

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2020

УДК 532
ББК 30.123
М55

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»
«07» сентября 2020 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук, доц. С. Н. Хатетовский

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены
для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование ма-
шиностроительного производства» дневной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Ответственный за выпуск	С. Н. Хатетовский
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 32 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

Практическое занятие № 1. Введение в механику жидкости и газа	4
Практическое занятие № 2. Свойства жидкостей и газов.....	4
Практическое занятие № 3. Гидростатическое давление	6
Практическое занятие № 4. Сила давления на плоскую и криволинейную стенки.....	7
Практическое занятие № 5. Средняя скорость. Расход. Уравнение неразрывности движения (расхода)	9
Практическое занятие № 6. Уравнение Бернулли	10
Практическое занятие № 7. Режимы течения жидкости.....	13
Практическое занятие № 8. Гидравлические сопротивления.....	13
Практическое занятие № 9. Истечение жидкости через отверстия и насадки.....	15
Практическое занятие № 10. Простой и сложный трубопроводы	17
Практическое занятие № 11. Взаимодействие потока со стенками.....	20
Практическое занятие № 12. Компьютерное моделирование течения жидкости по цилиндрической трубе	22
Практическое занятие № 13. Компьютерное моделирование течения жидкости по трубе переменного сечения	25
Практическое занятие № 14. Компьютерное моделирование турбулентного течения жидкости.....	25
Список литературы	29

Практическое занятие № 1. Введение в механику жидкости и газа

Рассмотреть теоретические вопросы: несжимаемая жидкость; идеальный газ; внешние и внутренние силы; объемные и поверхностные силы; напряженное состояние жидкости.

Контрольные вопросы

- 1 Что является основной физической характеристикой несжимаемой жидкости?
- 2 Дайте определение идеального газа. Свойства идеального газа.
- 3 Чему равна равнодействующая всех внутренних сил?
- 4 В чем отличие поверхностных сил от объемных?

Практическое занятие № 2. Свойства жидкостей и газов

Здесь и далее использованы материалы из [1–7].

Задача 1. Определить плотность жидкости, полученной смешиванием 10 л жидкости плотностью $\rho_1 = 900 \text{ кг/м}^3$ и 20 л жидкости плотностью $\rho_2 = 870 \text{ кг/м}^3$.

Решение

Плотность смеси находим путем деления ее массы на объем:

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2}{V_1 + V_2}, \quad (1)$$

где V_1 – объем первой жидкости;
 V_2 – объем второй жидкости.

$$\rho = \frac{900 \cdot 0,01 + 870 \cdot 0,02}{0,01 + 0,02} = 880 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 2. Определить повышение давления, при котором начальный объем воды уменьшится на 1 %.

Решение

Повышение давления находим из формулы

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\beta_p}, \quad (2)$$

где $\beta_p = 4,85 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ – коэффициент объемного сжатия для воды;
 $\Delta V/V_0 = 0,01$ (по условию задачи).

Откуда

$$\Delta p = 0,01 \cdot \frac{1}{4,85 \cdot 10^{-10}} = 2,06 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Решить следующие задачи.

Задача 3. Стальной трубопровод длиной $l = 300$ м и диаметром $D = 500$ мм испытывается на прочность гидравлическим способом. Определить объем воды, который необходимо дополнительно подать в трубопровод за время испытания для подъема давления от $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 5$ МПа. Расширение трубопровода не учитывать. Объемный модуль упругости воды $E = 2060$ МПа.

Задача 4. Определить, насколько уменьшится давление масла в закрытом объеме ($V_0 = 150$ л) гидропривода, если утечки масла составили $\Delta V = 0,5$ л, а коэффициент объемного сжатия жидкости $\beta_p = 7,5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. Деформацией элементов объемного гидропривода, в которых находится указанный объем масла, пренебречь.

Задача 5. Высота цилиндрического вертикального резервуара $h = 10$ м, его диаметр $D = 3$ м. Определить массу мазута ($\rho_0 = 920 \text{ кг/м}^3$), которую можно налить в резервуар при 15 °С, если его температура может подняться до 40 °С. Расширением стенок резервуара пренебречь, температурный коэффициент объемного расширения жидкости $\beta_t = 0,0008 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Задача 6. Кольцевая щель между двумя цилиндрами ($D = 210$ мм, $d = 202$ мм) залита трансформаторным маслом ($\rho = 910 \text{ кг/м}^3$) при температуре 20 °С. Внутренний цилиндр равномерно вращается с частотой $n = 120 \text{ мин}^{-1}$. Определить динамическую и кинематическую вязкость масла, если момент, приложенный к внутреннему цилиндру, $M = 0,065 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а высота столба жидкости в щели между цилиндрами $h = 120$ мм. Трением основания цилиндра о жидкость пренебречь.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое жидкость?
- 2 Дайте определение сжимаемости жидкости.
- 3 Формула плотности однородной жидкости.
- 4 Определение вязкости.

Практическое занятие № 3. Гидростатическое давление

Задача 7. В сообщающиеся сосуды налиты вода ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) и бензин. Определить плотность бензина, если высота столба воды $h = 150 \text{ мм}$, а разность уровней жидкости в сосудах $a = 60 \text{ мм}$.

Решение

Во всех точках горизонтальной плоскости, проходящей в однородной жидкости, гидростатическое давление одинаково. Следовательно,

$$p_a + \rho \cdot g \cdot h = p_a + \rho_1 \cdot g \cdot (h + a), \quad (3)$$

где ρ_1 – плотность бензина.

Откуда

$$\rho_1 = \rho \cdot \frac{h}{h + a} = 1000 \cdot \frac{150}{150 + 60} = 714 \text{ кг/м}^3. \quad (4)$$

Решить следующие задачи.

Задача 8. Манометр, подключенный к закрытому резервуару с нефтью ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$), показывает избыточное давление $p_{\text{ман}} = 36 \text{ кПа}$. Определить абсолютное давление воздуха на поверхности жидкости p_0 и положение пьезометрической плоскости, если уровень нефти в резервуаре $H = 3,06 \text{ м}$, а расстояние от точки подключения до центра манометра $z = 1,02 \text{ м}$ (рисунок 1), атмосферное давление $p_a = 100 \text{ кПа}$.

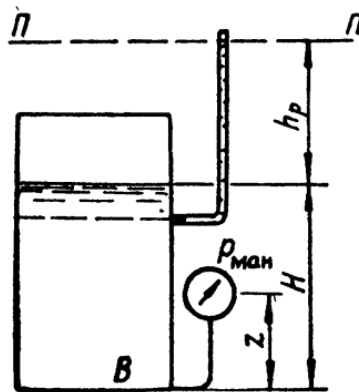


Рисунок 1 – К задаче 8

Задача 9. Поршень пружинного гидроаккумулятора диаметром $D = 250 \text{ мм}$ во время зарядки поднялся вверх на высоту $x = 14 \text{ см}$ (рисунок 2). Определить жесткость пружины c , если давление жидкости $p = 1,0 \text{ МПа}$. Трением между поршнем и цилиндром и весом поршня пренебречь.

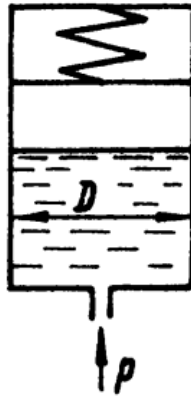


Рисунок 2 – К задаче 9

Задача 10. Определить давление масла p_1 , подводимого в поршневую полость гидроцилиндра, если избыточное давление в штоковой полости $p_2 = 80$ кПа (рисунок 3). Усилие на штоке $R = 10$ кН, сила трения поршня о цилиндр $F = 0,4$ кН, диаметр поршня $D = 125$ мм, диаметр штока $d = 70$ мм.

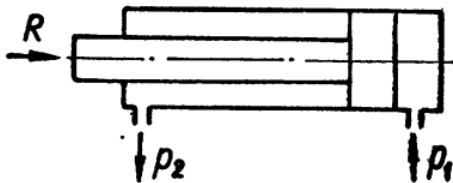


Рисунок 3 – К задаче 10

Контрольные вопросы

- 1 Что такое гидростатическое давление?
- 2 Основное уравнение гидростатики.
- 3 Что такое вакуум?
- 4 В каких единицах измеряется давление?

Практическое занятие № 4. Сила давления на плоскую и криволинейную стенки

Задача 11. Определить величину силы давления на крышку, перекрывающую круглое отверстие диаметром $d = 500$ мм в вертикальной перегородке закрытого резервуара, если левый отсек резервуара заполнен нефтью ($\rho = 900$ кг/м³), правый – воздухом. Избыточное давление на поверхности жидкости $p_{\text{ман}} = 15$ кПа, показание ртутного мановакуумметра, подключенного к правому отсеку резервуара, $h = 80$ мм, центр отверстия расположен на глубине $H = 0,8$ м (рисунок 4), атмосферное давление $p_a = 100$ кПа.

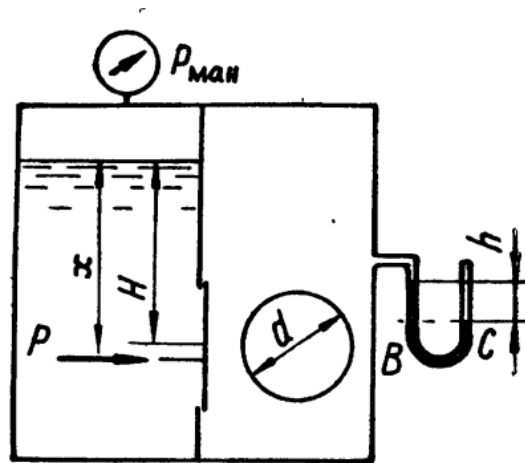


Рисунок 4 – К задаче 11

Решение

Находим давление воздуха в правом отсеке резервуара $p_{\text{п}}$. Поскольку давления в точках B и C , принадлежащих горизонтальной плоскости, одинаковы и равны атмосферному давлению (100 кПа), то абсолютное давление воздуха в правом отсеке

$$p_{\text{п}} = p_a - \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h = 100000 - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,08 = 89300 \text{ Па.} \quad (5)$$

Сила давления воздуха на крышку справа

$$P_{\text{п}} = p_{\text{п}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 89300 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 17500 \text{ Н.} \quad (6)$$

Эта сила приложена в центре тяжести крышки. Абсолютное давление воздуха на поверхности жидкости в левом отсеке

$$p_{\text{л}} = p_a + p_{\text{ман}} = 100000 + 15000 = 115000 \text{ Па.} \quad (7)$$

Сила давления воздуха на крышку слева

$$P_{\text{л}} = p_{\text{л}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 115000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 22600 \text{ Н.} \quad (8)$$

Эта сила приложена в центре тяжести крышки. Сила давления жидкости на стенку

$$P_{\text{ж}} = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot S = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 900 \cdot 9,81 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 1380 \text{ Н.} \quad (9)$$

Решить следующие задачи.

Задача 12. Определить силу давления жидкости на закругление (рисунок 5), а также отрывающее и сдвигающее усилия, которые возникают на стыках закругления с прямолинейными участками трубопровода, если диаметр трубы $d = 250$ мм, угол поворота $\alpha = 60^\circ$, избыточное давление жидкости $p = 0,5$ МПа. Весом жидкости пренебречь.

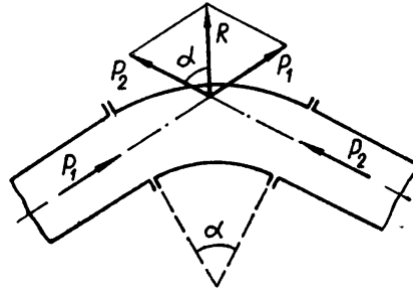


Рисунок 5 – К задаче 12

Задача 13. Найти минимальную толщину стенок стальной трубы диаметром $d = 25$ мм, если давление жидкости $p = 10$ МПа, а допускаемое напряжение на растяжение для стали $[\sigma] = 150$ МПа. Весом жидкости пренебречь.

Задача 14. Определить величину предварительной деформации пружины, прижимающей шарик к седлу предохранительного клапана диаметром $d = 25$ мм, если он открылся при давлении $p_1 = 2,5$ МПа. Давление после клапана $p_2 = 0,35$ МПа, жесткость пружины $c = 150$ Н/мм. Весом шарика и пружины пренебречь.

Контрольные вопросы

- 1 По какой формуле определяется избыточная сила на плоскую стенку?
- 2 Сила гидростатического давления на криволинейную поверхность.
- 3 Сила для цилиндрической криволинейной поверхности.

Практическое занятие № 5. Средняя скорость. Расход. Уравнение неразрывности движения (расхода)

Рассмотреть теоретические вопросы: уравнение неразрывности.

Задача 15. Определить расход, среднюю и максимальную скорости в поперечном сечении трубопровода диаметром $d = 250$ мм, если распределение местных скоростей по сечению описывается уравнением $u = 50(r_0^2 - r^2)$, где $r_0 = 0,5d$ – внутренний радиус трубы; r – расстояние, м, от оси трубы до точки, в которой вычисляется скорость u .

Решение

Элементарную площадку выберем в виде кольца радиусом r и шириной dr (скорости во всех ее точках одинаковы):

$$dS = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr. \quad (10)$$

Расход жидкости

$$Q = \int_S u dS = \int_0^{d/2} 50 \cdot \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 - r^2 \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r dr = 19,2 \text{ л/с}. \quad (11)$$

Средняя скорость

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,0192}{3,14 \cdot 0,25^2} = 0,39 \text{ м/с}. \quad (12)$$

Максимальная скорость на оси трубы ($r = 0$)

$$u_{\max} = 50 \cdot r_0^2 = 50 \cdot \left(\frac{0,25}{2} \right)^2 = 0,78 \text{ м/с}. \quad (13)$$

Задача 16. Подача шестеренного насоса объемного гидропривода $Q = 80$ л/мин. Подобрать диаметры всасывающей, напорной и сливной гидролиний, принимая следующие расчетные скорости: для всасывающей гидролинии $v_{\text{вс}} = 0,6 \dots 1,4$ м/с; для напорной – $v_{\text{н}} = 3,0 \dots 5,0$; для сливной – $v_{\text{с}} = 1,4 \dots 2,0$ м/с.

Контрольные вопросы

- 1 Формула для определения средней скорости.
- 2 Уравнение неразрывности.
- 3 Как связаны средние скорости и площади живых сечений?

Практическое занятие № 6. Уравнение Бернулли

Задача 17. По горизонтальной трубе диаметром d_1 , имеющей сужение $d_2 = 40$ мм, движется вода (расход $Q = 6$ л/с). Определить абсолютное давление в узком сечении, если уровень воды в открытом пьезометре перед сужением $h_1 = 1,5$ м (рисунок 6). При каком расходе воды ртуть в трубке, присоединенной к трубопроводу в узком сечении, поднимется на высоту $h = 10$ см, если при этом $h_1 = 1,2$ м? Потерями напора пренебречь.

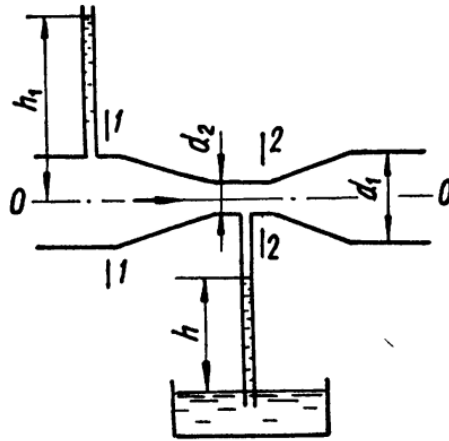


Рисунок 6 – К задаче 17

Решение

Из уравнения Бернулли для сечений 1–1 и 2–2 относительно плоскости сечения $O-O$

$$\frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2, \quad (14)$$

где $z_1 = z_2 = 0$;

$$p_1 = p_a + \rho \cdot g \cdot h_1; \quad (15)$$

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_1^2}; \quad (16)$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_2^2}, \quad (17)$$

находим давление в узком сечении:

$$p_2 = p_a + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right) = 104 \text{ кПа}. \quad (18)$$

Если ртуть в трубке, присоединенной к трубопроводу в узком сечении, поднимется на высоту $h = 10$ см, то абсолютное давление в узком сечении трубопровода

$$p_2 = p_a - \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h. \quad (19)$$

Подставляя это значение в левую часть предыдущего уравнения, выражаем и вычисляем Q .

Решить следующие задачи.

Задача 18. Выходное сечение жиклера карбюратора (рисунок 7) расположено выше уровня бензина в поплавковой камере на $\Delta h = 5$ мм, вакуум в диффузоре $p_{\text{вак}} = 12$ кПа. Пренебрегая потерями напора, найти расход бензина Q , если диаметр жиклера $d = 1$ мм. Плотность бензина $\rho = 680$ кг/м³.

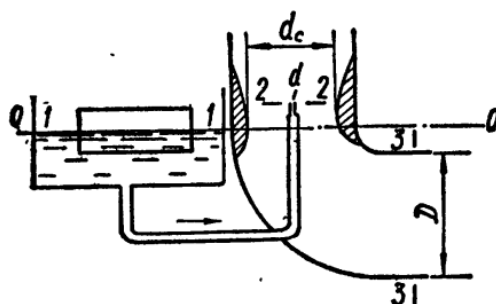


Рисунок 7 – К задаче 18

Задача 19. Определить расход бензина ($\rho = 700$ кг/м³), подаваемого по горизонтальной трубе диаметром $D = 25$ мм, в которой установлены сопло диаметром $d = 10$ мм и дифференциальный ртутный манометр, показания которого $h = 100$ мм. Потерями напора пренебречь (рисунок 8).

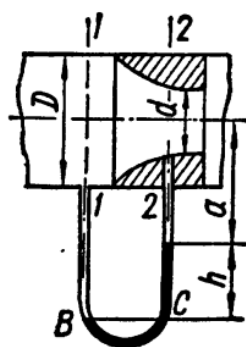


Рисунок 8 – К задаче 19

Контрольные вопросы

- 1 Что такое гидравлический и пьезометрический уклоны?
- 2 Слагаемые уравнения Бернулли с геометрической точки зрения.
- 3 Что представляет собой сумма высот в уравнении Бернулли?

Практическое занятие № 7. Режимы течения жидкости

Рассмотреть теоретические вопросы: режимы течения жидкости.

Задача 20. Индустриальное масло ИС-30, температура которого $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, поступает от насоса в гидроцилиндр по трубопроводу $d = 22\text{ мм}$. Определить режим течения масла, если подача насоса $Q = 105\text{ л/мин}$.

Решение

Скорость течения масла в трубе

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 105 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 2,2^2 \cdot 60} = 461\text{ см/с.} \quad (20)$$

При $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ кинематическая вязкость масла $\nu = 150\text{ мм}^2/\text{с}$.
Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{461 \cdot 2,2}{1,5} = 676 < 2300. \quad (21)$$

Следовательно, режим движения ламинарный. При переходе ламинарного режима на турбулентный число Рейнольдса равно критическому. Отсюда находим кинематическую вязкость:

$$\nu = \frac{v \cdot d}{2300} = \frac{461 \cdot 2,2}{2300} = 0,44\text{ мм}^2/\text{с}. \quad (22)$$

Контрольные вопросы

- 1 Назовите режимы течения жидкости.
- 2 Что является критерием для определения режима движения жидкости?

Практическое занятие № 8. Гидравлические сопротивления

Задача 21. При прокачке бензина ($\rho = 700\text{ кг/м}^3$) по трубе длиной $l = 5,5\text{ м}$ и диаметром $d = 15\text{ мм}$ падение давления в трубопроводе $\Delta p = 0,11\text{ МПа}$. Принимая закон сопротивления квадратичным, определить эквивалентную шероховатость трубы, если расход $Q = 0,9\text{ л/с}$.

Решение

Скорость движения жидкости

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 900}{3,14 \cdot 1,5^2} = 5,1 \text{ м/с.} \quad (23)$$

Находим коэффициент гидравлического трения:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d}{\rho \cdot l \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 110000}{700 \cdot 5,5 \cdot 5,1^2} = 0,033 \text{ м/с.} \quad (24)$$

Эквивалентная шероховатость

$$\Delta = d \cdot \left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 = 15 \cdot \left(\frac{0,033}{0,11} \right)^4 = 0,12 \text{ м/с.} \quad (25)$$

Решить следующие задачи.

Задача 22. По трубопроводу диаметром $d = 12$ мм перекачивается масло индустриальное ИС-20 ($\rho = 890 \text{ кг/м}^3$) с температурой $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить показание h ртутного дифференциального манометра, присоединенного к трубопроводу в двух точках, удаленных друг от друга на расстояние $l = 3$ м, если расход масла $Q = 0,3 \text{ л/с}$ (рисунок 9).

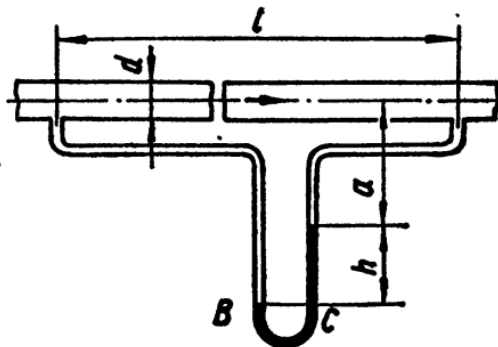


Рисунок 9 – К задаче 22

Задача 23. Определить утечку рабочей жидкости (масло МГ-30) через радиальный зазор 80 мкм между цилиндром и неподвижным поршнем, если давление с одной стороны поршня $p_1 = 4 \text{ МПа}$, с другой – $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$, ширина поршня $l = 40 \text{ мм}$, диаметр поршня $D = 60 \text{ мм}$, температура жидкости $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 24. Рабочая жидкость – масло ИС-20 (температура $50 \text{ }^\circ\text{C}$) подводится в поршневую полость гидроцилиндра (рисунок 10). Определить давление p_1 и расход масла Q , при котором скорость перемещения $v_n = 2 \text{ см/с}$, если утечка рабочей жидкости через кольцевой зазор $\delta = 60 \text{ мкм}$ между цилиндром и

поршнем $q = 5 \text{ см}^3/\text{с}$, диаметр поршня $D = 100 \text{ мм}$, ширина поршня $l = 70 \text{ мм}$, $p_2 = 80 \text{ кПа}$. Чему будет равно усилие на штоке R , если диаметр штока $d = 50 \text{ мм}$? Трением в гидроцилиндре пренебречь.

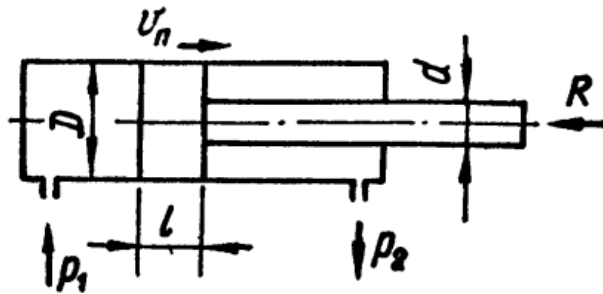


Рисунок 10 – К задаче 24

Контрольные вопросы

- 1 Назовите виды потерь напора.
- 2 Как зависят потери напора на трение от длины трубопровода?
- 3 Как зависят потери напора на трение от диаметра трубопровода?
- 4 Как определяется коэффициент Дарси для ламинарного режима движения в круглой трубе?
- 5 Области гидравлических сопротивлений.

Практическое занятие № 9. Истечение жидкости через отверстия и насадки

Задача 25. Вода под постоянным напором $H = 2,0 \text{ м}$ вытекает в атмосферу через внешний цилиндрический насадок диаметром $d = 10 \text{ мм}$ (рисунок 11). Принимая коэффициент сжатия струи в насадке равным $\epsilon = 0,63$, коэффициент сопротивления входа в насадок $\zeta_{\text{вх}} = 0,06$ (отнесен к скорости в сжатом сечении), определить расход воды.

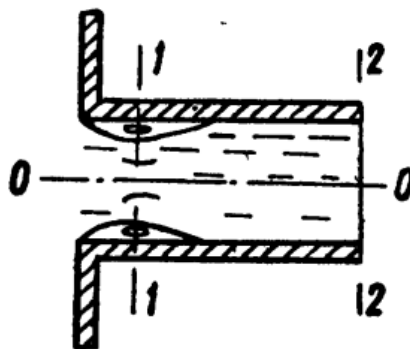


Рисунок 11 – К задаче 25

Решение

Из уравнения Бернулли, записанного для сечения, совпадающего со свободной поверхностью воды в баке, и сечения 2–2 получаем

$$H = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_{\pi}. \quad (26)$$

Потери напора включают потери на вход и потери на внезапное расширение

$$h_{\pi} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\zeta_{\text{вх}} \cdot \frac{1}{\varepsilon^2} + \zeta_{\text{вр}} \right), \quad (27)$$

где

$$\zeta_{\text{вр}} = \left(\frac{S_2}{S_c} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{0,63} - 1 \right)^2 = 0,345. \quad (28)$$

Скорость истечения

$$v_2 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (29)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\zeta_{\text{вх}}}{\varepsilon^2} + \zeta_{\text{вр}}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{0,06}{0,63^2} + 0,345}} = 0,818. \quad (30)$$

Следовательно, скорость истечения

$$v_2 = 0,818 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 5,12. \quad (31)$$

Расход воды через насадок

$$Q = v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 512 \cdot \frac{3,14 \cdot 1}{4} = 402 \text{ см}^3/\text{с}. \quad (32)$$

Решить следующие задачи.

Задача 26. Сопоставить расходы жидкости и потери напора при истечении через малое отверстие в тонкой стенке ($\mu_0 = 0,62$, $\varphi_0 = 0,97$), внешний цилиндрический насадок ($\mu_1 = \varphi_1 = 0,82$), конический сходящийся насадок

($\mu_2 = \varphi_2 = 0,95$) и конoidalный насадок ($\mu_3 = \varphi_3 = 0,97$). Напоры H и диаметры выходных сечений во всех случаях одинаковы.

Задача 27. Масло через дроссель диаметром $d_0 = 1,5$ мм подводится в поршневую полость гидроцилиндра (рисунок 12). Давление перед дросселем $p = 12,5$ МПа, давление на сливе $p_2 = 200$ кПа, усилие на штоке $R = 20$ кН. Диаметр поршня $D = 80$ мм, диаметр штока $d = 50$ мм. Определить скорость перемещения поршня, если коэффициент расхода дросселя $\mu = 0,62$, плотность рабочей жидкости $\rho = 895$ кг/м³. Весом поршня и штока, трением в гидроцилиндре и утечками жидкости пренебречь. Движение поршня считать равномерным. Каким должен быть диаметр дросселя d_{01} , чтобы скорость перемещения поршня стала $v_1 = 5$ см/с?

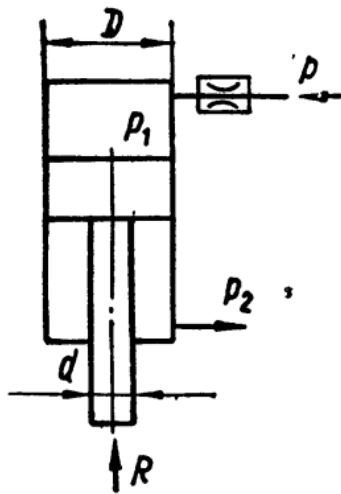


Рисунок 12 – К задаче 27

Контрольные вопросы

- 1 Формула для определения коэффициента сжатия.
- 2 Что собой представляют насадки? Виды насадок.
- 3 Что такое инверсия струи?

Практическое занятие № 10. Простой и сложный трубопроводы

Задача 28. Всасывающий трубопровод насоса имеет длину $l = 5$ м и диаметр $d = 32$ мм, высота всасывания $h = 0,8$ м (рисунок 9). Определить давление в конце трубопровода (перед насосом), если расход масла ($\rho = 890$ кг/м³, $v = 10$ мм²/с), $Q = 50$ л/мин, коэффициент сопротивления колена $\zeta_k = 0,3$, вентиля $\zeta_v = 4,5$, фильтра $\zeta_f = 10$.

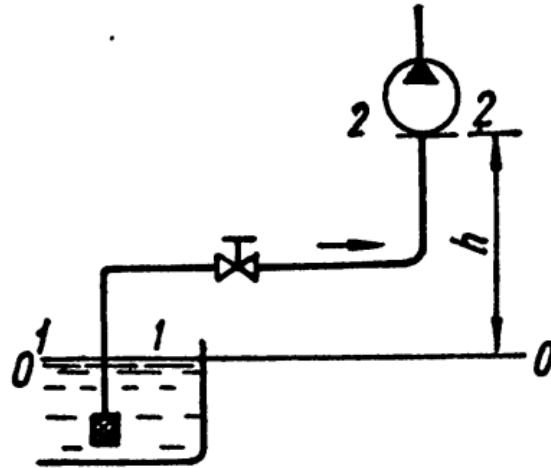


Рисунок 13 – К задаче 28

Решение

Определяем скорость, число Рейнольдса и коэффициент гидравлического трения по длине при расходе $Q = 833 \text{ см}^3/\text{с}$:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 833}{3,14 \cdot 3,2^2} = 104 \text{ см/с}; \quad (33)$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{104 \cdot 3,2}{0,1} = 3330; \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} = \frac{0,3164}{3330^{0,25}} = 0,042. \quad (35)$$

Сумма коэффициентов местных сопротивлений

$$\sum \zeta = \zeta_{\phi} + 2 \cdot \zeta_{\kappa} + \zeta_{\text{в}} = 10 + 2 \cdot 0,3 + 4,5 = 15,1. \quad (36)$$

Потери напора во всасывающем трубопроводе

$$h_{\text{п}} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 1,2 \text{ м}. \quad (37)$$

Принимая во внимание, что $v_1 = 0$, $p_1 = p_a = 10^5 \text{ Па}$, $z_1 = 0$, $v_2 = 1,04 \text{ м/с}$, $z_2 = h$, $h_{\text{п}} = 1,2 \text{ м}$, $\alpha = 1$, из уравнения Бернулли находим давление перед насосом:

$$p_2 = p_a - \rho \cdot g \cdot (h + h_{\text{п}}) - \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 = 82000 \text{ Па.} \quad (38)$$

Решить следующие задачи.

Задача 29. Определить диаметр напорной гидролинии объемного гидропривода (рисунок 14), по которой масло подается насосом 3 через обратный гидроклапан 4 и гидрораспределитель 5 в гидроцилиндр 6, если общая длина гидролинии $l = 7,3$ м, потеря давления в ней $\Delta p = 0,1$ МПа, подача насоса $Q = 94$ л/мин. Рабочая жидкость имеет плотность $\rho = 880$ кг/м³, кинематическую вязкость $\nu = 10$ мм²/с. В расчетах учесть коэффициенты местных сопротивлений: обратного гидроклапана ($\zeta_{\text{кл}} = 2$), колена ($\zeta_{\text{к}} = 0,33$), гидрораспределителя ($\zeta_{\text{р}} = 2,5$). Вертикальным расстоянием между насосом 3 и гидроцилиндром 6 пренебречь. Трубы – гладкие.

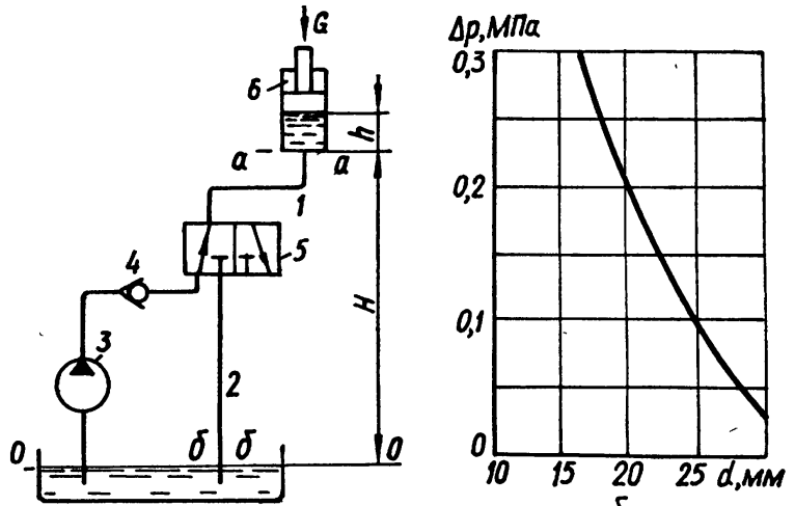


Рисунок 14 – К задаче 29

Задача 30. Насос перекачивает нефть ($\rho = 900$ кг/м³, $\nu = 140$ мм²/с) по трубопроводу длиной $l = 3700$ м и диаметром $d = 100$ мм. Какое давление p_1 должен создавать насос в начале трубопровода, если его конечное сечение расположено выше начального на величину $h = 37$ м, давление на выходе атмосферное, а подача насоса $Q = 36$ м³/ч? Определить длину последовательно включенной вставки диаметром $D = 150$ мм, при которой в трубопроводе сохранится тот же расход нефти, если давление в начале трубопровода станет равным 2,0 МПа. Потерями напора в местных сопротивлениях пренебречь.

Задача 31. Произвести проверку на прочность стальной трубы диаметром $d = 200$ мм, в которой возможен прямой гидравлический удар. Толщина стенок трубы $\delta = 4$ мм, допускаемое напряжение на растяжение $[\sigma] = 140$ МПа, скорость движения воды $v_0 = 5$ м/с, давление до удара $p_0 = 0,25$ МПа.

Контрольные вопросы

- 1 Определение простого трубопровода.
- 2 Определение сложного трубопровода.
- 3 Транзитный и путевой расход жидкости.
- 4 Как делятся трубопроводы в зависимости от характера сопротивлений?

Практическое занятие № 11. Взаимодействие потока со стенками

Задача 32. По трубе диаметром $d = 50$ мм вода движется со скоростью $v = 3$ м/с. Определить силу, с которой жидкость действует на колено (рисунок 15), если избыточное давление перед ним $p_1 = 10$ кПа, а коэффициент сопротивления $\zeta = 1,3$. Весом жидкости пренебречь.

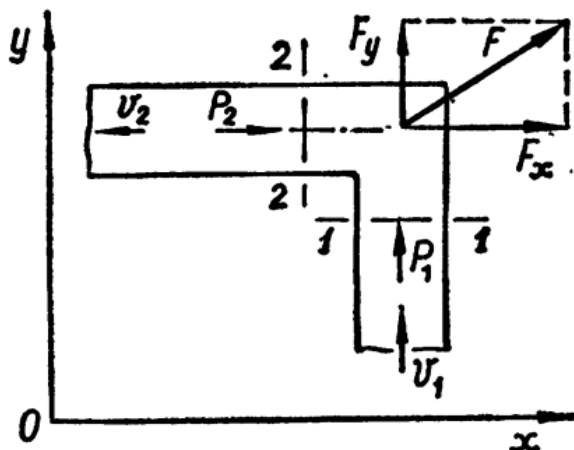


Рисунок 15 – К задаче 32

Решение

Из уравнения Бернулли для сечений 1–1 и 2–2 при $v_1 = v_2 = v$, $z_1 = z_2$ находим избыточное давление после колена:

$$p_2 = p_1 - \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 10000 - 1,3 \cdot \frac{1000 \cdot 3^2}{2} = 4150 \text{ Па.} \quad (39)$$

Полная сила, с которой жидкость действует на колено,

$$\vec{F} = \rho \cdot Q \cdot (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) + \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{G}, \quad (40)$$

где расход воды

$$Q = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 3 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 0,0059 \text{ м}^3/\text{с}^2, \quad (41)$$

а силы давления

$$P_1 = p_1 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 10000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 19,6 \text{ Н}; \quad (42)$$

$$P_2 = p_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4150 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 8,14 \text{ Н}. \quad (43)$$

Весом G жидкости пренебрегаем.

Проецируя векторное равенство на координатные оси, находим составляющие искомой силы:

$$F_x = P_2 + \rho \cdot Q \cdot v_2 = 8,14 + 1000 \cdot 0,0059 \cdot 3 = 25,8 \text{ Н}; \quad (44)$$

$$F_y = P_1 + \rho \cdot Q \cdot v_1 = 19,6 + 1000 \cdot 0,0059 \cdot 3 = 37,3 \text{ Н}. \quad (45)$$

Решить следующие задачи.

Задача 33. Определить осевую силу, приложенную к трубопроводу на участке постепенного сужения ($D_1 = 100$ мм, $D_2 = 50$ мм), если избыточное давление перед сужением $p_1 = 120$ кПа, расход воды $Q = 15$ л/с, а коэффициент сопротивления сужающегося участка $\zeta = 0,4$ (рисунок 16).

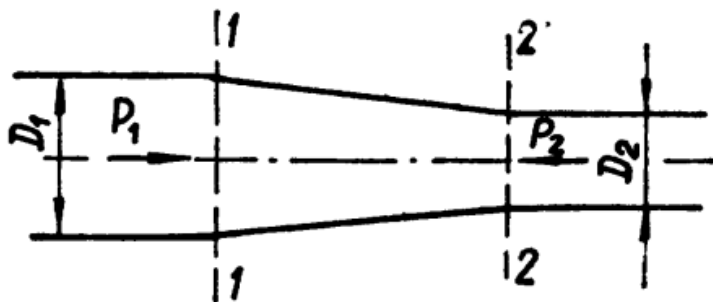


Рисунок 16 – К задаче 33

Задача 34. Колесо радиусом $r = 1,0$ м с радиальными плоскими лопатками вращается под действием силы давления струи воды, вытекающей из конического насадка ($d = 100$ мм, $\varphi = 0,95$) под напором $H = 5$ м (рисунок 17). Определить частоту вращения колеса и мощность на валу, если приложенный к нему момент $M = 40$ Нм. Потерями мощности в процессе преобразования кинетической энергии жидкости в механическую энергию вращающегося колеса пренебречь.

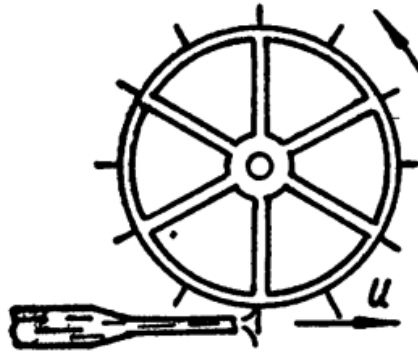


Рисунок 17 – К задаче 34

Контрольные вопросы

- 1 Чему равна реактивная сила взаимодействия между струей и твердым телом?
- 2 Чему равно реактивное давление струи на плоскую стенку?

Практическое занятие № 12. Компьютерное моделирование течения жидкости по цилиндрической трубе

Задача 35. Смоделировать течение жидкости в цилиндрической трубе с внутренним диаметром 50 мм.

Указания к решению задачи.

В приложении «Modeling» системы автоматизированного проектирования NX создаем твердотельную модель полости трубы – цилиндра диаметром 50 мм и длиной 70 мм (рисунок 18).

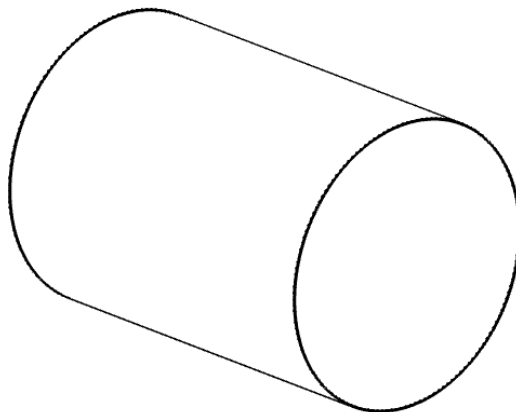


Рисунок 18 – Твердотельная модель полости трубы

Активируем приложение «Advanced Simulation» («Pre/Post»), в котором создаем файл идеализированной модели, файл FEM и файл симуляции

(файл SIM). Выбираем решатель NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow). Выбираем тип анализа Flow.

Активируем файл FEM. Разбиваем твердотельную модель на конечные элементы типа HEXA8 (рисунок 19). Задаем материал: Water (вода).

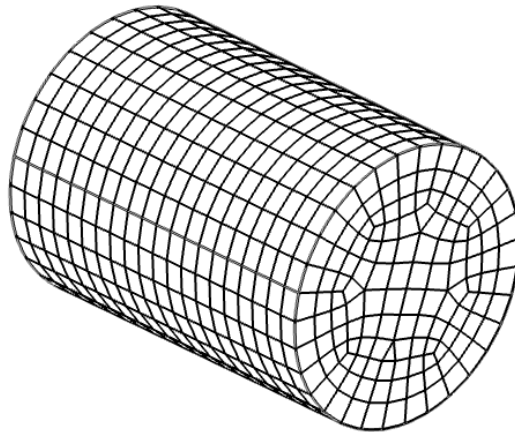


Рисунок 19 – Конечно-элементная модель полости трубы

Активируем файл SIM. Создаем решение. В параметрах решения задаем временной шаг 0,5 с; критерий схождения – RMS Residuals = 0,000001. В опциях решения задаем ламинарное течение – «Laminar Flow»; тип решателя – «Parallel Solver».

Создаем объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Inlet Flow» (рисунок 20). Задаем скорость течения жидкости 10 мм/с.

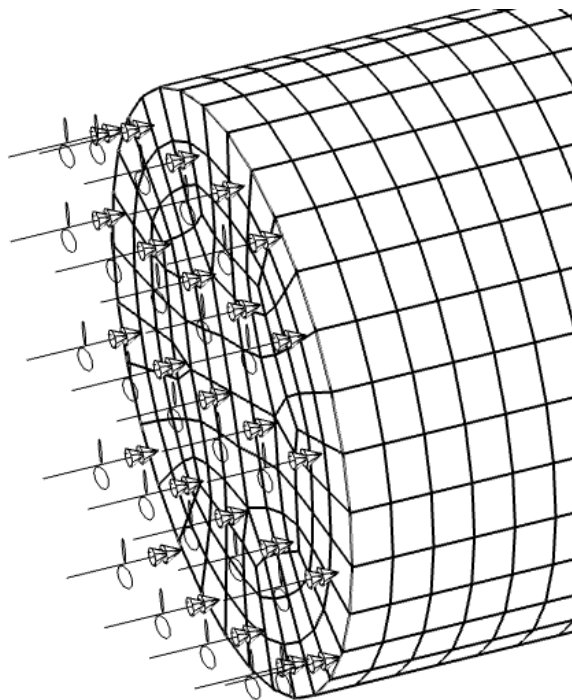


Рисунок 20 – Объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Inlet Flow»

Создаем объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Opening» (рисунок 21).

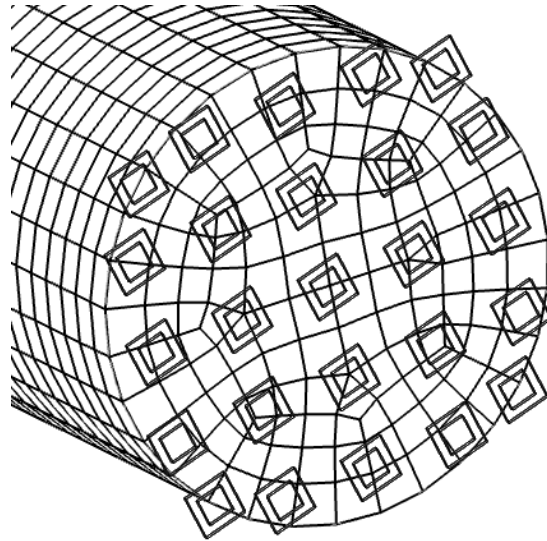


Рисунок 21 – Объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Opening»

Решаем задачу.

В постпроцессоре строим линии потока (рисунок 22).

tube_sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Velocity - Element-Nodal, Unaveraged, Magnitude
Min : 4.645, Max : 11.452, Units = mm/sec
Streamlines : Velocity - Element-Nodal, Seeds : Seed Set 1

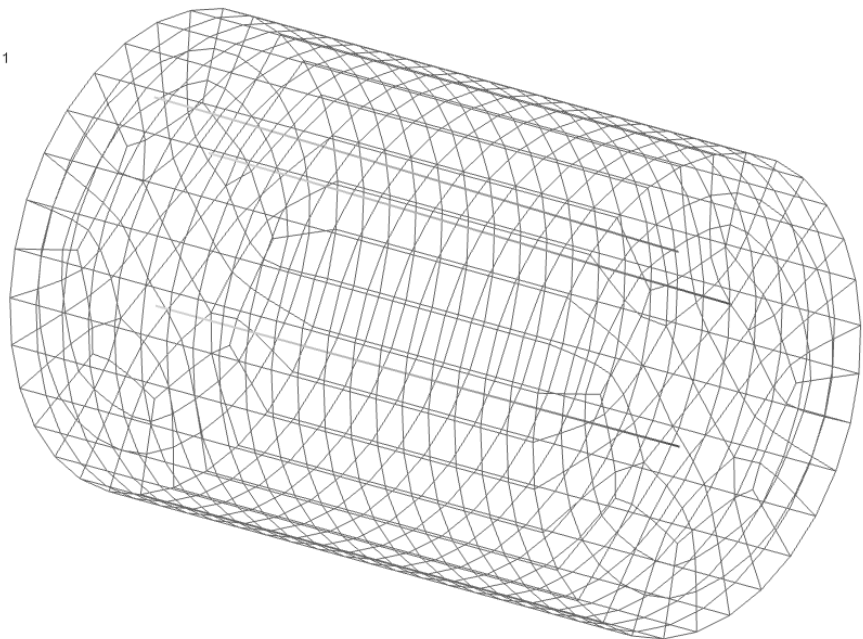
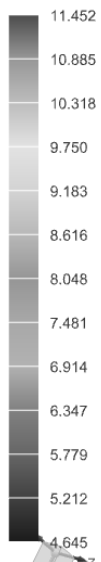


Рисунок 22 – Линии потока

Контрольные вопросы

- 1 Что такое твердотельная модель?
- 2 Что такое конечно-элементная модель?

3 Что такое идеализированная деталь?

4 Какие объекты симуляции применяются в приложении NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow)?

Практическое занятие № 13. Компьютерное моделирование течения жидкости по трубе переменного сечения

Задача 36. Смоделировать течение жидкости в цилиндрической трубе с внутренним диаметром 50 мм. Полость трубы перпендикулярно ее оси пересекает штифт диаметром 10 мм. Ось штифта совпадает с осью симметрии поперечного сечения трубы.

Контрольные вопросы

1 Что такое твердотельная модель?

2 Что такое конечно-элементная модель?

3 Что такое идеализированная деталь?

4 Какие объекты симуляции применяются в приложении NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow)?

Практическое занятие № 14. Компьютерное моделирование турбулентного течения жидкости

Задача 37. Смоделировать турбулентное течение жидкости в тройнике с внутренним диаметром отверстий 50 мм. Расстояние от точки пересечения осей отверстий до торцов принять равным 60 мм.

Указания к решению задачи.

В приложении «Modeling» системы автоматизированного проектирования NX создаем твердотельную модель полости тройника (рисунок 23).

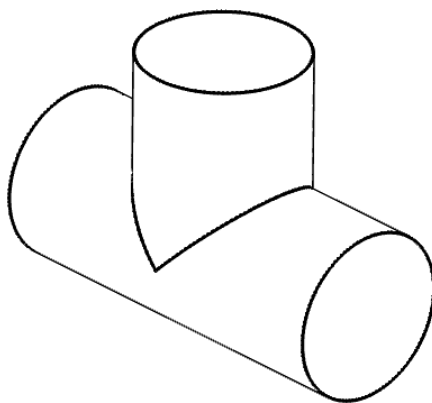


Рисунок 23 – Твердотельная модель полости тройника

Активируем приложение «Advanced Simulation» («Pre/Post»), в котором создаем файл идеализированной модели, файл FEM и файл симуляции (файл SIM). Выбираем решатель NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow). Выбираем тип анализа Flow.

Активируем файл FEM. Разбиваем твердотельную модель на конечные элементы типа TET4 (рисунок 24). Задаем материал: Water (вода).

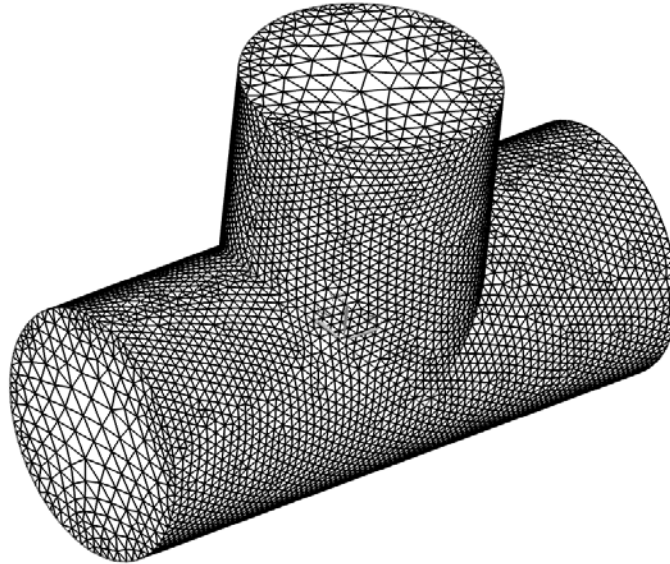


Рисунок 24 – Конечно-элементная модель полости тройника

Активируем файл SIM. Создаем решение. В параметрах решения задаем временной шаг 0,5 с; критерий схождения – RMS Residuals = 0,00003. В опциях решения задаем модель турбулентного течения – «K-Epsilon»; тип решателя – «Parallel Solver»; параметры трения – «Use Wall Function».

Создаем объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Inlet Flow» (рисунок 25). Задаем скорость течения жидкости 300 мм/с.

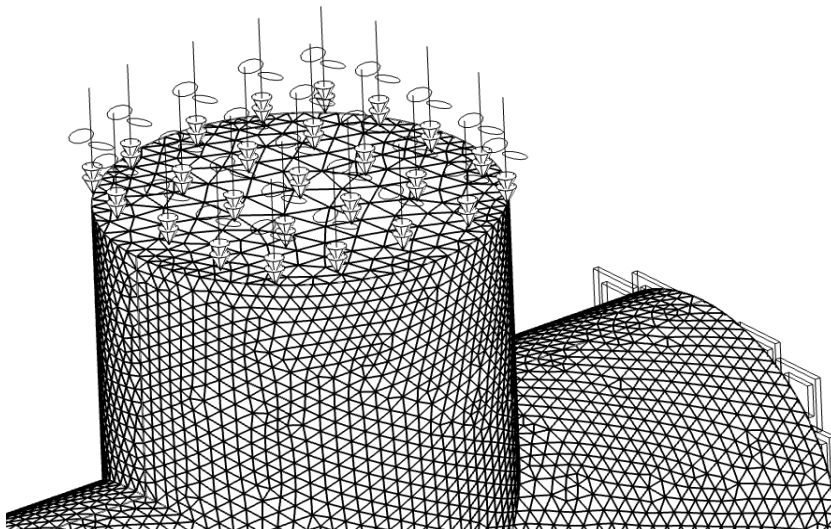


Рисунок 25 – Объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Inlet Flow»

Создаем два объекта симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Opening» (рисунок 26).

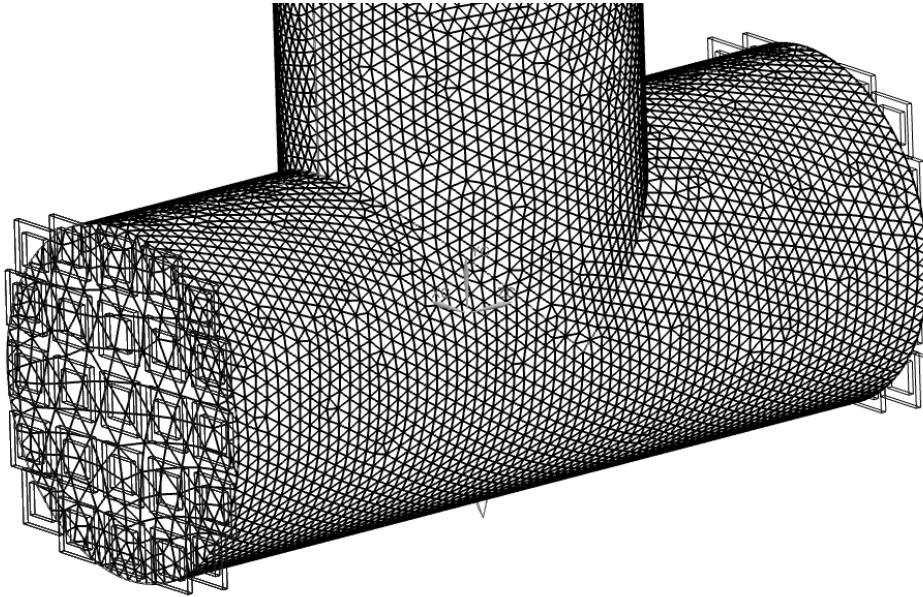


Рисунок 26 – Объект симуляции «Flow Boundary Condition» типа «Opening»

Создаем также объект симуляции «Flow Surface» типа «Boundary Flow Surface» на цилиндрических гранях (рисунок 27).

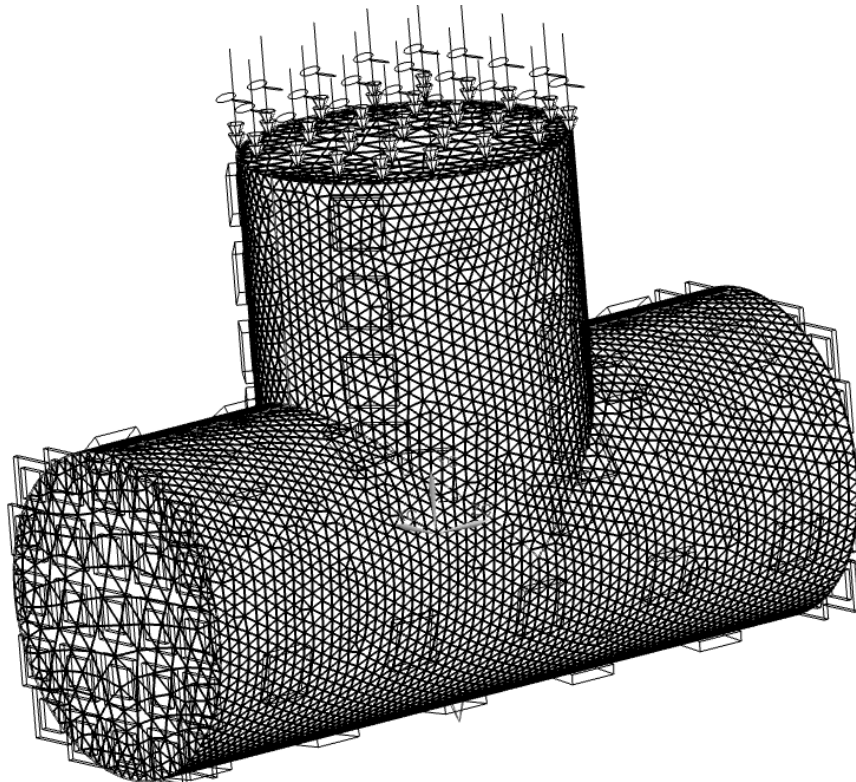


Рисунок 27 – Объект симуляции «Flow Surface» типа «Boundary Flow Surface»

Решаем задачу.
В постпроцессоре строим линии потока (рисунок 28).

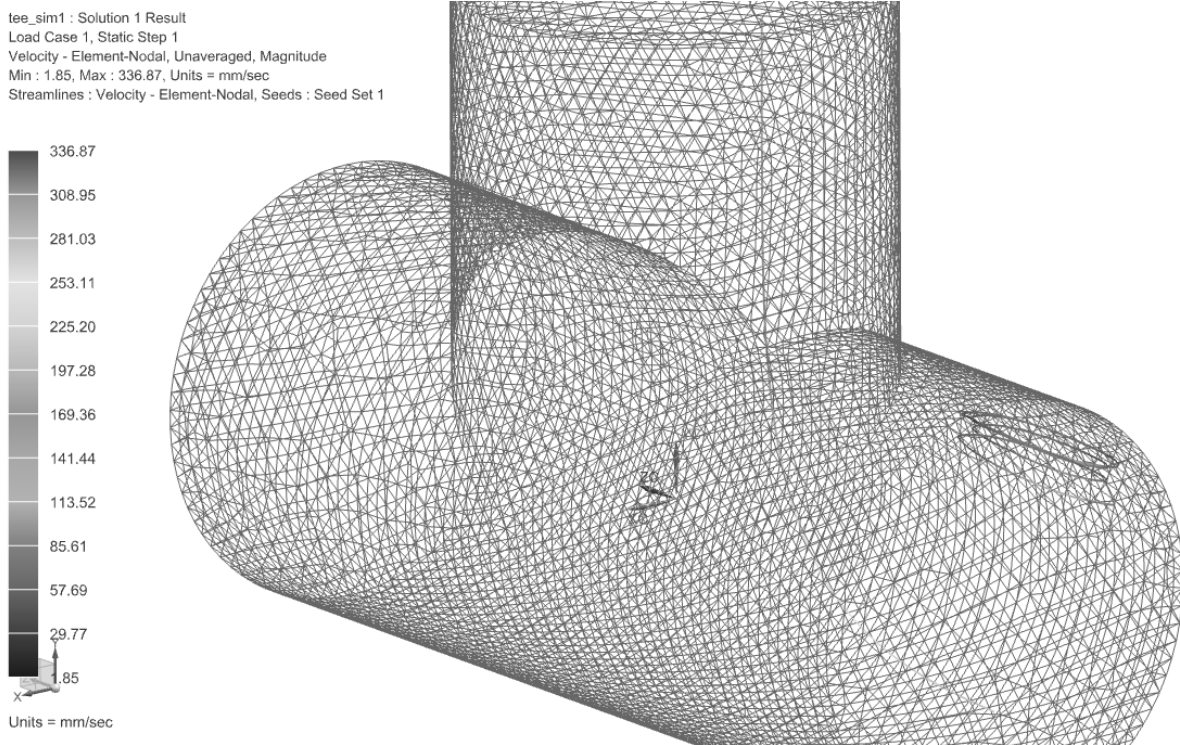


Рисунок 28 – Линии потока

Контрольные вопросы

- 1 Что такое твердотельная модель?
- 2 Что такое конечноэлементная модель?
- 3 Что такое идеализированная деталь?
- 4 Какие объекты симуляции применяются в приложении NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow)?

Список литературы

- 1 **Сазанов, И. И.** Гидравлика: учебник / И. И. Сазанов, А. Г. Схиртладзе, В. И. Иванов. – Москва: КУРС; ИНФРА-М, 2017. – 320 с.
- 2 **Гусев, А. А.** Гидравлика: учебник для академ. бакалавриата / А. А. Гусев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2017. – 285 с.
- 3 Гидравлика : учебник и практикум для академ. бакалавриата / В. А. Кудинов [и др.] ; под ред. В. А. Кудинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2018. – 386 с.
- 4 Примеры расчетов по гидравлике : учебное пособие / А. Д. Альтшуль [и др.] ; под ред. А. Д. Альтшуля. – Москва : Альянс, 2016. – 255 с.
- 5 Гидравлика : учебник: в 2 т. Т. 1 : Основы механики жидкостей и газов / В. И. Иванов [и др.]. – Москва : Академия, 2012. – 192 с.
- 6 Гидравлика : учебник: в 2 т. Т. 2 : Гидравлические машины и приводы / В. И. Иванов [и др.]. – Москва : Академия, 2012. – 288 с.
- 7 **Вакина, В. В.** Машиностроительная гидравлика. Примеры расчетов / В. В. Вакина, И. Д. Денисенко, А. Л. Столяров. – Киев: Вища школа, 1986. – 208 с.