \leq \rho_{20} < 760 \\ 0.001054 & \text{при } 760 \leq \rho_{20} < 780 \\ 0.000995 & \text{при } 780 \leq \rho_{20} < 800 \\ 0.000937 & \text{при } 800 \leq \rho_{20} < 820 \\ 0.000882 & \text{при } 820 \leq \rho_{20} < 840 \\ 0.000831 & \text{при } 840 \leq \rho_{20} < 860 \\ 0.000782 & \text{при } 860 \leq \rho_{20} < 880 \end{cases}$$

- Зависимость изменения плотности от температуры:

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

- Определяется теплоёмкость нефти по приближённой зависимости:

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

- Уравнение притока тепла имеет вид:

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

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 учётом 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

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

6. Температура нефти в участке  $X$  трубопровода

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

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).

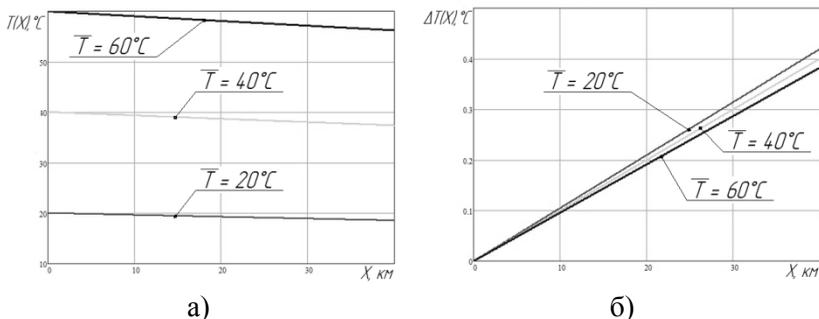
8. При идеальной теплоизоляции трубопровода  $k = 0, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  уравнение (2.3) примет вид:

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

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  $\Delta T$  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 её изменения  $\Delta T$  (б) по длине трубопровода  $X$  в зависимости от её начальной температуры  $\bar{T}$

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

Вопросы для самоконтроля

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. Определение изменения объёма трубопровода в зависимости от изменения температуры и давления

Известно, что при нагревании большинство тел расширяются, а если они будут подвержены воздействию внутреннего давления, то их геометрические размеры могут значительно увеличиться. В практической работе №3 предлагается исследовать влияние изменения температуры и внутреннего давления на изменение объёма трубопровода.

**Задание:** определить, как изменится объём  $V$  трубопровода с наружным диаметром  $D = 0.2; 0.5; 0.7$  и  $1.0$  м при изменении его температуры в интервале от  $-50$  до  $+70$  °С и при изменении в нём давления от  $0$  до  $16$  МПа. Построить графики изменения объёма трубопровода в зависимости от температуры, давления и наружного диаметра. Сравнить результаты.

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

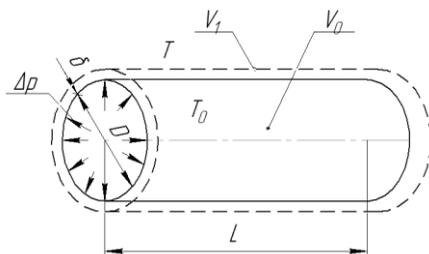


Рисунок 3.1 – Расчётная схема к решению задачи №3

#### Принятые допущения при решении задачи №3

1. Модуль Юнга  $E$  и коэффициент линейного расширения  $\alpha$  материала являются постоянными и не зависят от температуры и давления.
2. Изменение температуры и давления происходит равномерно по всему объёму трубопровода.

Таблица 3 – Варианты заданий к практической работе №3

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
длина трубопровода $L$ , км	120	50	100	40	70	110	30	15	90	80
толщина стенки $\delta$ , мм	8	5	12	7	6	10	8	8	14	10
материал	40X	1X18H9	Д16Т	40X	1X18H9	Д16Т	40X	1X18H9	Д16Т	40X
коэффициент температурного расширения $\alpha \cdot 10^5, 1/^\circ\text{C}$	1.3	1.6	2.3	1.3	1.6	2.3	1.3	1.6	2.3	1.3
модуль Юнга $E$ , ГПа	206	185	70	206	185	70	206	185	70	206
наружный диаметр $D$ , м	0.2; 0.5; 0.7 и 1.0									
начальная температура трубопровода $T_0, ^\circ\text{C}$	+20									
изменение температуры $T, ^\circ\text{C}$	-50...+70									
изменение давления $\Delta p$ , МПа	0...16									

### Рекомендации к решению работы № 3

1. Объём трубопровода в зависимости от изменения температуры определяется уравнением:

$$V(T) = V_0 \cdot [1 - \alpha(T_0 - T)], \text{ м}^3, \quad (3.1)$$

его изменение:

$$\Delta V(T) = V_0 \cdot \alpha(T_0 - T), \text{ м}^3, \quad (3.2)$$

Относительное изменение объёма трубопровода:

$$V(T)/V_0 = [1 - \alpha(T_0 - T)], \quad (3.3)$$

При вычислении относительных величин в среде MathCAD их необходимо записывать  $V1(T)$ , или  $Vot(T)$ , а не  $V(T)/V_0$ .

2. Изменение диаметра трубы от изменения внутреннего давления  $\Delta p$ :

$$\Delta d(p) = \frac{d^2}{2E\delta} \cdot (p - p_0) \quad \text{или} \quad \Delta d(\Delta p) = \frac{d^2}{2E\delta} \cdot \Delta p, \text{ м}, \quad (3.4)$$

где  $d = D - 2\delta$ ;

Относительное изменение диаметра трубопровода от давления  $\Delta p$ :

$$\frac{\Delta d(\Delta p)}{d} = \frac{d}{2E\delta} \cdot (p - p_0), \quad (3.5)$$

3. Изменение площади трубопровода от давления  $\Delta p$ :

$$\Delta S(\Delta p) = \frac{\pi d^3}{4E\delta} \cdot \Delta p, \text{ м}^2, \quad (3.6)$$

Относительное изменение площади трубопровода от давления  $\Delta p$ :

$$\frac{\Delta S(\Delta p)}{S} = \frac{d}{E\delta} \cdot \Delta p, \quad (3.7)$$

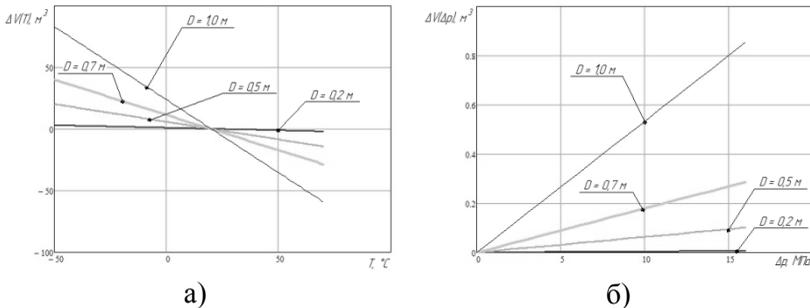
4. Изменение объёма трубопровода от давления  $\Delta p$ :

$$\Delta V(\Delta p) = \frac{\pi d^3 \cdot L}{4E\delta} \cdot \Delta p, \text{ м}^3, \quad (3.8)$$

Относительное изменение объёма трубопровода от давления  $\Delta p$  :

$$\frac{\Delta V(\Delta p)}{V} = \frac{d}{E\delta} \cdot \Delta p, \quad (3.9)$$

5. По полученным значениям строятся графические зависимости изменения объёма  $\Delta V$  от температуры  $T$ , давления  $\Delta p$  и наружного диаметра  $D$  (см. рисунок 3.2).
6. Полученные графические зависимости сравниваются и формулируется вывод по задаче.



а) – от температуры  $T$  и наружного диаметра  $D$ ;

б) – от внутреннего давления  $\Delta p$  и наружного диаметра  $D$

Рисунок 3.2 – Изменение объёма трубопровода

Вопросы для самоконтроля

1. По каким формулам рассчитывается изменение объёма трубопровода от изменения давления и температуры?
2. Как влияет изменение температуры и внутреннего давления на изменение объёма трубопровода?
3. Как влияет диаметр трубопровода на изменение его объёма при фиксированных значениях температуры и давления?

## Практическая работа №4. Определение зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диаметра трубопровода и расхода перекачки

Между стенкой трубопровода и нефтепродуктом, в процессе транспортировки, возникает трение, которое учитывается в виде коэффициента гидравлического сопротивления. Коэффициент гидравлического сопротивления является важным параметром участка трубопровода, так как, по его значению можно определить путевые потери давления по длине трубопровода и, соответственно, подобрать насосное оборудование, которое создаст напор на преодоление этих потерь. В первую очередь коэффициент гидравлического сопротивления будет зависеть от скорости потока и геометрических характеристик трубопровода.

**Задание:** определить, как зависит коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  при течении дизельного топлива, с значением кинематической вязкости  $\nu$  при температуре  $T$ , в трубопроводе  $d = (0.05 \dots 0.50)$  м и значениях расхода  $Q = 0.001; 0.01; 0.10; 1.0$  и  $10.0$  м<sup>3</sup>/с. Определить приведённую мощность на прокачку топлива при заданных значениях объёмного расхода  $Q$  и диаметрах  $d$ . Построить графические зависимости коэффициента  $\lambda$  гидравлического сопротивления и мощности на прокачку топлива  $N$  в зависимости от объёмного расхода  $Q$  и внутреннего диаметра  $d$  трубопровода.

Варианты заданий приведены в таблице 4. Расчётная схема приведена на рисунке 4.1.

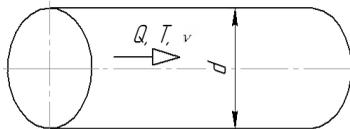


Рисунок 4.1 – Расчётная схема к решению задачи №4

Таблица 4 – Варианты заданий к практической работе №4

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
температура топлива $T, ^\circ\text{C}$	+10	+25	-2	-10	+15	+40	+35	+5	+12	+30
кинематическая вязкость топлива при $20\ ^\circ\text{C}$ $\nu_{20}, \text{ м}^2/\text{с}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$									
кинематическая вязкость топлива при $0\ ^\circ\text{C}$ $\nu_0, \text{ м}^2/\text{с}$	$8.0 \cdot 10^{-6}$									
внутренний диаметр трубопровода $d, \text{ м}$	0.05 ... 0.50									
объёмный расход $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0.001; 0.01; 0.10; 1.0 и 10									
изменение температуры $T, ^\circ\text{C}$	+10									
изменение давления $\Delta p, \text{ МПа}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$									

### Принятые допущения при решении задачи №4

1. Трубопровод гладкий, шероховатость внутренней поверхности при расчёте коэффициента гидравлического сопротивления не учитывается.
2. При определении коэффициента гидравлического сопротивления переходный режим течения считается по тем же уравнениям, как и турбулентный.
3. При расчёте мощности на прокачку топлива его плотность считается постоянной величиной.

### Рекомендации к решению задачи № 4

1. По формуле Рейнольдса-Филонова определяется кинематическая вязкость топлива при заданной температуре  $T$ :

$$\nu(T) = \nu_0 \cdot e^{-K \cdot (T-0)}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (4.1)$$

где  $K$  – опытный коэффициент, определяющийся по формуле:

$$K = \frac{\ln(\nu_0/\nu_{20})}{20-0}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \quad (4.2)$$

2. Определяется средняя скорость потока:

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (4.3)$$

3. Определяется число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu}, \quad (4.4)$$

4. В зависимости от режима течения определяется коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода:

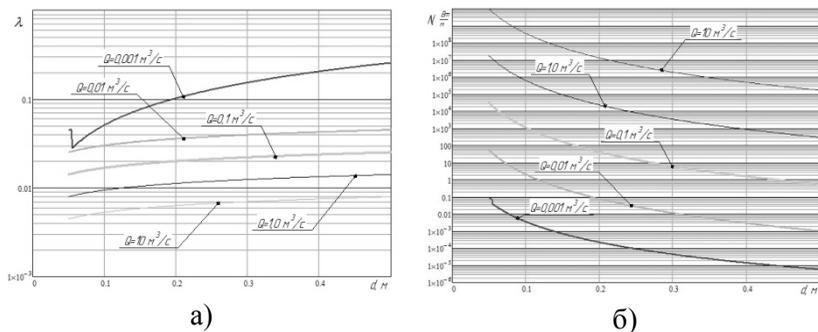
$$\lambda = \begin{cases} 64/\text{Re} & \text{при } \text{Re} < 2300 \\ 0.316/\sqrt[4]{\text{Re}} & \text{при } \text{Re} \geq 2300 \end{cases} \quad (4.5)$$

5. Мощность на прокачку топлива на 1 м длины:

$$N = 0.5 \cdot Q \cdot \rho \cdot \frac{1}{d} \cdot \lambda \cdot V_{cp}^2, \text{ Вт/м}, \quad (4.6)$$

где  $\rho = 840 \text{ кг/м}^3$  – плотность топлива.

6. Строятся графические зависимости коэффициента сопротивления  $\lambda$  и приведённой мощности на прокачку топлива от объёмного расхода топлива  $Q$  и диаметра трубопровода  $d$  (см. рисунок 4.2).
7. Формулируется вывод по задаче.



- а) – коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$   
 б) – приведённой мощности на прокачку топлива  $N$  [Вт/м]

Рисунок 4.2 – Графические зависимости параметров от объёмного расхода топлива  $Q$  и диаметра трубопровода  $d$

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое параметр Рейнольдса?
2. Как определить вязкость компонента при любой температуре?
3. Какие режимы течения вы знаете? Напишите их критериальные уравнения?
4. Что такое коэффициент  $\lambda$  гидравлического сопротивления участка трубопровода?
5. Как зависит коэффициент гидравлического сопротивления и мощность на прокачку топлива от объёмного расхода и диаметра для вашего варианта задания?

## **Практическая работа №5. Определение процента увеличения скорости нефтепродуктов в трубопроводе при применении атитурбулентной присадки**

Потери напора на трение являются основной причиной затрат электроэнергии на перекачку жидкостей и газов по трубопроводам. Они обусловлены силами внутреннего трения между слоями движущейся жидкости и трением о внутреннюю поверхность трубопровода. И в ламинарном, и в турбулентном потоке происходит диссипация (рассеивание) механической энергии движения и переход в энергию хаотического движения жидкостей (теплоту). Для турбулентных течений этот переход носит многостадийный характер. Одним из методов, позволяющих снизить потери энергии является метод вмешательства в структуру турбулентных течений путём введения специальных высокомолекулярных присадок. Этот эффект был открыт в конце 40-х годов английским учёным Томсом.

Механизм действия всех разновидностей антитурбулентных присадок основан на гашении турбулентных пульсаций вблизи внутренней поверхности трубопровода за счёт взаимодействия длинномерных молекул присадки с турбулентными вихрями, зарождающимися вблизи стенок трубопровода. При этом, эффект достигается при чрезвычайно малых концентрациях присадок (измеряемых обычно в миллионных частях по объёму жидкости *ppm*, к которой они добавляются).

За счёт гашения пристеночной турбулентности происходит снижение гидравлического сопротивления, оказываемого потоку трубой. Таким мероприятием достигается либо увеличение производительности перекачки, либо снижение давления на перекачивающих станциях (при сохранении производительности). Эффект снижения гидравлического сопротивления, а значит и расхода электроэнергии, может составлять от 20 до 60%.

Из известных зарубежных присадок к нефтепродуктам

можно выделить американскую присадку "CDR" фирмы "Dupon-Conoco" и присадку "NECCAD-547" финской фирмы "Neste", созданные на углеродной основе. Первая присадка в равной степени пригодна для перекачки как бензинов, так и дизельных топлив, вторая – рекомендуется, главным образом, для перекачки дизельных топлив.

Использование антитурбулентных присадок имеет некоторое специфическое ограничение: при длительном действии присадок в турбулентном потоке они разрушаются. Особенно велико разрушение присадок после прохождения через насосы перекачивающих станций, поэтому после каждой насосной станции необходимо вводить в поток свежие порции присадок.

**Задание:** определить, на сколько процентов изменится скорость нефтепродукта в трубопроводе с внутренним диаметром  $d$  при использовании антитурбулентной присадки с концентрацией  $\theta$ , если кинематическая вязкость нефтепродукта  $\nu$  и расход  $Q = (0.1...20) \text{ м}^3/\text{с}$ . Построить графическую зависимость увеличения скорости нефтепродукта в трубопроводе  $V_p/V_{cp}$  от объёмного расхода  $Q$  и концентрации присадки  $\theta$ .

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

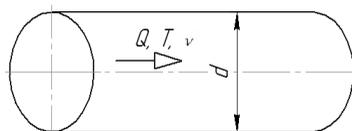


Рисунок 5.1 – Расчётная схема к решению задачи №5

### Принятые допущения при решении задачи №5

1. Трубопровод гладкий, шероховатость при расчёте коэффициента гидравлического сопротивления не учитывается.
2. Учитывается только турбулентный режим течения нефтепродукта.

Таблица 5 – Варианты заданий к практической работе №5

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
внутренний диаметр $d$ , м	0.50	0.25	0.30	0.70	0.60	0.50	0.25	0.30	0.70	0.60
кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ , М <sup>2</sup> /с	8.6	7.5	9.0	8.0	8.6	7.5	8.0	8.6	9.0	7.5
тип присадки	CDR		Neccad-547		CDR		Neccad-547		CDR	
объёмный расход $Q$ , м <sup>3</sup> /с	0.1...20									

## Рекомендации к решению задачи № 5

Определяются параметры потока

1. Определяется средняя скорость потока

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

2. Определяется число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu}, \quad (5.2)$$

3. При турбулентном режиме течения нефтепродукта без присадки трансцендентное уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.88 \cdot \ln(\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.8, \quad (5.3)$$

4. Согласно приложению 1, в соответствие с заданием, определяется константа антитурбулентной присадки  $K(\theta)$ .

5. При турбулентном режиме течения нефтепродукта с использованием антитурбулентной присадки трансцендентное уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_p}} = 0.88 \cdot \ln(K(\theta) \cdot \text{Re} \cdot \sqrt{\lambda_p}) - 3.745, \quad (5.4)$$

6. Из уравнений (5.3) и (5.4) находятся коэффициенты гидравлического сопротивления трубопровода без использования присадки  $\lambda$  и при использовании антитурбулентной присадки  $\lambda_p$ .

7. Определяется скорость в трубопроводе после использования присадки:

$$V_p = V_{cp} \cdot \sqrt{\lambda/\lambda_p}, \text{ м/с}, \quad (5.5)$$

и её изменение в %:

$$\Delta V = (V_p - V_{cp}) \cdot 100\% / V_{cp} = (\sqrt{\lambda/\lambda_p} - 1) \cdot 100\%, \quad (5.6)$$

8. Строятся зависимости изменения скорости  $\Delta V$  нефтепродукта в трубопроводе от объёмного расхода нефтепродукта  $Q$  и концентрации присадки  $\theta$  (см. рисунок 5.2).
9. Формулируется вывод по задаче.

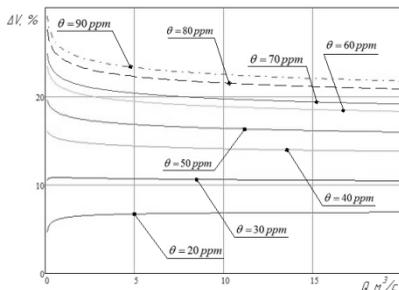


Рисунок 5.2 – Зависимость изменения скорости нефтепродукта  $\Delta V$  после использования антитурбулентной присадки в трубопроводе от объёмного расхода нефтепродукта  $Q$  и концентрации присадки  $\theta$

Вопросы для самоконтроля

1. Зачем при транспортировке нефтепродуктов применяют анти-турбулентные присадки?
2. При каких концентрациях антитурбулентной присадки в потоке достигается эффект от её применения?
3. Каков механизм действия антитурбулентных присадок?
4. Какие антитурбулентные присадки вы знаете?
5. В чём минус от применения антитурбулентных присадок?
6. Как будет зависеть скорость нефтепродукта от концентрации антитурбулентной присадки в потоке?

## Практическая работа №6. Самотёчные 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 самотёчного участка трубопровода является его степень заполнения нефтепродуктом на данном участке  $\sigma$ . По значению  $\sigma$  можно определить скорость течения нефтепродукта на самотёчном участке, и уточнить коэффициент гидравлического сопротивления на нём.

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

Варианты заданий приведены в таблице 6. Расчётная схема приведена на рисунке 6.1.

Таблица 6 – Варианты заданий к практической работе №6

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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									

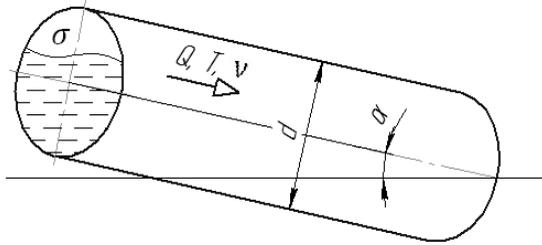


Рисунок 6.1 – Расчётная схема к решению задачи №6

### Принятые допущения при решении задачи №6

1. Трубопровод гладкий, шероховатость при расчёте 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 № 6

1. Определяется средняя скорость потока

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (6.1)$$

2. Определяется число Рейнольдса

$$Re = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu}, \quad (6.2)$$

3. В зависимости от режима течения определяется коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda = \begin{cases} 64/Re & \text{при } Re < 2300 \\ 0.316/\sqrt[4]{Re} & \text{при } Re \geq 2300 \end{cases}, \quad (6.3)$$

4. Определяется гидравлический уклон на участке:

$$i = \lambda \cdot \frac{1}{d_i} \cdot \frac{V_{cp}^2}{2g}, \quad (6.4)$$

5. Вычисляется параметр  $\gamma$ :

$$\gamma = i/tg(\alpha), \quad (6.5)$$

6. Вычисляется степень заполнения трубопровода  $\sigma$  нефтью на данном участке:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma \geq 1 \\ 1 - 2.98 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2/\lambda} \cdot (1 - \sqrt{\gamma}) & \text{при } 32.32 \cdot \lambda \leq \gamma < 1 \\ 9.39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2\gamma/\lambda} + 0.113 & \text{при } 4.87 \cdot \lambda \leq \gamma < 32.32 \cdot \lambda \\ 0.1825 \cdot (2\gamma/\lambda)^{0.356} & \text{при } \gamma < 4.87 \cdot \lambda \end{cases} \quad (6.6)$$

7. Строятся графические зависимости степени заполнения трубопровода  $\sigma$  от его диаметра  $d$  и угла наклона к горизонту  $\alpha$  (см. рисунок 6.2).
8. Формулируется вывод по задаче.

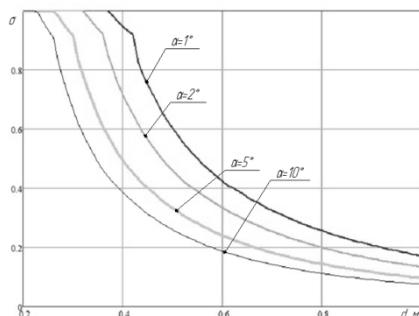


Рисунок 6.2 – Зависимости степени заполнения трубопровода  $\sigma$  от его диаметра  $d$  и угла наклона к горизонту  $\alpha$

Вопросы для самоконтроля

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

## Практическая работа №7. Расчёт нефтепровода совместно с насосной станцией

На линейном участке трубопровода нефтепродукт будет двигаться от сечения с большим значением напора к сечению с меньшим значением напора. При этом, напор от сечения к сечению будет постоянно уменьшаться за счёт расходования энергии на преодоление сил трения, поэтому для осуществления движения нефтепродукта в трубопроводе нужны устройства, создающие напор, а именно, – насосы.

Насосы – это устройства для принудительного перемещения жидкости от сечения с меньшим значением напора (линии всасывания) к сечению с большим (линии нагнетания). Каждый насос имеет свою напорно-расходную характеристику  $\Delta H = F(Q)$ . Для обеспечения большей производительности нефтеперекачивающих станций насосы могут соединяться параллельно или последовательно-параллельно друг с другом.

В практической работе №7 предлагается выполнить расчёт нефтепровода совместно с насосной станцией, чтобы понять, как влияют параметры на выходе из насосной станции на расход нефтепродукта и давление в конце участка трубопровода.

**Задание:** центробежный насос марки НМ 1250-260 с диаметром рабочего колеса  $D_1=440\text{мм}$  имеет  $(Q - \Delta H)$  характеристику:  $\Delta H_1 = 331 - 0.451 \cdot 10^{-4} Q^2$ . С ним последовательно соединён другой насос той же марки, но с диаметром рабочего колеса  $D_2$ . Насосная станция, состоящая из описанных насосов осуществляет перекачку нефтепродукта с физическими свойствами  $\rho$  и  $\nu$  по трубопроводу с параметрами  $d$ ,  $L$ ,  $\Delta$ ,  $z_0$  и  $z_L$ . Потери напора  $h_c$  в обвязке станции описываются зависимостью  $h_c = 25 - 0.036 \cdot 10^{-4} Q^2$  ( $\Delta H, h_c$ , [м];  $Q$ , [ $\text{м}^3/\text{час}$ ]).

Определить, как влияют внутренний диаметр трубопровода  $d$  и давление в конце участка трубопровода  $P_L$  на расход перекачки  $Q$  и давление в начале участка  $P_0$  (после насосов), если имеется подпор перед станций  $h_{II}$ . Построить графические зависимости расхода перекачки  $Q$  и давления в начале трубопровода  $P_0$  от внутреннего диаметра  $d$  и давления в конце трубопровода  $P_L$ . Кроме того, известно, что потери напора на местных сопротивлениях составляют 2% от потерь напора на трение на линейном участке трубопровода.

Варианты заданий приведены в таблице 7. Расчётная схема приведена на рисунке 7.1.

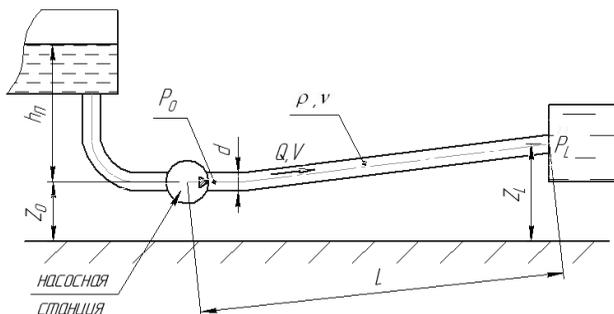


Рисунок 7.1 – Расчётная схема к решению задачи №7

### Принятые допущения при решении задачи №7

1. Насосы вращаются с одинаковой угловой скоростью при последовательном соединении.
2. Самотёчные участки в трубопроводе не учитываются.
3. Уровень жидкости в баке, используемом для подпора, постоянный.
4. Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  определяется по формуле А. Д. Альтшуля.
5. При определении коэффициента гидравлического сопротивления переходный режим течения нефтепродуктов считается по тем же уравнениям, как и турбулентный.

Таблица 7 – Варианты заданий к практической работе №7

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
плотность нефтепродукта $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	840	870	900	850	870	900	750	840	900	840
кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ , М <sup>2</sup> /с	9.0	25.0	30.0	15.0	25.0	30.0	5.0	9.0	30.0	9.0
диаметр колеса второго насоса $D_2$ , мм	300	450	350	320	300	320	450	350	400	350
длина трубопровода $L$ , км	700	600	800	500	600	400	800	900	500	700
шероховатость стенок трубопровода $\Delta$ , мм	0.15	0.10	0.20	0.50	0.05	0.05	0.25	0.10	0.20	0.15
высота начального участка трубы $z_0$ , м	50	30	20	25	40	15	50	30	20	40
высота конечного участка трубы $z_L$ , м	100	80	90	80	70	80	100	80	90	70
подпор перед станцией $h_H$ , м	40									
давление в конце участка трубопровода $P_L$ , МПа	0.2; 0.5; 1.0									
внутренний диаметр трубопровода $d$ , м	0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9 и 1.0									
ускорение свободного падения $g$ , м/с <sup>2</sup>	9,81									

## Рекомендации к решению задачи № 7

1. В соответствии с теорией подобия рабочих характеристик насосов определяется  $Q - \Delta H$  характеристика второго насоса с диаметром рабочего колеса  $D_2$ :

$$\Delta H_2 = a \cdot \left( \frac{\omega_2 \cdot D_2}{\omega_1 \cdot D_1} \right)^2 - b \cdot Q^2, \text{ м}, \quad (7.1)$$

где:  $a = 331$  – номинальное значение напора первого насоса, м;

$b = 0.451 \cdot 10^{-4}$  – коэффициент перед  $Q^2$ , час<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;

$\omega_1 = \omega_2$  – угловые скорости вращения колёс насосов, об/мин (здесь они равны, и не учитываются в расчётах).

2. Определяется  $Q - \Delta H$  характеристика станции:

$$\Delta H = F(Q) = F_1(Q) + F_2(Q) - h_c(Q), \text{ м} \quad (7.2)$$

Для последовательно соединённых насосов:

$$\Delta H = (a_1 + a_2 - a_c) - (b_1 + b_2 - b_c) \cdot Q^2, \text{ или}$$

$$\Delta H = a_\Sigma - b_\Sigma \cdot Q^2, \text{ м}$$

3. Составляется уравнение баланса напоров для неизвестного значения скорости течения  $V$ :

$$h_{\Pi} - \frac{P_L}{\rho \cdot g} + (z_0 - z_L) + a_\Sigma - 1.296 \cdot 10^{-7} \cdot b_\Sigma \cdot Q^2 =$$

$$= 1.02 \cdot \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (7.3)$$

так как  $Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V$  уравнение (7.3) примет вид:

$$h_{\Pi} - \frac{P_L}{\rho \cdot g} + (z_0 - z_L) + a_\Sigma =$$

$$= \left( 1.02 \cdot \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2g} + 1.296 \cdot 10^{-7} \cdot b_\Sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot d^4}{16} \right) \cdot V, \quad (7.3')$$

Для решения уравнения (7.3') в первом приближении коэффициент гидравлического сопротивления принимается равным  $\lambda_{np} = 0.02$ , после чего определяется скорость  $V$  из уравнения (7.3').

4. Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (7.4)$$

5. Уточнённый коэффициент гидравлического сопротивления по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0.11 \cdot \left( \frac{\Delta \cdot 10^{-3}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25}, \quad (7.5)$$

6. Рассчитанный, по формуле (7.5), уточнённый коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  сравнивается с ранее принятым  $\lambda_{np} = 0.02$ . Если отличие составляет более  $\pm 3\%$ , то изменяется значение  $\lambda_{np}$  и заново определяется скорость  $V$ . Итерации продолжаются до тех пор, пока отличие коэффициентов не будет меньше  $\pm 3\%$ .

7. Расход перекачки при известной скорости нефтепродукта:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (7.6)$$

8. Давление  $P_0$  в начале трубопровода определяется по формуле:

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot (h_{II} + F(Q)) \text{ или} \\ P_0 = \rho \cdot g \cdot (h_{II} + a_{\Sigma} - b_{\Sigma} \cdot (Q \cdot 3600)^2), \text{ Па}, \quad (7.7)$$

9. Строятся графические зависимости расхода перекачки  $Q$  и давления  $P_0$  в начале трубопровода от внутреннего

диаметра трубопровода  $d$  и давления в конце его участка  $P_L$  (см. рисунок 7.2).

10. Формулируется вывод по задаче.

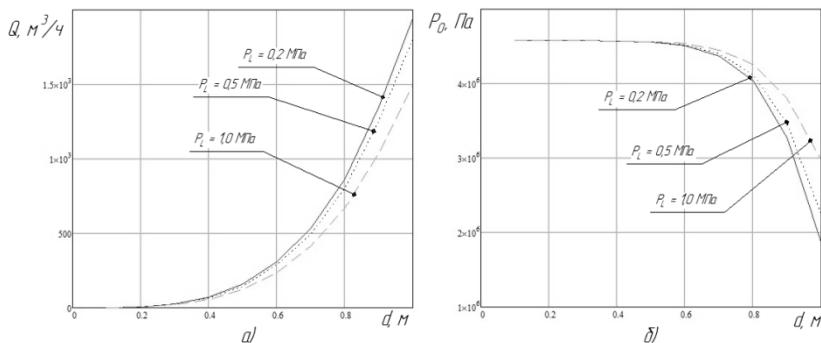


Рисунок 7.2 – Зависимость расхода перекачки  $Q$  (а) и давления  $P_0$  в начале трубопровода (б) от его внутреннего диаметра  $d$  и давления в конце  $P_L$

Вопросы для самоконтроля

1. Какие устройства называются насосами? Для чего они предназначены?
2. Зачем насосы соединяют в насосные (нефтеперекачивающие) станции? Какие типы соединения насосов вы знаете?
3. Почему коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  определяется по формуле Альтшуля?
4. Как будет зависеть расход перекачки нефтепродукта от диаметра трубопровода и давления в его выходном сечении?
5. Как будет зависеть давление в начале трубопровода (после насосной станции) от диаметра трубопровода и давления в его выходном сечении?

## Практическая работа №8. Расчёт центробежного нагнетателя

Транспортировка газа по трубопроводам осуществляется компрессорными станциями, оборудованными газоперекачивающими агрегатами. Газоперекачивающие агрегаты состоят из привода (в качестве которого могут использоваться газовые турбины, электродвигатели или двигатели внутреннего сгорания) и центробежного нагнетателя. Задача привода состоит в том, чтобы вращать вал центробежного нагнетателя; задача центробежного нагнетателя – принудительно перемещать газ из линии низкого давления (линии всасывания) в линию высокого давления (линию нагнетания).

Характеристиками центробежных нагнетателей называют зависимости степени сжатия  $\varepsilon = p_n / p_e$ , внутренней приведённой мощности  $(N / \rho_B)_{пр}$  ( $\text{кВт} / \text{кг} / \text{м}^3$ ) и политропического к.п.д.  $\eta$  от объёмного расхода  $Q_e$  ( $\text{м}^3 / \text{мин}$ ) газа при постоянном числе  $n$  (об/мин) рабочего колеса.

При изменении производительности газопровода, либо увеличении его длины, в большинстве случаев, рассчитывают новую степень сжатия и число оборотов привода.

**Задание:** определить, как зависит степень сжатия  $\varepsilon$  центробежного нагнетателя 370-18-1 и его полезная мощность  $N$  от значений коммерческого расхода  $Q$ . Природный газ транспортируется с параметрами  $\mu$ ,  $p_{кр}$ ,  $T_{кр}$ . Известно давление  $p_B$  и температура  $T_B$  газа в линии всасывания нагнетателя. Построить графические зависимости степени сжатия  $\varepsilon$  и его полезной мощности  $N$  от значений коммерческого расхода  $Q$ .

Варианты заданий приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Варианты заданий к практической работе №8

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
молярная масса газа $\mu$ , кг/кмоль	17.95	18.82	17.20	19.62	17.95	18.82	17.20	19.62	17.95	18.82
критическое давление $p_{кр}$ , МПа	4.70	4.75	4.68	4.80	4.70	4.75	4.68	4.80	4.70	4.75
критическая температура $T_{кр}$ , К	194	195	192	198	194	195	192	198	194	195
давление в линии всасывания $p_B$ , МПа	3.8	4.2	4.0	5.0	3.8	4.5	4.4	5.0	3.8	4.4
температура в линии всасывания $T_B$ , К	288	285	281	290	288	285	281	290	288	285
показатель адиабаты $K$	1.31									
расход газа $Q$ , мил.м <sup>3</sup> /сут.	20, 22, 24, 26, 28 и 30									
рекомендованные значения приведённого расхода газа $Q_{ПР.МИН}/Q_{ПР.МАХ}$ , м <sup>3</sup> /мин	400 / 500									
унив. газовая пост. $R_0$ , Дж/кмоль·град	8314									
приведённые хар-ки	$T_{ПР} = 288\text{К}$ , $n_0 = 4800\text{об/мин}$ , $Z_{ПР} = 0,9$ , $R_{ПР} = 490\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$									

## Принятые допущения при решении задачи №8

1. Сжатие в нагнетателе адиабатическое.

## Рекомендации к решению задачи № 8

1. Определяется газовая постоянная:

$$R = \frac{R_0}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (8.1)$$

2. Определяется коэффициент сжимаемости газа  $Z$ :

$$Z = 1 - 0.4273 \cdot \bar{p} \cdot \bar{T}^{-3.668} \quad \text{или}$$
$$Z = 1 - 0.4273 \cdot \frac{p_B}{p_{KP}} \cdot \left( \frac{T_B}{T_{KP}} \right)^{-3.668} \quad (8.2)$$

3. Определяется плотность газа при  $20^\circ \text{C}$ :

$$\rho_{CT} = \frac{p_{CT}}{R \cdot T_{CT}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (8.3)$$

где:  $p_{CT} = 101300 \text{Па}$  – стационарное давление окружающей среды;  $T_{CT} = 293 \text{К}$  – температура  $20^\circ \text{C}$ .

4. Определяется плотность газа в линии всасывания:

$$\rho_B = \frac{p_B}{Z \cdot R \cdot T_B}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (8.4)$$

5. Определяется расход газа в линии всасывания:

$$Q_B = Q \cdot \frac{10^6}{24 \cdot 60} \cdot \frac{\rho_{CT}}{\rho_B}, \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}, \quad (8.5)$$

6. Определяется возможный диапазон изменения частоты оборотов нагнетателя:

$$n_{MIN} = n_0 \cdot (Q_B / Q_{ПР.MIN}), \text{ об/мин}$$
$$\text{и } n_{MAX} = n_0 \cdot (Q_B / Q_{ПР.MAX}), \text{ об/мин} \quad (8.6)$$

7. Из полученного диапазона  $n_{MIN}$  -  $n_{MAX}$  выбирается целое значение частоты вращения  $n$ , по которому определяются:

$$(Q_B)_{ПР} = Q_B \cdot \frac{n_0}{n}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8.7)$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{ПП}} = \frac{n}{n_0} \cdot \sqrt{\frac{Z_{\text{ПП}} \cdot R_{\text{ПП}} \cdot T_{\text{ПП}}}{Z \cdot R \cdot T_B}}, \quad (8.8)$$

8. Используя значения  $(Q_B)_{\text{ПП}}$  и  $(n/n_0)_{\text{ПП}}$ , по приложению 2 определяется степень сжатия нагнетателя  $\varepsilon$ . Если рассчитанного значения  $(n/n_0)_{\text{ПП}}$  нет на графике (приложение 2), то изменяется значение частоты вращения  $n$ .
9. Полезная мощность центробежного нагнетателя через параметры в линии всасывания:

$$N = \frac{K}{K-1} \cdot p_B \cdot \frac{Q_B}{60} \cdot \left( \varepsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right), \text{ Вт}, \quad (8.8)$$

10. Строятся графические зависимости степени сжатия центробежного нагнетателя  $\varepsilon$  и его полезной мощности  $N$  от значений коммерческого расхода  $Q$  (см. рисунок 8.1).
11. Формулируется вывод по задаче.

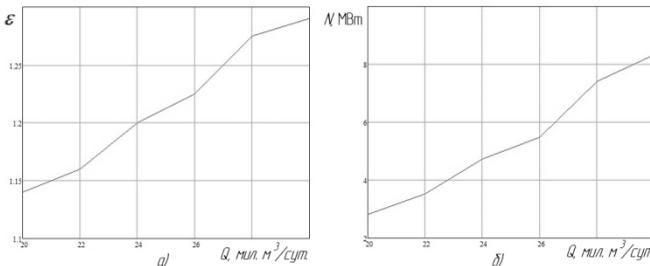


Рисунок 8.1 – Зависимости степени сжатия центробежного нагнетателя  $\varepsilon$  (а) и полезной мощности  $N$  (б) от значений коммерческого расхода  $Q$

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего применяются центробежные нагнетатели? Из чего они состоят?
2. Что такое степень сжатия газа? Как зависит степени сжатия газа от числа оборотов нагнетателя и от коммерческого расхода?

## **Практическая работа №9. Расчёт 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 прошлого века. Его исследования были выполнены на Московской водопроводной станции, а сама работа «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах» (1899) стала классической работой известной во всем мире.

**Задание:** определить, как влияют внутренний диаметр трубопровода  $d = (0.05 \dots 1.0)$  м (при  $\delta = 0.015$  м), толщина стенки  $\delta = (0.01 \dots 0.06)$  м (при  $d = 0.5$  м) и температура нефтепродукта  $\bar{T} = -40; -20; 0; +20; +40$  °С на величину изменения давления  $\Delta P$  в сечении трубопровода, которое находится перед внезапно закрывшейся задвижкой. Построить графические зависимости изменения давления  $\Delta P$  в сечении трубопровода от диаметра трубопровода  $d$ , толщины стенки  $\delta$  и температуры нефтепродукта  $\bar{T}$ . Варианты заданий приведены в таблице 9. Расчётная схема приведена на рисунке 9.1.

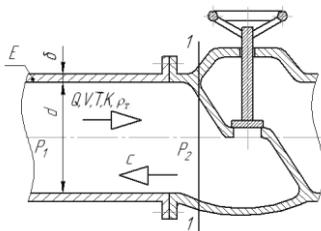


Рисунок 9.1 – Расчётная схема к решению задачи №9

Таблица 9 – Варианты заданий к практической работе №9

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
объёмный 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
объёмный 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	40X	1X18H9	Д16Т	40X	1X18H9	Д16Т	40X	1X18H9	Д16Т	40X
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									

### Принятые допущения при решении задачи №9

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

### Рекомендации к решению задачи № 9

Расчёты 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:

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (9.1)$$

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

$$\zeta = \begin{cases} 0.001225 & \text{при } 700 \leq \rho_{20} < 720 \\ 0.001183 & \text{при } 720 \leq \rho_{20} < 740 \\ 0.001118 & \text{при } 740 \leq \rho_{20} < 760 \\ 0.001054 & \text{при } 760 \leq \rho_{20} < 780 \\ 0.000995 & \text{при } 780 \leq \rho_{20} < 800 \\ 0.000937 & \text{при } 800 \leq \rho_{20} < 820 \\ 0.000882 & \text{при } 820 \leq \rho_{20} < 840 \\ 0.000831 & \text{при } 840 \leq \rho_{20} < 860 \\ 0.000782 & \text{при } 860 \leq \rho_{20} < 880 \end{cases}$$

3. Зависимость изменения плотности от температуры:

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 + \zeta(20 - \bar{T})], \text{ кг/м}^3, \quad (9.2)$$

4. Скорость  $c$  волны гидравлического удара:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho \cdot d}{\delta \cdot E}}}, \text{ м/с} , \quad (9.3)$$

5. Изменение давления  $\Delta P$  по формуле Н. Е. Жуковского в сечении 1-1:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho \cdot c \cdot V_{cp}, \text{ Па} , \quad (9.4)$$

6. Строятся графические зависимости изменения давления  $\Delta P$  в сечении трубопровода от диаметра трубопровода  $d$ , толщины стенки  $\delta$  и температуры нефтепродукта  $\bar{T}$  (см. рисунок 9.2).

7. Формулируется вывод по задаче.

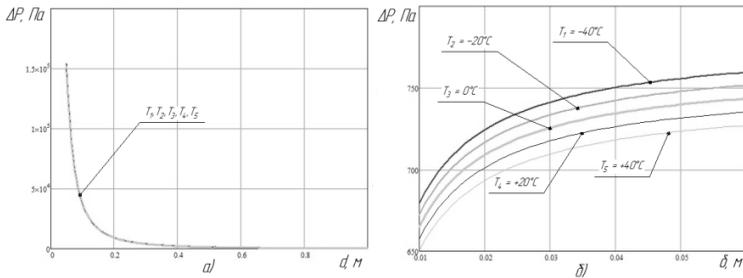


Рисунок 9.2 – Зависимости изменения давления  $\Delta P$  в трубопроводе от диаметра  $d$  трубопровода и температуры  $\bar{T}$  (а) и от толщины стенки трубопровода  $\delta$  и температуры  $\bar{T}$  (б)

Вопросы для самоконтроля

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 №10. Расчёт смеси нефтепродуктов**

В настоящее время в нашей стране и за рубежом 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. Во-первых, жидкие нефтепродукты не являются твердыми телами, 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 указанных хаотических движений отдельных частиц. Поэтому, *турбулентная диффузия*, а именно так называют этот процесс, перемешивает клин вытесняющей и вытесняемой жидкостей по сечению трубопровода, обеспечивая их более или менее однородное распределение в каждом сечении.

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

**Задание:** определить, как влияют внутренний диаметр трубопровода  $d = (0.1 \dots 1.0) \text{ м}$  и объёмный расход нефтепродуктов  $Q = 0.01; 0.1; 0.5 \text{ и } 1.0 \text{ м}^3/\text{с}$  на длину  $L_c$  и объём  $V_c$  области смеси при последовательной перекачке бензина ( $v_B$ ) и дизельного топлива ( $v_T$ ) в нефтепродуктопроводе длиной  $L$  с шероховатостью стенок  $\Delta$ . Построить графические зависимости длины и объёма области смеси в зависимости от диаметра трубопровода  $d$  и объёмного расхода смеси  $Q$ .

Варианты заданий приведены в таблице 10. Расчётная схема приведена на рисунке 10.1

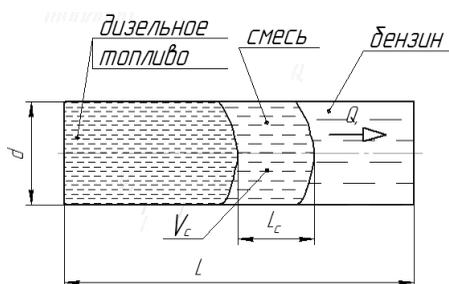


Рисунок 10.1 – Расчётная схема к решению задачи №10

### Принятые допущения при решении задачи №10

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. Объём  $V_c$  и длина  $L_c$  области смеси вычисляются к моменту времени  $t$ , когда нефтепродукты пройдут всю длину трубопровода  $L$ .

Таблица 10 – Варианты заданий к практической работе №10

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
длина трубопровода $L$ , км	700	600	800	500	600	400	800	900	500	700
кинематическая вязкость бензина $\nu_B \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup> /с	5.0	4.0	6.0	7.0	3.0	5.0	4.0	6.0	7.0	3.0
шероховатость стенок трубопровода $\Delta$ , 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									
объёмный расход нефтепродуктов $Q$ , м <sup>3</sup> /с	0.01; 0.1; 0.5 и 1.0									

## Рекомендации к решению задачи № 10

1. Определяется средняя скорость транспортировки нефтепродуктов:

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}, \quad (10.1)$$

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

$$Re_i = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu_i}, \quad (10.2)$$

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

$$\lambda_i = \begin{cases} 64/Re_i & \text{при } Re_i < 2300 \\ 0.11 \cdot \left( \frac{\Delta \cdot 10^{-3}}{d} + \frac{68}{Re_i} \right)^{0.25} & \text{при } Re_i \geq 2300 \end{cases}, \quad (10.3)$$

4. Определяется коэффициент продольного перемешивания:

$$K = 0.446 \cdot \left( \sqrt[4]{\lambda_1} + \sqrt[4]{\lambda_2} \right)^2 \cdot V_{cp} \cdot d, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad (10.4)$$

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

$$V_c = 6.58 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{K \cdot t}, \text{ м}^3 \text{ или}$$
$$V_c = 6.58 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{K \cdot \frac{L \cdot 10^3}{V_{cp}}}, \text{ м}^3, \quad (10.5)$$

где  $L$  – длина трубопровода [км].

6. Соответственно, длина  $L_c$  области смеси определится как:

$$L_c = \frac{V_c}{\pi \cdot d^2 / 4} = 6.58 \cdot \sqrt{K \cdot \frac{L \cdot 10^3}{V_{cp}}}, \text{ м}, \quad (10.6)$$

7. Строятся графические зависимости длины  $L_c$  и объёма  $V_c$  области смеси в зависимости от диаметра трубопровода  $d$  и объёмного расхода смеси  $Q$  (см. рисунок 10.2).

8. Формулируется вывод по задаче.

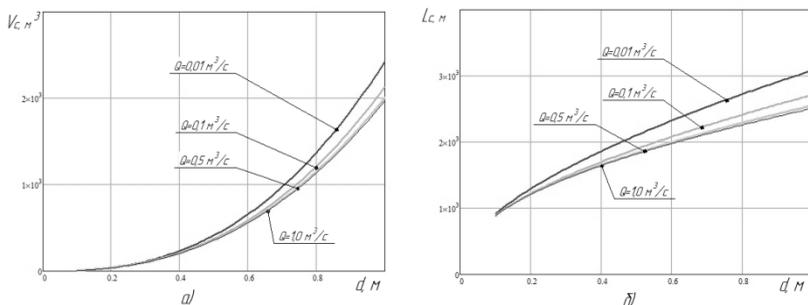


Рисунок 10.2 – Зависимости объёма (а) и длины (б) области смеси от диаметра трубопровода  $d$  и объёмного расхода смеси  $Q$

Вопросы для самоконтроля

1. Как возможно перекачивать нефтепродукты? Какой из способов перекачки нефтепродуктов наиболее распространён.
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 объём смеси?
5. Как зависит объём и длина области смеси от диаметра трубопровода и от объёмного расхода компонентов?

## Список рекомендуемой литературы

1. Лурье, М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учебное пособие / М. В. Лурье. – М. : ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2003. – 336 с.
2. Дидковская, А. С. Компьютерный практикум по трубопроводному транспорту нефти и нефтепродуктов / А. С. Дидковская М.В. Лурье. – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 126 с.

Литература находится в свободном доступе на сервере в компьютерных аудиториях кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

#### Значения констант антитурбулентной присадки

– для присадки "CDR":

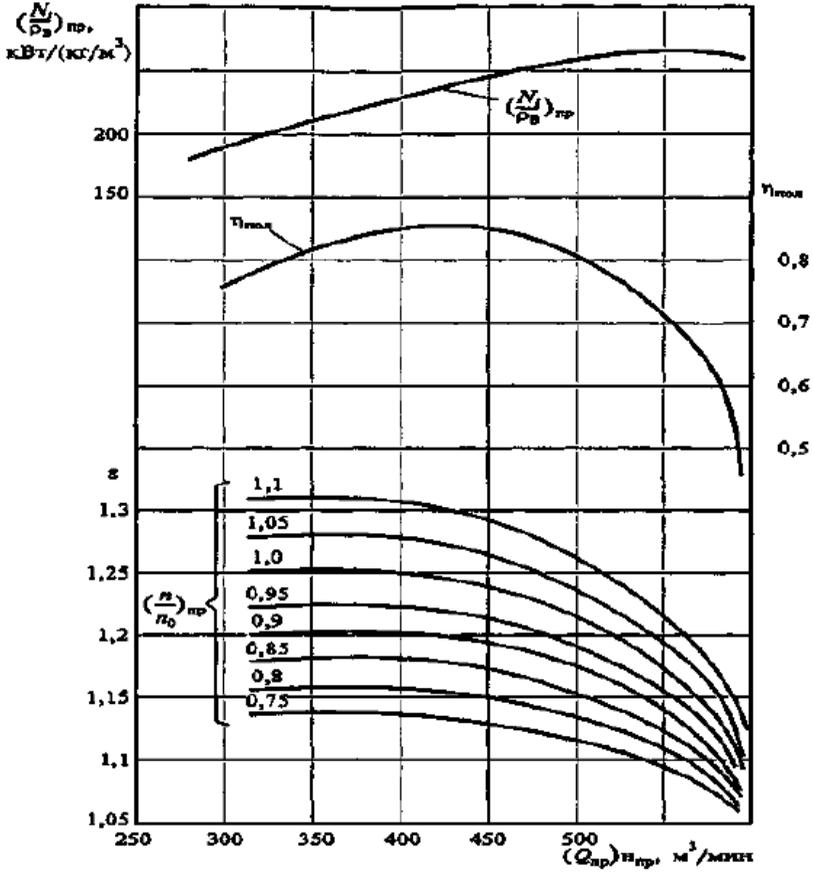
$$K(\theta)_{CDR} = \begin{cases} 61.4 & \text{при } \theta = 20\text{ppm} \\ 95.1 & \text{при } \theta = 30\text{ppm} \\ 143 & \text{при } \theta = 40\text{ppm} \\ 187 & \text{при } \theta = 50\text{ppm} \\ 249 & \text{при } \theta = 60\text{ppm} \\ 276 & \text{при } \theta = 70\text{ppm} \\ 340 & \text{при } \theta = 80\text{ppm} \\ 380 & \text{при } \theta = 90\text{ppm} \end{cases}$$

– для присадки "Neccad-547":

$$K(\theta)_N = \begin{cases} 50 & \text{при } \theta = 40\text{ppm} \\ 75 & \text{при } \theta = 60\text{ppm} \\ 150 & \text{при } \theta = 100\text{ppm} \\ 340 & \text{при } \theta = 180\text{ppm} \end{cases}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Приведённые характеристики нагнетателя 370-18-1 при  
 $T_{\text{пр}} = 288\text{К}$ ,  $n_0 = 4800\text{об/мин}$ ,  $Z_{\text{пр}} = 0,9$ ,  $R_{\text{пр}} = 490\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$



# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Структура отчёта

### 1. Титульный лист

Министерство образования и науки РФ  
ФГОУ ВПО "Удмуртский государственный университет"  
Институт нефти и газа им. М.С. Гущериева  
Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

Отчёт по практической работе №6

по дисциплине «Математические модели в нефтегазовом комплексе»

вариант № 5

Проверил:  
к.т.н., доцент

С.С. Макаров

Выполнил:  
студент, гр. ОБ-131012-11

И.И. Иванов

Ижевск 2014

### 2. Условие задания и исходные данные

**Задание:** определить, как влияют внутренний диаметр  $d$  и угол наклона  $\alpha = 1, 2, 5$  и  $10^\circ$  трубопровода к горизонту на степень заполнения трубы нефтью, протекающей в самотёчном режиме с расходом  $Q$  и кинематической вязкостью  $\nu$ . Построить графические зависимости доли заполнения трубопровода  $\sigma$  от его диаметра  $d$  и угла наклона к горизонту  $\alpha$ .

#### Исходные данные

Объёмный расход нефтепродукта	$Q = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$
Кинематическая вязкость нефтепродукта	$\nu = 8.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Угол наклона профиля трубы к горизонту	$\alpha = 1, 2, 5, 10, \text{ град}$
Внутренний диаметр трубопровода	$d = 0, 2 \dots 1.0 \text{ м}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$

### 3. Принятые допущения для решения задачи

#### Принятые допущения при решении задачи

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

4. Рисунки и расчётные схемы к задаче (если они нужны) оформленные по ГОСТ 2.105 - 95.

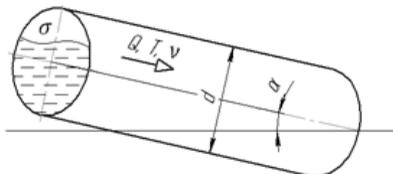


Рисунок 1 – Расчётная схема к решению задачи №6

5. Расчётная часть (с необходимыми графиками по результатам расчёта оформленными по ГОСТ 2.105 - 95)

1. Определяется средняя скорость потока:

$$V(d) := \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (d)^2} \quad V(0.5) = 1.528 \text{ м/с}$$

6. Доля заполнения трубопровода нефтью на данном участке:

$$\sigma(d,j) := \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma(d,j) > 1 \\ \left[ 1 - 2.98 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda(d)}} \cdot (1 - \sqrt{\gamma(d,j)}) \right] & \text{if } 32.32 \cdot \lambda(d) \leq \gamma(d,j) < 1 \\ \left( 9.39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma(d,j)}{\lambda(d)}} + 0.113 \right) & \text{if } 4.87 \cdot \lambda(d) \leq \gamma(d,j) < 32.32 \cdot \lambda(d) \\ \left[ 0.1825 \cdot \left( \frac{2 \cdot \gamma(d,j)}{\lambda(d)} \right)^{0.356} \right] & \text{if } \gamma(d,j) < 4.87 \cdot \lambda(d) \end{cases}$$

$$\sigma(0.5, 2) \cdot 100 = 33.353 \%$$

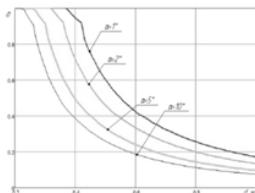


Рисунок 2 – Зависимости степени заполнения трубопровода  $\sigma$  от его диаметра  $d$  и угла наклона к горизонту  $\alpha$

## 5. Вывод по задаче

### Вывод

В ходе практической работы №6 установлено, что чем больше диаметр трубопровода, тем меньше доля заполнения трубопровода  $\sigma$ , при фиксированном значении объёмного  $Q$ . Аналогичным образом доля заполнения трубопровода  $\sigma$ , зависит от угла наклона. При изменении угла наклона на 10 град. для диаметра трубопровода  $d = 0,6$  м степень заполнения  $\sigma$  уменьшилась на 20%. Для транспортировки нефтепродуктов наиболее предпочтительно использовать трубы с внутренними диаметрами меньше 0,38 м при значении объёмного расхода  $Q = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$  и угле наклона трубопровода к горизонту от 1 до 10 град, так как при данных условиях в них не будет самотёчных участков.

*Учебное издание*

**Сергей Сергеевич Макаров**

**Константин Эдуардович Чекмышев**

**Методические указания  
к выполнению практических работ  
по дисциплине «Математические модели в  
нефтегазовом комплексе»**

*Авторская редакция*

Подписано в печать 26.12.2014. Формат 60×48 $\frac{1}{6}$ .

Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л.1,4.

Тираж 30 экз. Заказ № 0000.

Изд-во «Удмуртский университет»  
42603, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 4, каб. 207  
Тел. (3412) 500-295