

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

В.Л. Бровкін

ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ  
ЕКОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Друкується за Планом видань навчальної та методичної  
літератури, затвердженим Вченою радою НМетАУ  
Протокол №1 від 22.01.2021

Дніпро НМетАУ 2021

УДК 502.08.001.66(075.8)

Бровкін В.Л. Основи конструювання екологічного обладнання: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 135 с. (російською мовою)

У навчальному посібнику представлені матеріали практичних занять для допомоги студенту бакалаврату в вивченні навчальної дисципліни "Основи конструювання екологічного обладнання". Навчальна дисципліна є нормативною і входить до циклу дисциплін вільного вибору студента.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та придбання навичок, необхідних для конструювання обладнання сучасних систем захисту довкілля.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен вміти застосовувати основні принципи конструювання екологічного обладнання, зробити розрахунок апаратів та елементів систем захисту довкілля з урахуванням умов їх експлуатації, визначати надійність екологічного обладнання, дати рекомендації щодо раціонального вибору обладнання для реалізації системи захисту довкілля.

Для проведення розрахунків студенту пропонується використовувати математичний пакет MathCAD для ПК.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 101 – Екологія.

Відповідальний за випуск О.О. Єршомін, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: М.В. Губинський, д-р техн. наук, проф. НМетАУ  
О.Г. Ясев, канд. техн. наук, проф. НМетАУ

© Національна металургійна академія України, 2021 р.

© Бровкін В.Л., 2021 р.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Простейшие вычисления и операции. Графики функций, текстовые блоки и массивы в среде MathCAD.....	6
1.1 Общие сведения о среде MathCAD .....	6
1.2 Работа с формульным редактором .....	7
1.3 Примеры вычислений и операций в среде MathCAD.....	8
1.4 Построение графиков.....	9
1.5 Работа с текстовым редактором.....	13
1.6 Создание массивов .....	13
1.7 Задания для самостоятельной работы .....	13
1.7.1 Вычисление выражения.....	13
1.7.2 Построение графика с текстовыми комментариями.....	14
1.8 Контрольные вопросы по практической работе.....	15
2 Программирование в среде MathCAD .....	16
2.1 Общие сведения.....	16
2.2 Операторы программирования .....	17
2.3 Практические примеры программирования .....	19
2.4 Задания для самостоятельной работы .....	21
2.5 Контрольные вопросы по практической работе.....	21
3 Определение единичных показателей надежности невосстанавливаемых объектов с помощью пакета MathCAD .....	22
3.1 Показатели безотказности. Общие сведения.....	22
3.2 Методика расчета показателей безотказности по статистическим данным.....	22
3.3 Примеры выполнения работы.....	23
3.3.1 Пример 1 – Определение вероятности безотказной работы .....	23
3.3.2 Пример 2 – Определение среднего значения наработки до первого отказа.....	24
3.3.3 Пример 3 – Определение вероятности безотказной работы, вероятности отказа, плотности распределения отказов и интенсивности отказов.....	25
3.4 Задания для самостоятельной работы .....	26
3.5 Контрольные вопросы по практической работе.....	28
4 Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным с помощью пакета MathCAD .....	29
4.1 Методика определения показателей безотказности на определенном промежутке времени.....	29
4.2 Примеры выполнения работы.....	30
4.2.1 Пример 1 – Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным .....	30
4.3 Задания для самостоятельной работы .....	34
4.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	35
5 Определение единичных и комплексных показателей восстанавливаемых объектов с помощью пакета MathCAD .....	36
5.1 Единичные и комплексные показатели надежности .....	36
5.2 Методика расчета показателей надежности по статистическим данным.....	39
5.3 Примеры выполнения работы.....	40
5.3.1 Пример 1 – Определение средней наработки до отказа и среднего ресурса работы.....	40
5.3.2 Пример 2 – Определение гамма-процентного ресурса.....	41
5.3.3 Пример 3 – Определение среднего времени восстановления изделия .....	42
5.3.4 Пример 4 – Определение коэффициента готовности системы.....	44

5.3.5 Пример 5 – Определение коэффициента технического использования системы.....	44
5.4 Задания для самостоятельной работы.....	45
5.5 Контрольные вопросы по практической работе.....	46
6 Проверочный расчет тонкостенного аппарата под внутренним давлением с помощью пакета MathCAD.....	47
6.1 Задание.....	47
6.2 Пример выполнения расчетов на прочность в элементах тонкостенного аппарата.....	48
6.3 Задания для самостоятельной работы.....	55
6.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	56
7 Расчет кожухотрубчатого теплообменника жесткой конструкции на прочность с помощью пакета MathCAD.....	57
7.1 Задание.....	57
7.2 Методические указания к выполнению.....	57
7.3 Пример расчета прочности кожухотрубчатого теплообменника.....	60
7.4 Задания для самостоятельной работы.....	62
7.5 Контрольные вопросы по практической работе.....	64
8 Расчет конструктивных элементов колонного аппарата с учетом ветровой нагрузки с помощью пакета MathCAD.....	65
8.1 Задание.....	65
8.2 Методические указания к выполнению работы.....	66
8.3 Пример расчета прочности корпуса колонны и бетонного фундамента с учетом ветровой нагрузки.....	71
8.4 Задания для самостоятельной работы.....	74
8.5 Контрольные вопросы по практической работе.....	78
9 Охлаждение газа атмосферным воздухом. Тепловые расчеты.....	79
9.1 Основы расчетов охлаждения газа атмосферным воздухом.....	79
9.2 Примеры расчетов.....	80
9.2.1 Пример 1 – Энтальпия газа.....	80
9.2.2 Пример 2 – Температура смеси газов.....	81
9.3 Задания для самостоятельной работы.....	82
9.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	82
10 Охлаждение газа в поверхностных холодильниках. Тепловые расчеты.....	83
10.1 Основы расчетов охлаждения газа в поверхностных холодильниках.....	83
10.2 Примеры расчетов.....	84
10.2.1 Пример 1 – Охлаждение газа в поверхностном холодильнике.....	84
10.2.2 Пример 2 – Площадь поверхности холодильника.....	84
10.2.3 Пример 3 – Средняя разность температур газа и охлаждающей среды в поверхностном холодильнике.....	85
10.3 Задания для самостоятельной работы.....	86
10.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	87
11 Охлаждение газа при непосредственном контакте его с водой. Тепловые расчеты.....	88
11.1 Основы расчетов охлаждения газа при непосредственном контакте с водой.....	88
11.2 Примеры расчетов.....	89
11.2.1 Пример 1 – Теплота, поглощаемая водой при отсутствии испарения.....	89
11.2.2 Пример 2 – Теплота, поглощаемая водой при полном испарении воды.....	90
11.2.3 Пример 3 – Теплота, поглощаемая водой при частичном испарении воды.....	90
11.3 Задания для самостоятельной работы.....	91
11.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	92

12	Движение частицы пыли в неподвижной среде. Гидравлические расчеты .....	93
12.1	Основы расчетов движения частичек пыли в неподвижной среде .....	93
12.2	Примеры расчетов .....	95
12.2.1	Пример 1 – Аэродинамический коэффициент .....	95
12.2.2	Пример 2 – Скорость витания .....	96
12.3	Задания для самостоятельной работы .....	96
12.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	98
13	Осаждение частиц пыли в камерах и газоходах. Гидравлические расчеты .....	99
13.1	Основы расчетов осаждения частиц пыли в камерах и газоходах .....	99
13.2	Примеры расчетов .....	101
13.2.1	Пример 1 – Динамическая вязкость газа.....	101
13.2.2	Пример 2 – Расчет шлаковика мартеновской печи.....	103
13.3	Задания для самостоятельной работы .....	105
13.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	105
14	Расчет улавливания пыли в циклонах.....	106
14.1	Основы расчетов процессов в центробежном пылеуловителе .....	106
14.2	Примеры расчетов .....	110
14.2.1	Пример 1 – Расчет циклона .....	110
14.3	Задания для самостоятельной работы .....	110
14.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	112
15	Определение гидравлического сопротивления и размеров циклона. Гидравлические расчеты .....	114
15.1	Основы расчетов процессов в групповом центробежном пылеуловителе .....	114
15.2	Примеры расчетов .....	116
15.2.1	Пример 1 – Расчет группового циклона.....	116
15.3	Задания для самостоятельной работы .....	116
15.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	120
16	Захват частиц пыли жидкостью.....	121
16.1	Основные способы захвата частиц пыли жидкостью .....	121
16.1.1	Захват частиц пыли каплями жидкости .....	121
16.1.2	Захват частиц пыли пленкой жидкости .....	123
16.2	Примеры расчетов .....	125
16.2.1	Пример 1 – Расчет захвата частиц пыли каплями жидкости .....	125
16.2.2	Пример 2 – Расчет захвата частиц пыли пленкой жидкости .....	126
16.3	Задания для самостоятельной работы .....	127
16.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	129
17	Тепло- и массообмен в мокрых пылеуловителях .....	130
17.1	Общие сведения о процессах тепло- и массообмена в мокрых пылеуловителях .....	130
17.2	Примеры расчетов .....	131
17.2.1	Пример 1 – Расчет передачи теплоты между запыленным газом и водой при конденсационном охлаждении .....	131
17.3	Задания для самостоятельной работы .....	132
17.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	132
	Литература .....	134

# 1 Простейшие вычисления и операции. Графики функций, текстовые блоки и массивы в среде MathCAD<sup>1</sup>

## 1.1 Общие сведения о среде MathCAD

MathCAD (Mathematical Computer Aided Design – математическая система автоматизированного проектирования) – программное средство, предназначенное для решения математических задач, построения графиков функций и оформления полученных результатов. Документы, созданные в среде MathCAD, могут содержать "работающие" математические формулы, записанные в естественном виде, разнообразные графики функций и различные иллюстративные материалы (рисунки, фотографии, анимацию).

Пользовательский интерфейс системы создан так, что пользователь, имеющий элементарные навыки работы с Windows-приложениями, может сразу начать работу с MathCAD. Интерфейс системы внешне напоминает интерфейс широко известных текстовых процессоров Word под Windows.

Главной отличительной чертой систем класса MathCAD является то, что описание математических задач и результатов их вычислений производится при помощи привычных математических формул и знаков. Это делает документ, видимый на экране дисплея, чрезвычайно похожим на странички текста из математических книг и научных статей.

Чрезвычайная простота интерфейса MathCAD сделала его одним из самых популярных и, безусловно, самым распространённым в студенческой среде математическим пакетом.

В среде MathCAD доступны более двухсот операторов и логических функций, предназначенных для численного и символьного решения технических проблем различной сложности. MathCAD содержит:

- 1) обширную библиотеку встроенных математических функций;
- 2) инструменты построения разнообразных графиков;
- 3) средства создания текстовых комментариев и оформления отчётов;
- 4) конструкции, подобные конструкциям языков программирования, позволяющие писать программы для решения задач, которые невозможно или очень сложно решить стандартными инструментами пакета;
- 5) удобно организованную интерактивную систему получения справки и оперативной подсказки.

Под графическим интерфейсом пользователя подразумевается совокупность средств графической оболочки MathCAD, обеспечивающих управление системой как с клавиатуры, так и с помощью мыши. К элементам графического интерфейса пользователя относятся меню, кнопки инструментальных панелей, шаблоны различных математических операций, линейки прокрутки (скроллинга) и т.д.

---

<sup>1</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [1]

Если какая-либо позиция главного меню делается активной, она выводит ниспадающее подменю со списками доступных и недоступных (но возможных в дальнейшем) операций (команд). Доступные в данный момент операции даны чётким шрифтом, а недоступные – шрифтом с характерным затемнением, но позволяющим всё же прочесть название операций.

Работа с документами MathCAD обычно не требует обязательного использования возможностей главного меню, так как основные из них дублируются кнопками быстрого управления. Их можно выводить на экран или убирать с него с помощью соответствующих опций меню View.

Чаще всего используется панель математических операций (рис. 1.1):



Рисунок 1.1 – Панель математических операций

Математические операции в MathCAD разделены на группы и щелчок на каждой кнопке панели математических операций открывает другую панель – палитру, на которой собственно и расположены кнопки математических операций соответствующей группы.

Общение пользователя с системой MathCAD происходит на некотором промежуточном математически ориентированном языке визуального программирования – входном языке. Многие математические записи в этом языке вводятся просто через шаблоны соответствующих операторов. Этот язык настолько приближен к математическому языку описания вычислительных задач, что практически не требует их программирования. Нужно лишь точное описание алгоритма решения задачи.

Операторы – это специальные символы (+, -, /, \*, = и т.д.), указывающие на выполнение тех или иных операций над данными – операндами. Последние могут быть представлены константами или переменными – объектами с именами, хранящими данные определенного типа и значения.

Функция – объект входного языка, имеющий имя и параметры, указываемые в круглых скобках. Имя функции отождествляется с соответствующей математической функцией, например  $\sin(x)$  – это функция вычисления синуса аргумента  $x$ . Отличительной чертой функции является возврат значения (результата вычисления функции) в ответ на обращение к ней.

Операторы и функции используются для создания математических выражений – формул, которые могут вычисляться в численном или символьном виде.

## 1.2 Работа с формульным редактором

Фактически система MathCAD интегрирует в себе три редактора: формульный, текстовый и графический. Для запуска формульного редактора достаточно установить курсор мыши в любом свободном месте окна редактирования и щелкнуть левой клавишей. Появится курсор в виде

маленького красного крестика. Его можно перемещать клавишами перемещения курсора.

Курсор указывает место, с которого можно начинать набор формул – вычислительных блоков. В зависимости от места расположения курсор может менять свою форму. Так в области формул курсор превращается в синий уголок, указывающий направление и место ввода.

### 1.3 Примеры вычислений и операций в среде MathCAD

#### 1) Вычисление арифметического выражения

Вычислить значения арифметического выражения  $49+12/4$ , а затем выражения  $49+12/5$ .

Последовательность действий такая:

=> щёлкните мышью по любому месту в рабочем документе – в поле появится крестик, обозначающий позицию, с которой начинается ввод;

=> введите с клавиатуры символы в следующей последовательности:  $49 + 12 / 4 =$ . MathCAD вычислит значение выражения и выведет справа от знака равенства результат;

=> щёлкните мышью справа внизу возле цифры 4 и нажмите клавишу "Backspace". Введите цифру 5 и щёлкните мышью вне выделяющей рамки.

Необходимо запомнить правило: Нажатие клавиши "=" имеет двойное действие. Если переменная используется впервые, то знак "=" будет автоматически заменён на " :=" (знак присвоения, который также вызывается нажатием клавиши ":" ). Если знак "=" ввести после выражения, либо уже существующей переменной, то будет выведено их значение.

#### 2) Удаление выражения из рабочего документа

Последовательность действий такая:

=> щёлкните мышью по любому месту в выражении и нажимайте клавишу "Space" до тех пор, пока всё выражение не будет выделено угловой синей рамкой;

=> нажмите клавишу "Backspace" (поле ввода окрасится в чёрный цвет) и, нажав клавишу "Del", удалите выделенное.

#### 3) Вычисление длины вектора

Вычислить длину вектора, если его проекции на координатные оси 0-X, 0-Y и 0-Z равны соответственно  $X = 0,5$  м,  $Y = 1,3$  м,  $Z = 1$  м. Расчётная формула  $d = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ .

Последовательность действий такая:

=> щёлкните мышью по свободному месту в рабочем документе и введите с клавиатуры "x:0.5\*m" и щёлкните по свободному месту вне поля ввода. Здесь "m" означает размерность величины в метрах;

=> аналогично введите значения проекций Y и Z;

=> установите курсор в любом свободном месте документа ниже выражений для X, Y и Z и нажмите клавишу с изображением обратного следа "\", либо нажмите кнопку с изображением калькулятора, которая находится на

панели инструментов, и выберите в раскрывшемся меню кнопку с изображением квадратного корня;

=> введите в шаблон (чёрный прямоугольник) под знаком корня выражение "X^2" "клавиша Space" "+Y^2" "клавиша Space" "+Z^2=";

=> теперь сохраните созданный документ на жёстком магнитном диске, для чего выберите в меню File (Файл) команду Save (Сохранить), либо нажмите клавишу [F6].

Необходимо запомнить правило: Основные размерности обозначаются в MathCAD следующим образом: m – метр, kg – килограмм, s – секунда, J – Джоуль, W – Ватт, K – Кельвин.

## 1.4 Построение графиков

Для построения графиков используются шаблоны, перечень которых содержится в подменю Graph (График) меню Insert (Вставка). Кроме того, панель, содержащую кнопки шаблонов графиков, можно вызвать нажатием кнопки, которая находится в математической панели.

Для начального построения графика того или иного вида достаточно только задать тип графика. На рисунке 1.2 показана палитра графиков, название кнопок которой соответствует пунктам подменю Graph (График) меню Insert (Вставка).

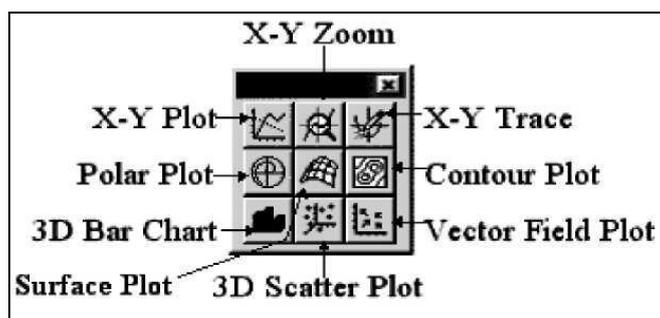


Рисунок 1.2 – Палитра графиков:

- |                     |   |
|---------------------|---|
| "X-Y Plot"          | (График X-Y) – создать шаблон двумерного графика в декартовой системе координат;                                    |
| "Polar Plot"        | (Полярный график) – создать шаблон графика в полярной системе координат;  |
| "Surface Plot"      | (График поверхности) – создать шаблон для построения трехмерного графика;   |
| "Contour Plot"      | (Линии уровня) – создать шаблон для контурного графика трехмерной поверхности;                                      |
| "3D Scatter Plot"   | (3D-график разброса) – создать шаблон для графика в виде точек (фигур) в трехмерном пространстве;                   |
| "3D Bar Chart"      | (Столбчатая 3D-диаграмма) – создать шаблон для изображения в виде совокупности столбиков в трехмерном пространстве; |
| "Vector Field Plot" | (Векторное поле) – создать шаблон для графика векторного поля на плоскости  |

Для изменения формата уже построенного графика необходимо два раза щёлкнуть указателем мыши по полю графика.

Полезным инструментом при работе с двумерными графиками является применение специального графического маркера в виде двух перекрещивающихся пунктирных линий. Они появляются нажатием кнопки "X-Y Trace" (Трассировка) на панели графиков. При этом появляется окно этой операции, в котором отображаются координаты маркера, перемещаемого по полям графика. Поместив маркер на какую-либо интересующую вас точку графика, можно примерно определить её координаты.

Еще одна особенность при работе с двумерными графиками заключается в возможности их просмотра с увеличением отдельных частей этих графиков. Она реализуется операцией "X-Y Zoom" (Масштаб) нажатием соответствующей кнопки на панели графиков. Перемещением мыши с нажатой левой клавишей можно выделить определенную часть графика.

### **1) Построение графиков в декартовой системе координат**

Есть два способа построения наиболее распространённых графиков в декартовой системе координат.

Первый, наиболее простой способ, – это ввести выражение, описывающее некоторую функцию  $f(x)$ , а затем вызвать шаблон "X-Y Plot" (График X-Y) с помощью меню или палитры графиков. В появившемся шаблоне остаётся только ввести имя переменной "x" по оси 0-X и щёлкнуть мышью вне области графика – он будет построен. Следует обратить внимание на то, что на оси ординат записывается имя функции (например,  $\sin(x)$ ,  $f(x)$  и т.п.), при этом в скобках указывается имя аргумента, стоящего на оси абсцисс (в данном случае – x).

Для второго способа нужно вначале задать ранжированную переменную, например "x", указав диапазон её изменения и шаг. Шаг "d" задаётся следующим образом: указывается начальное значение переменной " $x_0$ ", а затем через запятую значение " $x_0 + d$ ". После этого через две точки указывается конечное значение "x". Две точки вводятся нажатием клавиши ";" – точка с запятой. Затем надо задать соответствующую функцию или функции и вызвать шаблон двумерного графика как и в первом способе.

Если строятся графики нескольких функций в одном шаблоне, то для разделения имён функций следует использовать запятые. Крайние шаблоны числовых данных служат для указания предельных значений абсцисс и ординат, т.е. они задают масштабы графика. Если оставить эти шаблоны незаполненными, то масштабы по осям графика будут устанавливаться автоматически.

### **2) Построение графиков поверхностей. Пример построения графика**

Порядок построения графиков поверхности рассмотрим на примере построения функции  $f(x, y) = -\sin(x^2 + y^2)$ , где "x" изменяется от "2" до "3,1", а "y" от "1" до "2,5". Фрагмент рабочего документа с построенным графиком представлен на рисунке 1.3.

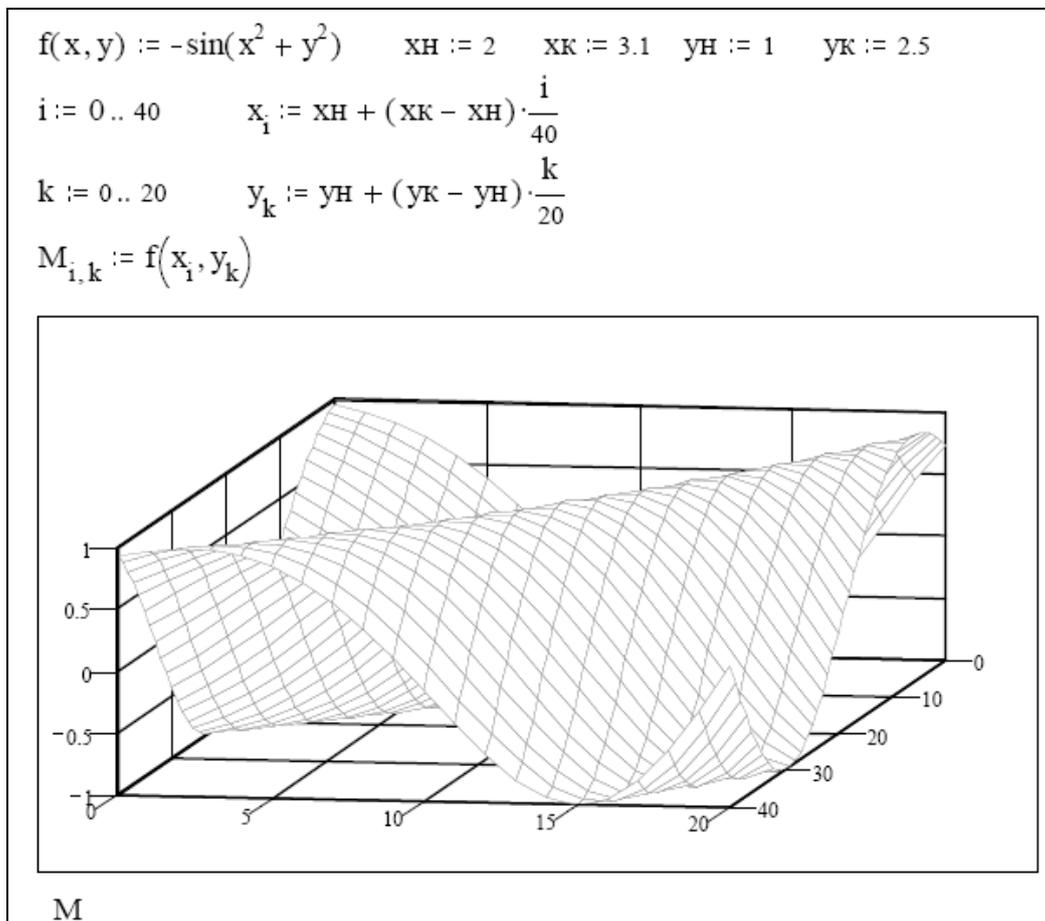


Рисунок 1.3 – График поверхности

Для построения графика поверхности (как, впрочем, и любого трёхмерного графика) необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- 1) Задать вид функции двух переменных – "f(x,y):-sin(x^2<клавиша Space>+y^2)".
- 2) Задать пределы изменения аргументов – "xH:2<клавиша Enter>xK:3.1<клавиша Enter>yH:1<клавиша Enter>yK:2.5<клавиша Enter>".
- 3) Задать нумерацию узлов сетки поверхности по первому аргументу – "i:0;40".

Примечание: Число узлов обычно выбирается произвольно. Если задан шаг изменения аргумента, например,  $\Delta x$ , то число узлов равно

$$i = \frac{x_K - x_H}{\Delta x} + 1.$$

- 4) Сформировать вектор первого аргумента – "x[i:xH+(xK-xH)·i/40".
- 5) Задать нумерацию узлов сетки поверхности по второму аргументу – "k:0;20".
- 6) Сформировать вектор второго аргумента – "y[k:yH+(yK-yH)·k/20".
- 7) Заполнить матрицу "M" значениями функции f(x,y) в узлах сетки – "M[i,k:f(x[i<клавиша Space>,y[k<клавиша Space>))".
- 8) Построить график поверхности, для чего нажмите кнопку "Surface Plot" (График поверхности) на панели графики.

Необходимо запомнить правило, что в MathCAD существует два вида нижних индексов:

1) декоративный – для придания наглядности выражениям. Он вызывается нажатием клавиши "." – точка (при латинской раскладке клавиатуры).

2) индекс массива – для нумерации элементов массива. Он вызывается нажатием клавиши "[" – открывающаяся квадратная скобка. При построении графиков используются индексы массива.

Форматирование графика поверхности имеет на порядок больше возможностей, чем форматирование графиков в декартовой системе координат. К цвету, толщине и виду линий, нумерации осей, сетке и пр. добавляется вид графика: наклон к зрителю и вращение по оси  $Z$ , а также многое другое.

### **3) Построение графиков в полярной системе координат**

В полярной системе координат каждая точка задаётся углом  $W$  и модулем радиус-вектора  $R(W)$ . График функции обычно строится в виде линии, которая описывает конец радиус-вектора при изменении угла  $W$  в определённых пределах, чаще всего от  $0$  до  $2 \cdot \pi$ .

Перед построением таких графиков надо задать значения переменной  $W$ . После вывода шаблона следует ввести  $W$  в шаблон снизу и функцию  $R(W)$  в шаблон справа, а также указать нижний предел изменения длины радиус-вектора в шаблоне справа внизу и верхний предел в шаблоне справа вверху.

### **4) Построение контурных графиков поверхности**

Ещё один широко распространённый тип графиков для представления поверхностей – с помощью линий уровня. Такие графики широко применяются, например, в картографии. Операция "Contour Plot" (Линии уровня) служит для вывода шаблона таких графиков. Он подобен шаблону, описанному при построении графиков поверхности. Также подобны действия по созданию матрицы "M".

Часто контурные графики получаются более информативными, чем просто поверхности. У последних нередко одни части поверхности закрывают другие. Например, пик на переднем плане может закрыть меньшие пики или впадины на заднем плане. У контурных графиков такого эффекта нет, и на них легко обнаруживаются все пики и впадины, правда, при достаточно большом числе линий уровня и малом расстоянии между ними.

### **5) Построение точечных графиков поверхности**

Нередко поверхности представляют в виде находящихся в трёхмерном пространстве точек, кружочков или иных фигур. Каждая из этих фигур несёт информацию о геометрическом положении её центра в трёхмерном пространстве. Такой график создаётся операцией "3D Scatter Plot" (3D-график разброса).

Порядок построения точечных графиков поверхности такой же, как и порядок построения графика поверхности.

### **6) Построение графика в виде гистограммы**

Весьма распространённой формой представления поверхностей является представление её рядом трёхмерных столбиков, высота которых определяется

значением координаты  $f(x,y)$ . Для этого используется операция "3D Bar Chart" (Столбчатая 3D-диаграмма). Подобные графики широко применяются при представлении сложных статистических данных, например, представленными тремя независимыми переменными. Порядок построения гистограмм такой же, как и порядок построения остальных трёхмерных графиков.

### **7) Построение векторного графика поверхности**

Ещё один вид представления поверхности – векторное представление. Оно задаётся построением коротких стрелочек – векторов. Каждая стрелка обращена остриём в сторону нарастания высоты поверхности, а плотность расположения стрелок зависит от скорости этого нарастания. Для построения такого графика используется команда "Vector Field Plot" (Векторное поле). Порядок построения векторных графиков такой же, как и порядок построения остальных трёхмерных графиков.

## **1.5 Работа с текстовым редактором**

Текстовый редактор позволяет создавать текстовые комментарии. Они делают документ с формулами и графиками более понятными. В простейшем случае для запуска текстового редактора достаточно ввести символ " (двойная кавычка). В появившийся прямоугольник можно начать вводить текст. В текстовом блоке курсор имеет вид красной вертикальной черты и отмечает место ввода.

## **1.6 Создание массивов**

Массивы можно создать при помощи шаблонов. Шаблоны массивов вызываются нажатием кнопки с изображением квадратной матрицы. Эта кнопка расположена на палитре векторов и матриц, которая, в свою очередь, вызывается нажатием кнопки с изображением квадратной матрицы на панели математических операций.

Для создания массива (например, "M") необходимо после знака присваивания  $M:=$  поместить шаблон массива. При вызове шаблона массива будет раскрыто диалоговое окно, в котором необходимо указать количество строк (Rows) и количество столбцов (Columns).

## **1.7 Задания для самостоятельной работы**

### **1.7.1 Вычисление выражения**

Вычислить выражение  $\sqrt{(A+B)/C^3}$ , значения A, B и C которого взять из таблицы 1.1 согласно порядковому номеру студента по журналу.

Таблица 1.1 – Варианты заданий для самостоятельной работы

№ вар.	X	Y	A	B	C	№ вар.	X	Y	A	B	C
1	-0,1	-3	$\frac{Y}{X}$	$Y^2$	$\sqrt{X \cdot Y}$	2	0,2	$\frac{1}{X}$	$\sqrt{5}$	$\frac{X}{A \cdot Y^2}$	$\sqrt{Y}$
3	1,4	$X^2$	-2	$X^3$	$\sqrt{B}$	4	5	-3	$\sqrt{X}$	$A^3$	$\frac{1}{X \cdot A}$
5	8	$\sqrt{X}$	$X^2$	$\sqrt{5}$	2,5	6	1,8	$X^3$	$\sqrt{Y}$	$\frac{X \cdot A}{Y^2}$	87
7	4,5	$X^3$	$\sqrt{Y}$	$\frac{1}{X^4}$	$\sqrt{B}$	8	1	4,5	$\frac{1}{X^4}$	$\frac{1}{X \cdot Y}$	$\sqrt{B}$
9	3	0,9	$X \cdot \sqrt{Y}$	$A^3$	$\frac{1}{X \cdot A}$	10	4,3	3	$\sqrt{Y}$	$\frac{1}{X^4}$	$\frac{1}{X \cdot A}$
11	4	8,1	$\frac{1}{X \cdot Y}$	$\frac{X \cdot A}{Y^2}$	$\frac{X}{A \cdot B^2}$	12	7,2	$\sqrt{X}$	$X \cdot \sqrt{Y}$	$\frac{X \cdot A}{Y^2}$	$\frac{1}{X^4}$

### 1.7.2 Построение графика с текстовыми комментариями

Построить график одной или нескольких функций. Задание взять из табл. 1.2 согласно порядковому номеру студента по журналу группы. Все зависимости функций должны быть построены на одном графике. Рабочий лист должен содержать текстовый комментарий, указывающий номер варианта и вид графика.

Таблица 1.2 – Варианты заданий для самостоятельной работы

№ вар.	Функции	Диапазон изменения аргументов	Шаг изменения аргументов	Вид графика
1	$f(x) = \sin(x)^3$ $\varphi(x) = \cos(x)^3$	$x \in [-10; 10]$	$\Delta x = 0,1$	В декартовой системе координат
2	$f(x) = \sin(3 \cdot x)$ $\varphi(x) = \cos(x)$	$x \in [0; 2 \cdot \pi]$	$\Delta x = 0,01 \cdot \pi$	В полярной системе координат
3	$f(x, y) = -\sin(x^2 \cdot y)$	$x \in [-2; 2]$ $y \in [-2; 2]$	$\Delta x = 0,2$ $\Delta y = 0,2$	График поверхности
4	$f(x, y) = -\sin(x^2 \cdot y^3)$	$x \in [0; 3]$ $y \in [-4; 1]$	$\Delta x = 0,1$ $\Delta y = 0,2$	Контурный график поверхности
5	$f(x, y) = \frac{\sin(x^2)}{\cos(y^3 \cdot x)}$	$x \in [0; 10]$ $y \in [-1; 1]$	$\Delta x = 1$ $\Delta y = 0,3$	Точечный график поверхности
6	$f(x, y) = \operatorname{tg}(x \cdot y)$	$x \in [-1; 1]$ $y \in [-2; 2]$	$\Delta x = 0,1$ $\Delta y = 0,2$	Трёхмерная гистограмма

№ вар.	Функции	Диапазон изменения аргументов	Шаг изменения аргументов	Вид графика
7	$f(x, y) = \frac{\sin(x) \cdot \cos(x)}{-\cos(x^2 \cdot y)}$	$x \in [-3; 21]$ $y \in [-4; 0,5]$	$\Delta x = 1$ $\Delta y = 0,01$	Векторный график поверхности
8	$f(x) = x^3 / 1000$ $\varphi(x) = 5800 \cdot \sqrt{x}$	$x \in [-10; 10]$	$\Delta x = 0,1$	В декартовой системе координат
9	$f(x) = 1,2 \cdot \sin(5 \cdot x)$ $\varphi(x) = \sin(x) \cdot \cos(x)$	$x \in [0; 2 \cdot \pi]$	$\Delta x = 0,01 \cdot \pi$	В полярной системе координат
10	$f(x, y) = \frac{2 \cdot \pi \cdot (x^2 + y^2)}{x \cdot y}$	$x \in [0,01; 1]$ $y \in [0,1; 10]$	$\Delta x = 0,01$ $\Delta y = 0,01$	Контурный график поверхности
11	$f(x, y) = \frac{x^3 \cdot \cos(y)}{\sqrt{x \cdot y}}$	$x \in [3; 8]$ $y \in [-4; -1]$	$\Delta x = 0,5$ $\Delta y = 0,1$	Трёхмерная гистограмма
12	$f(x) = \operatorname{tg}(x)$ $\varphi(x) = \sin(x)$	$x \in [0; 3]$	$\Delta x = 0,01$	В декартовой системе координат

### 1.8 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Какое назначение программного средства MathCAD?
- 2) Для чего предназначена панель инструментов? Какие кнопки она содержит?
- 3) Что называется переменной, функцией? Как присвоить значение переменной?
- 4) Какие редакторы интегрирует в себе система MathCAD?
- 5) Как удалить какое-либо выражение из рабочего документа?
- 6) Какие бывают формы курсора в MathCAD? Что они обозначают?
- 7) Какое действие вызывает нажатие клавиши "=" ?
- 8) Как указать размерность переменной? Как обозначаются основные размерности?
- 9) Какие основные типы графиков можно построить в среде MathCAD? Как вызвать шаблоны этих графиков?
- 10) Как можно изменить параметры уже построенного графика?
- 11) Какие функции выполняет команда "X-Y Zoom" (Масштаб)?
- 12) Какие функции выполняет команда "X-Y Trace" (Трассировка)?
- 13) Какой порядок построения графика функции одной переменной в декартовых координатах?
- 14) Как построить одновременно несколько графиков разных функций на одном координатном поле в декартовой системе координат?
- 15) Как вставить текстовый блок в рабочий лист MathCAD?

## 2 Программирование в среде MathCAD<sup>2</sup>

### 2.1 Общие сведения

Программный модуль в системе MathCAD представляет собой самостоятельный модуль, выделяемый в тексте документа жирной вертикальной чертой. Программный модуль может выполнять роль либо функции пользователя с именем и параметрами, либо функции без имени и параметров, но в любом случае, возвращающей результат вычислений, определяемый последним оператором модуля.

Шаблоны программных элементов можно вызвать при помощи кнопок панели программных элементов, показанной на рисунке 2.1.

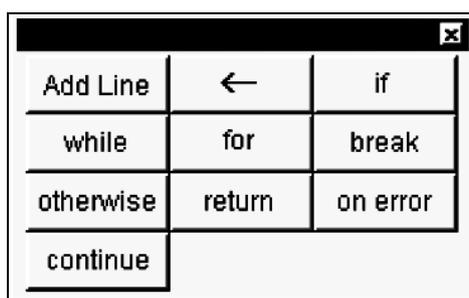


Рисунок 2.1 – Панель программных элементов

Нетрудно заметить, что набор программных элементов для создания программных модулей весьма ограничен и содержит следующие элементы (в скобках указан перевод с английского языка названия программного элемента):

**Add Line** (добавить линию) – создаёт и при необходимости расширяет жирную вертикальную линию, справа от которой в шаблонах задаётся запись программного модуля;

← – символ локального присваивания (в теле модуля);

**if** (если) – оператор условного выражения;

**for** (для) – оператор задания цикла с фиксированным числом повторений;

**while** (пока) – оператор задания цикла, типа "пока" (цикл выполняется, пока выполняется некоторое условие);

**otherwise** (иначе) – оператор иного выбора (обычно применяется с **if**);

**break** (прервать) – оператор прерывания вычислений внутри цикла;

**continue** (продолжить) – оператор продолжения вычислений;

**return** (возвратить) – оператор возврата вычисленного значения какой-либо переменной в качестве результата работы модуля;

**on error** (ошибка) – оператор обработки ошибок в работе модуля.

---

<sup>2</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [1]

## 2.2 Операторы программирования

### 1) Оператор "Add Line"

Оператор Add Line выполняет функции расширения выполняемых операций программного модуля. Расширение фиксируется удлинённой вертикальной чертой программных модулей или их древовидным расширением. Благодаря этому, в принципе, можно создавать сколь угодно большие программы.

### 2) Оператор локального (внутреннего) присваивания " $\leftarrow$ "

Оператор " $\leftarrow$ " выполняет функции внутреннего локального присваивания. Например, выражение

```
x ← 123
```

присваивает локальной переменной "x" значение "123". Локальный характер присваивания означает, что такое значение "x" сохраняет только в теле программного модуля. За пределами модуля значение переменной x может быть не определённым, либо равно значению, которое задаётся операторами присваивания := и =. В последнем случае x будет считаться глобальной переменной.

### 3) Оператор создания условных выражений "if"

Оператор "if" является оператором для создания условных выражений. Он задаётся в виде:

```
Выражение if Условие.
```

Если *Условие* выполняется, то возвращается значение *Выражения*. Совместно с этим оператором часто используются операторы прерывания "break" или иного выбора "otherwise". Например:

```
x ← 123  
x ← 18 if x > 0
```

Здесь первоначально  $x = 123$ . Далее, согласно условию ( $x > 0$ ), переменной "x" будет присвоено значение 18.

### 4) Оператор цикла "for"

Оператор "for" служит для организации циклов с заданным числом повторений. Он записывается в виде:

```
for Var ∈ Nmin, Nmin + Step .. Nmax
```

Эта запись означает, что если выражение, помещённое в шаблон, будет выполняться столько раз, сколько переменная *Var* изменяет своё значение от *Nmin* до *Nmax* с шагом *Step*. Если значение  $Nmin + Step$  не задано, то шаг

изменения переменной, по умолчанию, принимается равным "+ 1".  
Переменную счётчика *Var* можно использовать в выражениях программы.

Например,

```
for i ∈ 1, 3 .. 5  
  xi ← 0.
```

Здесь переменная "i" изменяется от 1 до 5 с шагом 2, т.е. принимает значения 1, 3, 5. Соответственно, внутри оператора "for"  $x_1 = 0$ ,  $x_3 = 0$ ,  $x_5 = 0$ .

### 5) Оператор цикла "while"

Оператор "while" служит для организации циклов, действующих до тех пор, пока выполняется некоторое условие. Этот оператор записывается в виде:

```
while Условие
```

В шаблоне под оператором записывается выполняемое выражение.  
Например:

```
x ← 1  
while x < 5  
  x ← x + 1.
```

Здесь в цикле будет выполняться присвоение переменной "x" значений 1, 2, 3, 4. Когда  $x = 5$ , то условие не выполняется и, соответственно, не выполняются операторы, следующие за "while".

### 6) Оператор иного выбора "otherwise"

Оператор "otherwise" обычно используют совместно с оператором "if". Его использование поясняет следующая программная конструкция:

$f(x) :=$	$1 \text{ if } x > 0$	возвращает 1, если $x > 0$
	$-1 \text{ otherwise}$	возвращает $-1$ во всех иных случаях

### 7) Оператор прерывания "break"

Оператор "break" вызывает прерывание работы программы. Чаще всего он используется совместно с оператором условного выражения "if" и операторами циклов "while" и "for", обеспечивая переход в конец тела цикла.  
Например:

```
x ← 0  
while 1  
  x ← x + 1  
  break if x > 9
```

Здесь выполнение цикла "**while**" прервется, когда "x" примет значение 10. (Конструкция "**while 1**" обозначает бесконечный цикл).

### 8) Оператор продолжения "**continue**"

Оператор продолжения используется для продолжения работы программы после прерывания. Он также используется обычно совместно с операторами задания циклов "**while**" и "**for**", обеспечивая после прерывания возврат в начало цикла. Например:

```
i ← 0
while i < 5
    i ← i + 1
    continue if i = 2
x ← i.
```

Здесь переменная "x" принимает в цикле "**while**" следующие значения: 1, 3, 4, 5. Когда  $i = 2$ , выполнение цикла будет прервано и произойдёт возврат в начало цикла.

### 9) Оператор возврата "**return**"

Оператор возврата "**return**" прерывает выполнение программного модуля и возвращает, как результат работы всего программного модуля, значение, стоящее следом за ним. Например, в приведённом ниже случае,

```
return 0 if x < 0
```

будет возвращаться значение 0 при любом  $x < 0$ .

### 10) Оператор обработки ошибок "**on error**"

Оператор обработки ошибок позволяет создавать конструкции обработчиков ошибок. Этот оператор задаётся в виде:

```
Выражение № 1 on error Выражение № 2.
```

Если при выполнении *Выражения № 2* возникает ошибка, то выполняется *Выражение № 1*. Например,

```
y(x) := 1 on error  $\frac{1}{x}$ 
```

Здесь функция  $y(x)$  возвратит значение 1 при  $x = 0$ .

## 2.3 Практические примеры программирования

Программный модуль, в сущности, является функцией, но созданной с применением упомянутых сугубо программных средств. Она может возвращать значение, определённое последним оператором. В модуле могут содержаться

любые операторы и функции входного языка системы. Для передачи в модуль значений переменных можно использовать переменные документа, которые ведут себя в модуле как глобальные переменные.

Обычно модулю присваивается имя со списком переменных, после которого идёт знак присваивания ":=". Переменные в списке являются локальными и им можно присваивать значения при вызове функции, заданной модулем. Локальный характер таких переменных позволяет использовать для их имён (идентификаторов) те же имена, что и у глобальных переменных документа.

На рисунке 2.2 показаны примеры программирования в среде MathCAD.

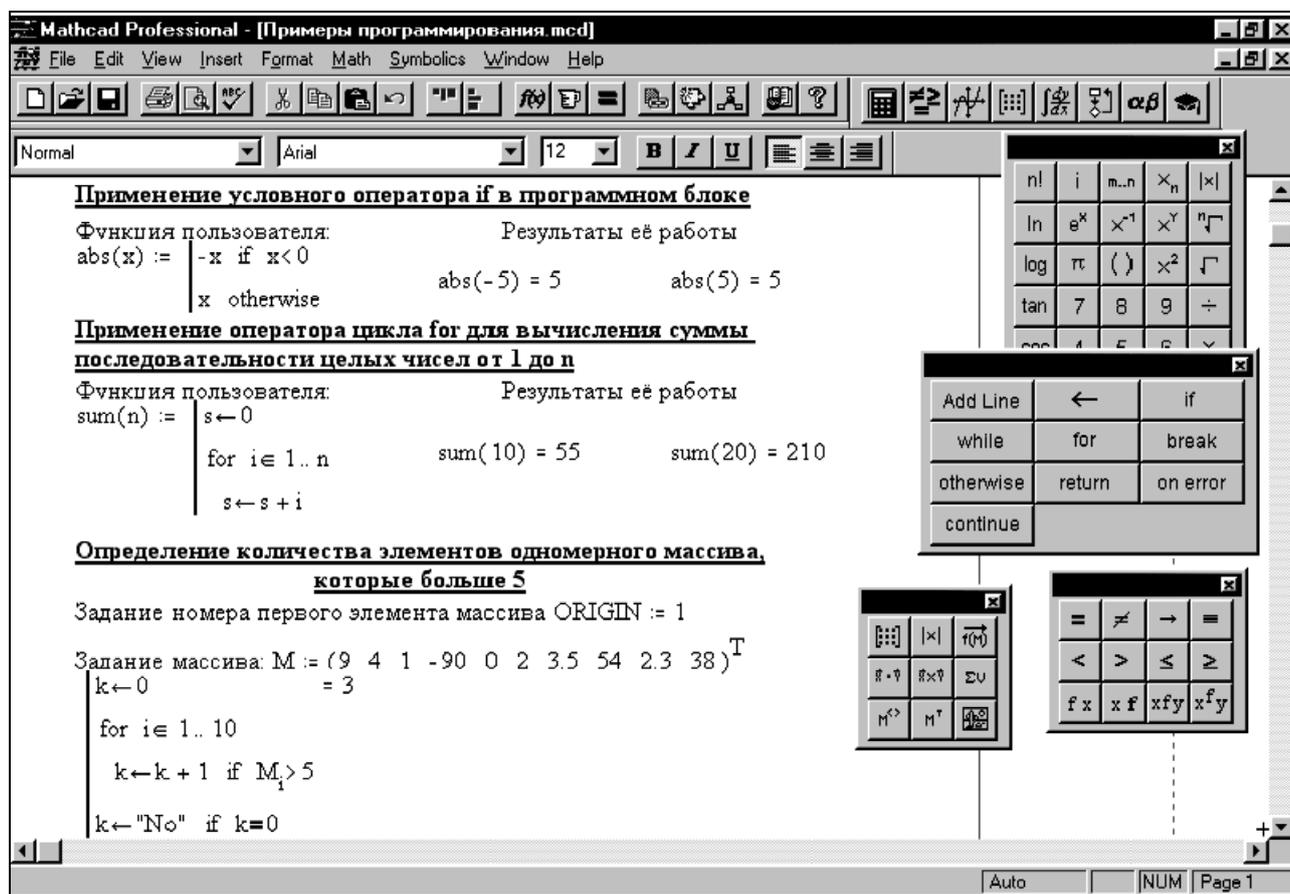


Рисунок 2.2 – Примеры программирования в среде MathCAD

В последнем примере на рисунке 2.2, в котором определяется количество элементов одномерного массива, которые больше 5, буква "T" справа вверху от массива обозначает транспонирование массива. MathCAD корректно производит операции только с теми одномерными массивами, которые представлены в виде вектора-столбца. Для транспонирования массива необходимо выделить его правую часть (после знака присваивания) и нажать комбинацию клавиш <Ctrl+1>. В случае, если массив не содержит элементов, больших 5, то будет выведено сообщение – "No". В программных блоках переменным можно присваивать текстовые значения, написанные только латинским шрифтом. Результат работы программного блока выведен справа от него (в данном случае в одномерном массиве содержится три элемента, которые больше 5).

## 2.4 Задания для самостоятельной работы

Создать программный модуль. Задание взять из табл. 2.1 согласно порядковому номеру студента по журналу группы.

Таблица 2.1 – Варианты заданий для самостоятельной работы

№ вар.	Задание	№ вар.	Задание
1	Создать функцию, позволяющую суммировать положительные элементы одномерного массива.	2	Написать функцию нахождения минимального элемента массива.
3	Создать функцию, проверяющую, все ли элементы одномерного массива $< 0$ . Функция должна выводить соответствующее сообщение.	4	Создать функцию, проверяющую, все ли элементы одномерного массива $> 0$ . Функция должна выводить соответствующее сообщение.
5	Написать функцию, которая находит количество положительных элементов одномерного массива.	6	Написать функцию, которая создавала бы одномерный массив, элементами которого являлись бы положительные элементы исходного массива.
7	Написать функцию нахождения минимального элемента массива.	8	Написать функцию нахождения максимального элемента массива.
9	Написать функцию, которая находит количество отрицательных элементов одномерного массива.	10	Написать функцию, которая находит количество отрицательных элементов одномерного массива.
11	Создать функцию, проверяющую все ли элементы одномерного массива $< 0$ . Функция должна выводить соответствующее сообщение.	12	Создать функцию, проверяющую все ли элементы одномерного массива $> 0$ . Функция должна выводить соответствующее сообщение.

## 2.5 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Какие кнопки находятся на панели программных элементов?
- 2) Какие операторы цикла реализованы в MathCAD?
- 3) Что такое локальные и глобальные переменные?
- 4) Для чего необходим оператор "for"?
- 5) Какую функцию выполняет оператор "otherwise"?
- 6) Какую функцию выполняет оператор "if"?
- 7) Для чего необходим оператор "while"?
- 8) Как расширить программный модуль?

## **3 Определение единичных показателей надежности невосстанавливаемых объектов с помощью пакета MathCAD<sup>3</sup>**

### **3.1 Показатели безотказности. Общие сведения**

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Показателями безотказности по ГОСТ 27.002-2015, применяемыми к невосстанавливаемым объектам, являются вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы  $R(t)$  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начале интервала времени (момент начала исчисления наработки) изделие находится в работоспособном состоянии.

Гамма-процентная наработка до отказа – наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до отказа.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

В определении показателей безотказности используются следующие временные понятия (не являются показателями надежности):

- наработка – продолжительность или объем работы объекта;
- наработка до отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа;
- наработка до первого отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации до первого отказа (частный случай наработки до отказа).

### **3.2 Методика расчета показателей безотказности по статистическим данным**

Статистическая оценка вероятности безотказной работы на период наработки от 0 до  $t$  определяется по формулам

$$R(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (3.1)$$

---

<sup>3</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [2, 3]

или 
$$R(t) = \frac{N(t)}{N} \quad (3.2)$$

где  $N$  – количество объектов, работоспособных в начальный момент времени;  $N(t)$  – количество объектов, работоспособных на момент времени  $t$ ;  $n(t)$  – количество объектов, отказавших на отрезке времени от 0 до  $t$ .

Статистическая оценка вероятности отказа на соответствующие моменты времени определяется по формуле

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N} = 1 - R(t), \quad (3.3)$$

или 
$$Q(t) = 1 - \frac{N(t)}{N}. \quad (3.4)$$

Средняя наработка до отказа по статистическим данным определяется по формуле

$$T_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.5)$$

Плотность распределения отказов во времени определяем по формуле

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t}. \quad (3.6)$$

Оценку интенсивности отказов можно определить по формуле

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t}. \quad (3.7)$$

### 3.3 Примеры выполнения работы

#### 3.3.1 Пример 1 – Определение вероятности безотказной работы

Исходные данные:

На стендовые испытания поставили 60 насосов. Испытания проводились в течение 2000 часов. В ходе испытаний отказало 6 насосов.

Задание:

Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы изделий за время 2000 часов.

Решение:

Вероятность безотказной работы  $R(t)$  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы определяется по формуле (3.1)

$$R(t) = 1 - \frac{n(t)}{N},$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени;  
 $n(t)$  – число объектов, отказавших на отрезке от 0 до  $t$ .

Подставляем исходные данные в формулу (3.1)

$$R(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = 1 - \frac{6}{60} = 0,9.$$

Ответ:

Вероятность безотказной работы  $R(t) = 0,9$ .

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.1.

ORIGIN := 1

**Дано:**  
 $N := 60$  - число насосов для испытаний  
 $\text{Рез\_испыт} := \begin{pmatrix} 2000. \\ 6 \end{pmatrix}$  - результаты испытаний  
 $t := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 1 \rangle}$   $t = (2000)$  - время испытаний  
 $n := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 2 \rangle}$   $n = (6)$  - число насосов, отказавших за время испытаний

**Решение:**  
 $R := 1 - \frac{n}{N} = (0.9)$  - вероятность безотказной работы насоса

**Ответ:**  
 Вероятность безотказной работы насоса составляет  **$R = (0.9)$**

Рисунок 3.1 – Протокол выполнения примера 1 "Определение вероятности безотказной работы"

### 3.3.2 Пример 2 – Определение среднего значения наработки до первого отказа

Исходные данные:

В ходе промысловых испытаний  $N = 60$  буровых лебедок зафиксированы отказы  $n_{\text{общ}} = 6$  лебедок – по одной лебедке в следующие периоды наработки  $t_1 = 1210$  ч;  $t_2 = 480$  ч;  $t_3 = 900$  ч;  $t_4 = 700$  ч;  $t_5 = 1900$  ч;  $t_6 = 1100$  ч. Остальные буровые лебедки не отказали. Испытания проводились в течение 2000 часов.

Задание:

Найти статистическую оценку среднего значения наработки до первого отказа.

Решение:

Количество лебедок, выдержавших испытания в течение 2000 часов

$$N(t) = N - n_{\text{общ}} = 60 - 6 = 54 \text{ лебедок}$$

Средняя наработка до отказа по статистическим данным определяется по формуле (3.5)

$$T_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (t_i \cdot N_i) =$$

$$= \frac{1}{60} \cdot (1210 \cdot 1 + 480 \cdot 1 + 900 \cdot 1 + 700 \cdot 1 + 1900 \cdot 1 + 1100 \cdot 1 + 2000 \cdot 54) =$$

$$= 1904,83 \text{ час}$$

Здесь  $N_i$  – количество лебедек, выдержавших испытания к  $i$ -му моменту времени.

Ответ:

Средняя наработка до отказа  $T_0 \approx 1905$  часов.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.2.

**ORIGIN := 1**

**Дано:**

$N := 60.$  - число буровых лебедек для испытаний

$\text{Рез\_испыт} := \begin{pmatrix} 1210. & 480. & 900. & 700. & 1900. & 1100. \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

$t := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 1 \rangle}$  - моменты времени отказов лебедек

$n := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 2 \rangle}$  - число лебедек, отказавших в фиксированные моменты времени

$t_{\text{кон}} := 2000.$  - общее время испытаний лебедек

**Решение:**

1. Число лебедек, не выдержавших испытания до окончания испытаний

$$n_{\text{отказ}} := \sum_{i=1}^{\text{last}(n)} n_i = 6$$

2. Число лебедек, выдержавших испытания к концу испытаний

$$n_{\text{кон}} := N - n_{\text{отказ}} = 54$$

3. Средняя наработка на отказ

$$T_{\text{отказ}} := \frac{1}{N} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{\text{last}(n)} (n_i \cdot t_i) + n_{\text{кон}} \cdot t_{\text{кон}} \right] = 1905$$

**Ответ:**

Средняя наработка на отказ одной лебедеки  **$T_{\text{отказ}} = 1905$**

Рисунок 3.2 – Протокол выполнения примера 2 "Определение среднего значения наработки до первого отказа"

### 3.3.3 Пример 3 – Определение вероятности безотказной работы, вероятности отказа, плотности распределения отказов и интенсивности отказов

Исходные данные:

На испытания поставили 200 изделий. За 100 часов работы отказало 25 изделий. За последующие 10 часов отказало еще 7 изделий.

Задание:

Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы и вероятности отказа на моменты времени  $t_1 = 100$  ч и  $t_2 = 110$  ч, оценку

плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 100$  ч и  $t_2 = 110$  ч.

Решение:

Статистическую оценку вероятности безотказной работы изделия от начала испытаний до момента времени  $t_1 = 100$  ч определяем по формуле (3.1)

$$R(100) = 1 - \frac{n(100)}{N} = 1 - \frac{25}{200} = 0,875;$$

Определяем количество отказавших изделий на момент времени  $t_2 = 110$  ч

$$n(110) = n(100) + \Delta n = 25 + 7 = 32 \text{ изд.}$$

и вероятность безотказной работы изделия от начала испытаний до момента времени  $t_2 = 110$  ч

$$R(110) = 1 - \frac{n(110)}{N} = 1 - \frac{32}{200} = 0,84.$$

Статистическая оценка вероятности отказа на соответствующие моменты времени определяется по формуле (3.3)

$$Q(100) = 1 - R(100) = 0,125,$$

$$Q(110) = 1 - R(110) = 0,16.$$

Плотность распределения отказов за промежутки времени  $\Delta t = t_2 - t_1 = 10$  ч определяем по формуле (3.6)

$$f(110) = \frac{\Delta n(110)}{N \cdot \Delta t} = \frac{7}{200 \cdot 10} = 0,0035 \text{ 1/ч.}$$

Оценку интенсивности отказов за промежутки времени  $\Delta t = 10$  ч можно определить по формуле (3.7)

$$\lambda(110) = \frac{\Delta n(110)}{(N - n(110)) \cdot \Delta t} = \frac{7}{(200 - 32) \cdot 10} = 0,00417 \text{ 1/ч.}$$

Ответ:

$$R(100) = 0,875; \quad R(110) = 0,84; \quad Q(100) = 0,125; \quad Q(110) = 0,16; \\ f(110) = 0,0035 \text{ 1/ч; } \lambda(110) = 0,00417 \text{ 1/ч.}$$

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.3.

### 3.4 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 3.1

На испытание поставлено 200 однотипных изделий. За 2000 ч отказало 50 изделий. За последующие 100 часов отказало ещё 5 изделий. Требуется определить:

а) Статистическую оценку вероятности безотказной работы за время работы  $t_1 = 2000$  час и  $t_2 = 2100$  час;

б) Статистическую оценку вероятности отказа за время работы  $t_1 = 2000$  час и  $t_2 = 2100$  час;

в) Оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 2000$  час и  $t_2 = 2100$  час.

ORIGIN := 1

**Дано:**

$N := 200$  - число изделий для испытаний

$\text{Рез\_испыт} := \begin{pmatrix} 100 & 10 \\ 25 & 7 \end{pmatrix}$   $\Delta t := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 1 \rangle}$  - интервалы времени отказов изделий

$\Delta n := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 2 \rangle}$  - число отказов в интервалах времени  
- число интервалов времени

$n\_кон := \text{last}(\Delta t) = 2$

$j := 1..n\_кон$   $\tau_j := \sum_{i=1}^j \Delta t_i$   $\tau = \begin{pmatrix} 100 \\ 110 \end{pmatrix}$  - текущее время в конце каждого интервала

$n\_отказ_j := \sum_{i=1}^j \Delta n_i$   $n\_отказ = \begin{pmatrix} 25 \\ 32 \end{pmatrix}$  - общее число отказов, накопившееся к концу каждого интервала

**Решение:**

- Вероятность безотказной работы изделия на момент времени  $\tau_1 = 100$  часов  
 $R_1 := 1 - \frac{n\_отказ_1}{N}$   $R_1 = 0.875$
- Вероятность безотказной работы изделия на момент времени  $\tau_2 = 110$  часов  
 $R_2 := 1 - \frac{n\_отказ_2}{N}$   $R_2 = 0.84$
- Вероятность отказа на моменты времени  $\tau^T = (100 \ 110)$   
 $Q := 1 - R$   $Q^T = (0.125 \ 0.16)$
- Плотность распределения отказов в промежутки времени от 0 до  $\tau_1 = 100$  и от  $\tau_1 = 100$  до  $\tau_2 = 110$   
 $f := \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta t}$   $f^T = (0.00125 \ 0.00350)$  1/час
- Интенсивность отказов в промежутки времени от 0 до  $\tau_1 = 100$  и от  $\tau_1 = 100$  до  $\tau_2 = 110$   
 $j := 1..n\_кон$   
 $\lambda_j := \frac{\Delta n_j}{(N - n\_отказ_j) \cdot \Delta t_j}$   $\lambda^T = (0.00143 \ 0.00417)$  1/час

**Ответ:**  $R_1 = 0.875$   $R_2 = 0.84$   $Q_1 = 0.125$   $Q_2 = 0.16$   
 $f_1 = 0.00125$  1/час  $f_2 = 0.00350$  1/час  $\lambda_1 = 0.00143$  1/час  $\lambda_2 = 0.00417$  1/час

Рисунок 3.3 – Протокол выполнения примера 3 "Определение вероятности безотказной работы, вероятности отказа, плотности распределения отказов и интенсивности отказов"

### Задача 3.2

На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 часов работы отказало 50 изделий. Определить статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа за время работы 4000 часов.

### Задача 3.3

На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 часов работы отказало 50 изделий. За последующие 50 часов еще 5 изделий. Дать оценку

плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 4000$  час и  $t_2 = 4050$  час.

#### Задача 3.4

В течение 500 часов работы из 20 буровых насосов отказало 2. За интервал времени 500 – 520 часов отказал еще один буровой насос. Дать оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 500$  час и  $t_2 = 520$  час.

#### Задача 3.5

На испытание поставлено 2000 подшипников качения. За первые 3000 часов отказало 80 изделий. За интервал времени 3000 – 4000 часов отказало еще 50 подшипников. Требуется определить статистическую оценку вероятности безотказной работы за время 4000 часов.

#### Задача 3.6

В течение 500 часов работы из 20 буровых насосов отказало 2. За интервал времени 500 – 520 часов отказал еще один буровой насос. Требуется определить статистическую оценку вероятности отказа за время 520 часов.

#### Задача 3.7

На испытание поставлено 600 изделий. За время 1200 часов вышло из строя 125 штук изделий. За последующий интервал времени 1200 – 1250 часов вышло из строя еще 13 изделий. Необходимо определить статистическую оценку вероятности безотказной работы и вероятности отказа за время работы  $t_1 = 1200$  час и  $t_2 = 1250$  час; оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 1200$  час и  $t_2 = 1250$  час.

#### Задача 3.8

На испытание поставлено 10 однотипных изделий. Получены следующие значения времени безотказной работы:  $t_1 = 580$  час;  $t_2 = 720$  час;  $t_3 = 860$  час;  $t_4 = 550$  час;  $t_5 = 780$  час;  $t_6 = 830$  час;  $t_7 = 910$  час;  $t_8 = 850$  час;  $t_9 = 840$  час;  $t_{10} = 750$  час. Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

### **3.5 Контрольные вопросы по практической работе**

- 1) Что такое безотказность?
- 2) Какие показатели надежности являются показателями безотказности?
- 3) Что такое вероятность безотказной работы?
- 4) Что такое вероятность отказа?
- 5) Как определяются статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа?
- 6) Как определяется плотность распределения наработки?
- 7) Что такое интенсивность отказов?

## 4 Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным с помощью пакета MathCAD<sup>4</sup>

### 4.1 Методика определения показателей безотказности на определенном промежутке времени

Показатели безотказности определяются для каждого интервала в следующей последовательности:

Определяем количество отказавших деталей нарастающим итогом на конец каждого периода по формуле

$$n(t_{i+1}) = n(t_i) + \Delta n(t_i). \quad (4.1)$$

Определяем количество работоспособных изделий  $N(t)$  на конец каждого периода по формуле

$$N(t) = N - n(t), \quad (4.2)$$

где  $n(t)$  – количество отказавших изделий на конец рассматриваемого периода за период от 0 до  $t$ .

Определяем статистическую оценку вероятности безотказной работы на конец каждого периода по формуле

$$R(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}. \quad (4.3)$$

Определяем статистическую оценку вероятности отказа на конец каждого периода по формуле

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N} = 1 - R(t). \quad (4.4)$$

Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов в данном временном интервале  $\Delta t$  по формуле

$$f(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (4.5)$$

где  $\Delta n(\Delta t)$  – количество отказавших изделий в данном временном интервале  $\Delta t$ .

Определяем значение интенсивности отказов в данном временном интервале  $\Delta t$  по формуле

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t}. \quad (4.6)$$

---

<sup>4</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [2, 3]

## 4.2 Примеры выполнения работы

### 4.2.1 Пример 1 – Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным

#### Исходные данные:

Число изделий, поставленных на испытание,  $N = 1000$  изделий. Испытания проводятся в течение 1000 часов. Каждые 100 часов определялось количество отказов изделий. Результаты испытаний представлены в таблице 4.1 (1 и 2 столбцы).

#### Задание:

а) Найти статистическую оценку распределения вероятностей безотказной работы  $R(t)$  и вероятностей отказа  $Q(t)$  во времени.

б) Найти изменение плотности вероятности отказов  $f(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda(t)$  по времени.

в) Результаты расчета  $R(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  отразить на графиках.

#### Решение.

Согласно условию задачи длина рассматриваемых периодов  $\Delta t$  равна 100 часам

$$\Delta t = 100 \text{ час.}$$

В начальный период времени изделия должны находиться в работоспособном состоянии и количество отказавших изделий на время  $t = 0$  равно 0, следовательно

$$R(0) = 1,0.$$

$$Q(0) = 0.$$

Определяем количество работоспособных изделий на конец первого периода по формуле (4.2)

$$N(100) = N - n(100) = 1000 - 50 = 950 \text{ шт.}$$

Определяем статистическую оценку вероятности безотказной работы на конец 1-го периода по формуле (4.3)

$$R(100) = 1 - \frac{n(100)}{N} = \frac{N(100)}{N} = \frac{950}{1000} = 0,95.$$

Определяем количество отказавших деталей нарастающим итогом на конец первого периода по формуле (4.1)

$$n(t_1) = n(t_0) + \Delta n(t_1) = 0 + 50 = 50 \text{ шт.}$$

Определяем статистическую оценку вероятности отказа на конец каждого периода по формуле (4.4)

$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - 0,95 = 0,05.$$

Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов по формуле (4.5)

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 100} = 0,0005 \text{ 1/ч.}$$

Определяем значение интенсивности отказов по формуле (4.6)

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t} = \frac{50}{(1000 - 50) \cdot 100} = 0,00052632 \text{ 1/ч.}$$

Аналогично проводим расчеты для всех остальных периодов и результаты расчета для удобства сводим в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета статистических оценок показателей безотказности

Временной интервал $\Delta t$ , час	Кол-во отказов за данный интервал $\Delta n(\Delta t)$ , шт.	Кол-во работоспособных изделий на конец периода $N(t)$ , шт.	Кол-во отказавших изделий на конец периода $n(t)$ , шт.	Вероятность безотказной работы $R(t)$	Вероятность отказа $Q(t)$	Плотность вероятности отказов $f(t)$ , 1/час	Интенсивность отказов $\lambda(t)$ , 1/час
0-0	0	1000	0	1	0	–	–
0-100	50	950	50	0,95	0,05	0,0005	0,000526
100-200	40	910	90	0,91	0,09	0,0004	0,000440
200-300	20	890	110	0,89	0,11	0,0002	0,000225
300-400	20	870	130	0,87	0,13	0,0002	0,000230
400-500	10	860	140	0,86	0,14	0,0001	0,000116
500-600	70	790	210	0,79	0,21	0,0007	0,000886
600-700	110	680	320	0,68	0,32	0,0011	0,001618
700-800	280	400	600	0,4	0,6	0,0028	0,007000
800-900	250	150	850	0,15	0,85	0,0025	0,016667
900-1000	150	0	1000	0	1	0,0015	–

По данным расчета строим графики зависимости расчетных величин по времени (рисунки 4.1, 4.2, 4.3).

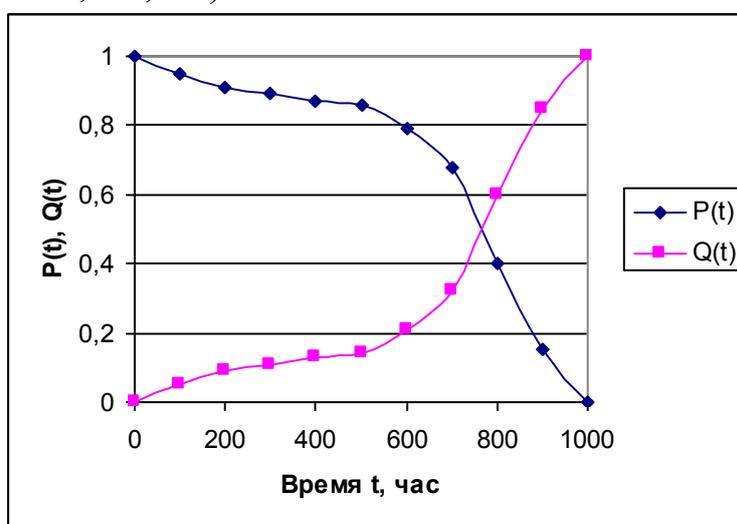


Рисунок 4.1 – График зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от времени

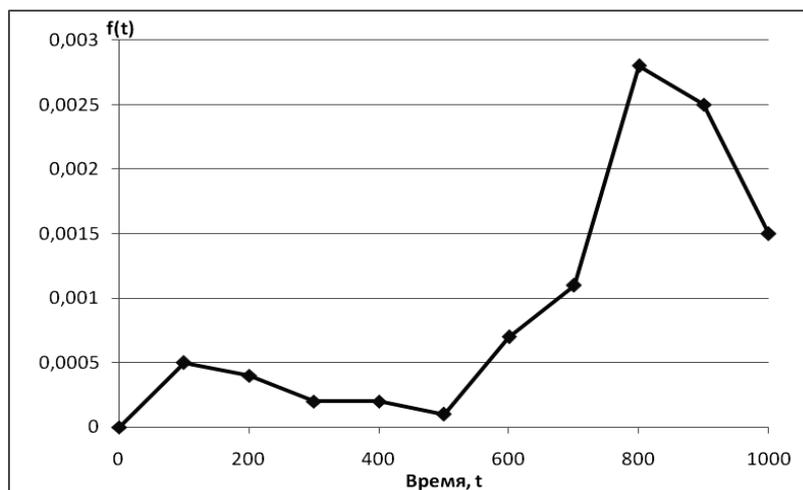


Рисунок 4.2 – График зависимости плотности распределения отказов во времени

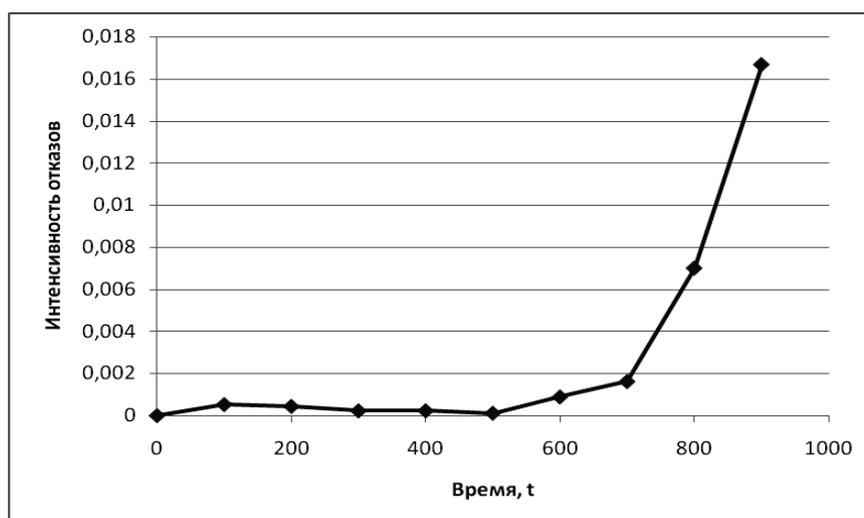


Рисунок 4.3 – График зависимости интенсивности отказов от времени

Ответ:

Статистическая оценка распределения вероятностей безотказной работы  $R(t)$ , вероятностей отказа  $Q(t)$ , плотности вероятности отказов  $f(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda(t)$  во времени приведены в таблице 4.1 и отражены на графиках 4.1-4.3.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунках 4.4а, 4.4б.

ORIGIN := 1

Дано:

$N = 1000$ . - число изделий для испытаний

$$\text{Рез\_испыт} := \begin{pmatrix} 100 & 200 & 300 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 1000 \\ 50 & 40 & 20 & 20 & 10 & 70 & 110 & 280 & 250 & 150 \end{pmatrix}$$

Текущее время испытаний:

$$t := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 1 \rangle}$$

$t^T =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

$$\Delta t_1 := t_1 - 0 \quad j = 2.. \text{last}(t)$$

$$\Delta t_j := t_j - t_{j-1} \quad \text{- интервал времени для фиксации количества отказов}$$

$\Delta t^T =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

$$\Delta n := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 2 \rangle}$$

Число изделий, отказавших за прошедший интервал времени:

$\Delta n^T =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	1	50	40	20	20	10	70	110	280	250	150

Проверка правильности ввода числа отказавших изделий по интервалам времени:

$\text{last}(t)$

$$\sum_{i=1}^{\text{last}(t)} (\Delta n)_i = 1000 \quad \text{- это число должно быть не больше числа изделий для испытаний } N = 1000$$

Решение:

1. Число изделий, отказавших за время от начала испытаний:

$$j = 1.. \text{last}(t) \quad n_{\text{отказ}_j} := \sum_{i=1}^j \Delta n_i$$

$n_{\text{отказ}}^T =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	50	90	110	130	140	210	320	600	850	1000

2. Вероятность безотказной работы изделия:

$$R = 1 - \frac{n_{\text{отказ}}}{N}$$

$R^T =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	0.95	0.91	0.89	0.87	0.86	0.79	0.68	0.4	0.15	0

3. Вероятность отказа работы изделия:

$$Q = 1 - R$$

$Q^T =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	0.05	0.09	0.11	0.13	0.14	0.21	0.32	0.6	0.85	1

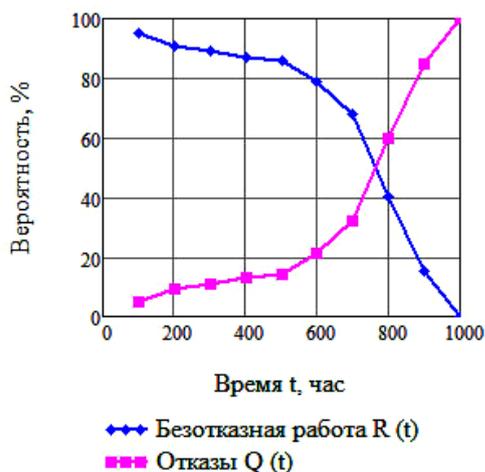


Рисунок 4.4а – Протокол выполнения примера 1 "Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным"

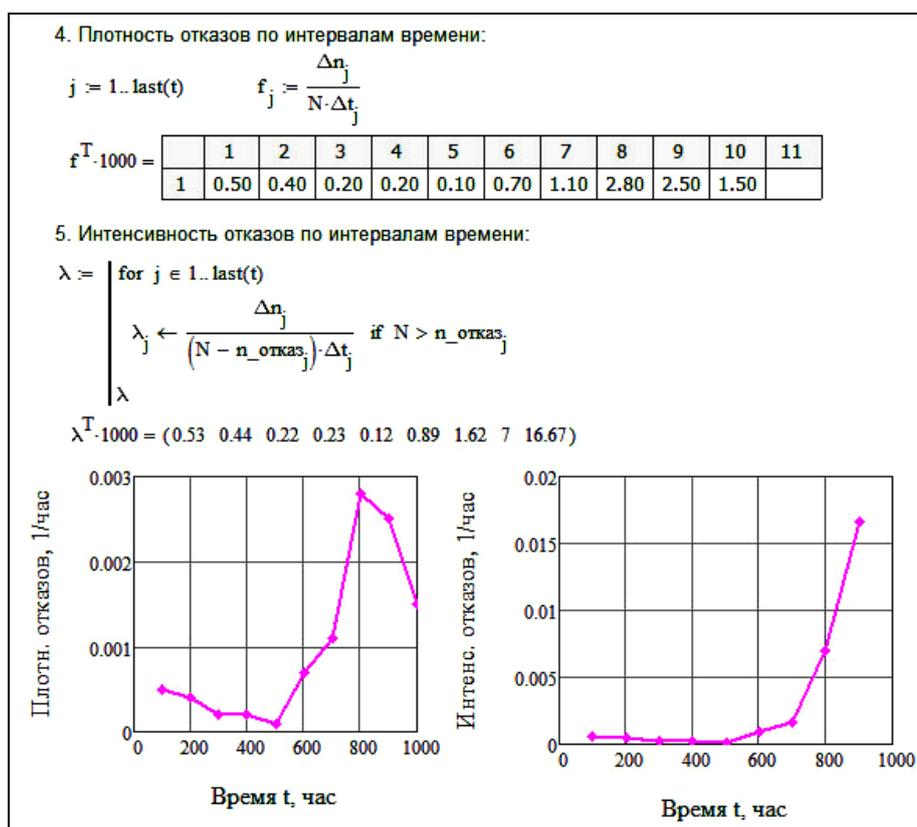


Рисунок 4.4б – Протокол выполнения примера 1 "Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным" (продолжение рисунка 4.4а)

### 4.3 Задания для самостоятельной работы

#### Исходные данные:

На испытание поставлено  $N$  изделий. Испытания проводятся в течение 1000 часов. Результаты испытаний представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные для самостоятельной работы

Номер варианта	Общее кол-во изделий	Количество отказавших изделий за интервал времени $\Delta t_i$ , шт.									
		0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
1	3007	49	99	88	554	594	542	580	86	87	40
2	2379	68	41	37	434	501	282	471	74	77	99
3	2754	75	97	65	554	305	410	407	83	96	82
4	2415	67	56	81	346	405	442	490	57	35	60
5	2785	51	89	98	383	497	575	501	35	92	60
6	2303	63	73	94	263	261	493	484	52	64	87
7	2430	44	62	44	299	482	362	436	49	84	68
8	2337	99	44	75	299	575	411	217	36	46	55
9	2217	66	43	57	395	218	355	510	67	90	58
10	1940	61	66	71	232	376	226	305	72	37	81
11	1913	60	50	100	259	363	438	250	58	58	73
12	2511	72	84	100	377	533	374	520	75	52	44

Задание:

а) Найти статистическую оценку распределения вероятностей отказа  $Q(t)$  и безотказной работы  $R(t)$  во времени.

б) Найти изменение плотности вероятности отказов  $f(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda(t)$  по времени.

в) Результаты расчета отразить на графиках.

#### **4.4 Контрольные вопросы по практической работе**

1) Какие основные свойства функции вероятности безотказной работы?

2) Какие основные свойства функции вероятности отказа?

3) Каким образом определяется плотность распределения наработки во времени?

4) Как изменяется кривая зависимости интенсивности отказа во времени?

5) Как изменяется кривая плотности распределения отказов во времени.

## 5 Определение единичных и комплексных показателей восстанавливаемых объектов с помощью пакета MathCAD<sup>5</sup>

### 5.1 Единичные и комплексные показатели надежности

Восстанавливаемый объект – объект, восстановление работоспособного состояния которого предусмотрено документацией.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Показателями безотказности для восстанавливаемых объектов являются вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, средняя наработка до отказа, средняя наработка между отказами, гамма-процентная наработка между отказами, интенсивность отказов, параметр потока отказов, средний и стационарный параметр потока отказов.

Гамма-процентная наработка между отказами – наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Средняя наработка между отказами – математическое ожидание наработки объекта между отказами.

Параметр потока отказов (мгновенный) – предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к длительности этого интервала, стремящейся к нулю.

Средний параметр потока отказов – среднее значение мгновенного параметра потока отказов за данный интервал времени.

Стационарный параметр потока отказов – предел мгновенного параметра потока отказов при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности.

Долговечность – свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния.

Показателями долговечности по ГОСТ 27.002-2015 являются гамма-процентный ресурс, средний ресурс, гамма-процентный срок службы, средний срок службы.

Гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния, с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

---

<sup>5</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [2, 3]

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния, с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Восстанавливаемость – свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.

Показателями ремонтпригодности и восстанавливаемости являются вероятность восстановления, среднее время восстановления, гамма-процентное время восстановления, среднее время до восстановления, гамма-процентное время до восстановления, интенсивность восстановления.

Вероятность восстановления – вероятность того, что время (до) восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение. Вероятность восстановления может относиться как к времени восстановления, так и к времени до восстановления.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления.

Среднее время до восстановления – математическое ожидание времени до восстановления.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Гамма-процентное время до восстановления – длительность времени до восстановления, которая не будет превышена с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования.

Показателями сохраняемости являются гамма-процентный срок сохраняемости, средний срок сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Готовность – свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Показатели готовности не являются единичными показателями, так как готовность представляет собой совокупность свойств.

Комплексными показателями являются коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности.

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени. При расчетах мгновенного (нестационарного) коэффициента готовности могут исключаться планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Средний коэффициент готовности – среднее значение мгновенного коэффициента готовности за данный промежуток времени.

Стационарный коэффициент готовности – предел мгновенного коэффициента готовности при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности.

Коэффициент неготовности – вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в данный момент времени. При расчетах мгновенного (нестационарного) коэффициента неготовности могут исключаться планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Средний коэффициент готовности – среднее значение мгновенного коэффициента готовности за данный промежуток времени.

Стационарный коэффициент готовности – предел мгновенного коэффициента готовности при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

При определении показателей используются следующие временные понятия:

– наработка между отказами – наработка объекта между двумя следующими друг за другом отказами;

– ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния;

– срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния;

– срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и/или транспортирования объекта, в течение которой он сохраняет работоспособное состояние;

– время восстановления – время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по восстановлению объекта;

– время до восстановления – время от момента отказа до восстановления работоспособного состояния.

## 5.2 Методика расчета показателей надежности по статистическим данным

Средний ресурс определяется по формуле

$$T_p = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N T_{pi}, \quad (5.1)$$

где  $T_{pi}$  – ресурс  $i$ -го изделия,  $N$  – количество объектов, поставленных на испытания или эксплуатацию.

Для нахождения гамма-процентного ресурса необходимо найти такое значение суммарной наработки, вероятность которой равна  $\gamma$ , выраженной в процентах, исходя из условия

$$P(T_{py}) = \frac{\gamma}{100}. \quad (5.2)$$

Значения среднего срока службы и гамма-процентного срока службы определяются аналогично.

Статистическая оценка среднего времени восстановления вычисляется по формуле

$$T_B = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m T_{Bi}, \quad (5.3)$$

где  $T_{Bi}$  – время восстановления  $i$ -го изделия,  $m$  – количество восстановлений рассматриваемых объектов.

Коэффициент готовности  $K_r$  определяется по формуле

$$K_r = \sum_{i=1}^N t_i / \left( \sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \right), \quad (5.4)$$

где  $t_i$  – наработка на отказ  $i$ -го объекта,  $\tau_i$  – время восстановления  $i$ -го объекта,  $N$  – количество рассматриваемых объектов.

Коэффициент технического использования определяется по формуле

$$K_{\text{т.и}} = \frac{T_0}{T_0 + \tau_{\text{ТО}} + \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{в}}}, \quad (5.5)$$

где  $T_0$  – суммарная наработка объекта,  $\tau_{\text{ТО}}$  – время планового технического обслуживания,  $\tau_{\text{р}}$  – время, затрачиваемое на плановый ремонт,  $\tau_{\text{в}}$  – время, затраченное на внеплановые восстановления.

### 5.3 Примеры выполнения работы

#### 5.3.1 Пример 1 – Определение средней наработки до отказа и среднего ресурса работы

Исходные данные:

На промышленные испытания поставлено 3 буровых насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 144 отказа, у второго – 160 отказов, у третьего – 157 отказов. Суммарная наработка на отказ для первого насоса составила 3250 часов, для второго – 3600 часов, для третьего – 2800 часов.

Задание:

Определить среднюю наработку до отказа и средний ресурс бурового насоса.

Решение:

Средняя наработка до отказа определяется по формуле (3.5)

$$T_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{сум}}}{n(t_{\text{сум}})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{144 + 160 + 157} = 20,9 \text{ час.}$$

Средний ресурс определяем по формуле (5.1)

$$T_{\text{р}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{pi}}}{N} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{3} = 3216,7 \text{ час.}$$

Ответ:

Средняя наработка до отказа равна  $T_{\text{ср}} = 20,9$  час.

Средний ресурс равен  $T_{\text{р}} = 3216,7$  час.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.1.

ORIGIN := 1

**Дано:**

$N := 3$  - число насосов для испытаний

$\text{Рез\_испыт} := \begin{pmatrix} 144 & 160 & 157 \\ 3250 & 3600 & 2800 \end{pmatrix}$

$m := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 1 \rangle}$       $m^T = (144 \ 160 \ 157)$  - число отказов по каждому насосу

$t := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 2 \rangle}$       $t^T = (3250 \ 3600 \ 2800)$  - суммарная наработка на отказ по каждому насосу

**Решение:**

1. Средняя наработка до отказа насоса, час

$$T_{\text{ср}} := \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = 20.9$$

2. Средний ресурс работы насоса, час

$$T_{\text{рес}} := \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = 3216.7$$

**Ответ:**  
Средняя наработка до отказа насоса равна  $T_{\text{ср}} = 20.9$  час  
Средний ресурс работы насоса  $T_{\text{рес}} = 3216.7$  час

Рисунок 5.1 – Протокол выполнения примера 1 "Определение средней наработки до отказа и среднего ресурса работы"

### 5.3.2 Пример 2 – Определение гамма-процентного ресурса

#### Исходные данные:

На испытания поставлено 500 изделий. Результаты определения ресурса представлены в таблице 5.1.

#### Задание:

По данным испытаний определить гамма-процентный ресурс для  $\gamma = 95\%$ ,  $90\%$  и  $80\%$ .

Таблица 5.1 – Результаты испытаний изделий

№	Интервал времени, час	Кол-во отказавших изделий $n(t)$ , шт.	№	Интервал времени, час	Кол-во отказавших изделий $n(t)$ , шт.
1	0 – 100	24	6	500 – 600	20
2	100 – 200	29	7	600 – 700	35
3	200 – 300	35	8	700 – 800	57
4	300 – 400	15	9	800 – 900	133
5	400 – 500	16	10	900 – 1000	136

#### Решение:

Для определения гамма-процентного ресурса необходимо найти значение наработки, вероятность которой равна  $0,95$ ;  $0,90$ ;  $0,80$ , согласно формуле

$$R(T_{\gamma}) = \frac{\gamma}{100}.$$

Определим количество работоспособных изделий и вероятность безотказной работы на конец каждого временного интервала, результаты расчета сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета

№№	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий $n(t)$ , шт.	Количество работоспособных изделий $N(t)$ к концу периода, шт.	Вероятность безотказной работы $R(t)$
<b>1</b>	<b>0 - 100</b>	<b>24</b>	<b>476</b>	<b>0,952</b>
<b>2</b>	<b>100 - 200</b>	<b>29</b>	<b>447</b>	<b>0,894</b>
<b>3</b>	<b>200 - 300</b>	<b>35</b>	<b>412</b>	<b>0,824</b>
4	300 - 400	15	397	0,794
5	400 - 500	16	381	0,762
6	500 - 600	20	361	0,722
7	600 - 700	35	326	0,652
8	700 - 800	57	269	0,538
9	800 - 900	133	136	0,272
10	900 - 1000	136	0	0

По представленному расчету вероятностям 0,95; 0,90 и 0,80 (не менее) соответствуют значения наработки равные 100, 100 и 300 часов соответственно (выделены в таблице 5.2).

Ответ:

Гамма-процентные ресурсы равны  $T_{p,\gamma 95\%} = 100$  часов;  $T_{p,\gamma 90\%} = 100$  часов;  $T_{p,\gamma 80\%} = 300$  часов.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.2.

### 5.3.3 Пример 3 – Определение среднего времени восстановления изделия

Исходные данные:

В результате наблюдений за работой буровой лебедки получены следующие данные о времени, затраченном на смену тормозных лент, в часах: 2,5; 1,8; 1,8; 2,6; 0,8; 1,2; 0,6; 2,0; 1,6; 3.2. Всего 10 наблюдений.

Задание:

Определить среднее время восстановления буровой лебедки.

ORIGIN := 1

**Дано:**  
 $N := 500$  - число изделий для испытаний  
 $\text{Рез\_испыт} := \begin{pmatrix} 100 & 200 & 300 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 1000 \\ 24 & 29 & 35 & 15 & 16 & 20 & 35 & 57 & 133 & 136 \end{pmatrix}$

$t := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 1 \rangle}$  - моменты времени отказов лебедек  
 $n := (\text{Рез\_испыт}^T)^{\langle 2 \rangle}$  - число изделий, отказавших в интервалах времени

**Проверка:** Общее количество изделий, отказавших к концу испытаний  
 $n_{\Sigma} := \sum_{i=1}^{\text{last}(n)} n_i = 500$  должно быть не больше числа испытуемых изделий:  $N = 500$

$\gamma\%_1 = 95$ .  $\gamma\%_2 = 90$ .  $\gamma\%_3 = 80$ . - вероятность (%), с которой изделие будет работоспособным в какой-то момент времени работы

**Решение:**

1. Число работоспособных изделий в конце каждого периода испытаний

$$j := 1.. \text{last}(n) \quad n_{\text{раб}}_j := N - \sum_{i=1}^j n_i$$

$n_{\text{раб}}^T =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	476	447	412	397	381	361	326	269	136	0

2. Вероятность безотказной работы в конце каждого периода испытаний

$$Q := \frac{n_{\text{раб}}}{N}$$

$Q^T =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	0.952	0.894	0.824	0.794	0.762	0.722	0.652	0.538	0.272	0

3. Гамма-процентные ресурсы

$$\text{Tr}(\gamma) := \begin{cases} \text{flag} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1.. \text{last}(t) \\ \text{if } Q_i < \frac{\gamma}{100} \wedge \text{flag} = 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{Tr} \leftarrow t_{i-1} \\ \text{flag} \leftarrow 1 \end{array} \right. \\ \text{Tr} \end{cases}$$

$$\text{Trес}_1 := \text{Tr}(\gamma\%_1) = 100$$

$$\text{Trес}_2 := \text{Tr}(\gamma\%_2) = 100$$

$$\text{Trес}_3 := \text{Tr}(\gamma\%_3) = 300$$

$\text{Trес}^T = (100 \ 100 \ 300)$

**Ответ:**  
 Вероятностям  $\gamma\%_1 = 95\%$ ;  $\gamma\%_2 = 90\%$  и  $\gamma\%_3 = 80\%$  соответствуют значения гамма-процентные ресурсы (наработки) равные  $\text{Trес}_1 = 100$ ,  $\text{Trес}_2 = 100$  и  $\text{Trес}_3 = 300$  часов соответственно

Рисунок 5.2 – Протокол выполнения примера 2 "Определение гамма-процентного ресурса"

Решение:

Статистическая оценка среднего времени восстановления вычисляется по формуле (5.3)

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m T_{Bi}}{m} = \frac{2,5 + 1,8 + 1,8 + 2,6 + 0,8 + 1,2 + 0,6 + 2,0 + 1,6 + 3,2}{10} = 1,81 \text{ ч,}$$

Ответ:

Среднее время восстановления равно  $T_B = 1,81$  часа.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.3.

```

ORIGIN := 1
Дано:
Твосст := (2.5 1.8 1.8 2.6 0.8 1.2 0.6 2.0 1.6 3.2)T
n_кон := last(Твосст) = 10      - число наблюдений за сменой буровых лент
Решение:
1. Среднее время восстановления буровой лебедки, час

$$Твосст_{ср} := \frac{\sum_{i=1}^{n_{кон}} Твосст_i}{n_{кон}} = 1.81$$

Ответ:
Среднее время восстановления равно Твосст_ср = 1.81 час

```

Рисунок 5.3 – Протокол выполнения примера 3 "Определение среднего времени восстановления изделия"

### 5.3.4 Пример 4 – Определение коэффициента готовности системы

#### Исходные данные:

Среднее время восстановления системы равно 2 часа, а средняя наработка на отказ равна 100 часов.

#### Задание:

Определить коэффициент готовности системы.

#### Решение:

Среднее значение коэффициента готовности  $K_r$  вычисляют по формуле (5.4)

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\left( \sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \right)} = \frac{100}{100 + 2} = \frac{100}{102} = 0,984.$$

#### Ответ:

Коэффициент готовности равен  $K_r = 0,984$ .

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.4.

```

ORIGIN := 1
Дано:
Твосст_ср := 2.          - среднее время восстановления, час
Готказ_ср := 100.       - средняя наработка на отказ, час
Решение:
1. Среднее значение коэффициента готовности, б/р

$$K_r := \frac{Готказ_ср}{Готказ_ср + Твосст_ср} = 0.980$$

Ответ:
Коэффициент готовности равен K_r = 0.98

```

Рисунок 5.4 – Протокол выполнения примера 4 "Определение коэффициента готовности системы"

### 5.3.5 Пример 5 – Определение коэффициента технического использования системы

#### Исходные данные:

Система эксплуатируется в течение 1 года, годовой фонд времени системы составляет 8760 часов. Время проведения ежегодного техосмотра

составляет 20 суток, суммарное время, затраченное на ремонтные работы, составляет 20 часов.

Задание:

Определить коэффициент технического использования системы.

Решение:

Коэффициент технического использования определяется по формуле (5.5)

$$K_{\text{т.и}} = \frac{T_0}{T_0 + \tau_{\text{т.и}} + \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{в}}} = \frac{8760 - (20 \cdot 24 + 20)}{(8760 - (20 \cdot 24 + 20) + (20 \cdot 24 + 20))} = 0,943.$$

Ответ:

Коэффициент технического использования равен  $K_{\text{т.и}} = 0,943$ .

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.5.

ORIGIN := 1

**Дано:**

T\_год := 8760. - годовой фонд времени системы, час  
T\_техосм := 20. - длительность ежегодного техосмотра системы, сут  
T\_ремонт := 20. - длительность ремонтных работ системы, час

**Решение:**

1. Суммарная наработка системы, час  
T\_о := T\_год - (T\_техосм·24 + T\_ремонт) = 8260

2. Коэффициент технического использования системы, б/р  
K\_ти :=  $\frac{T_о}{T_год} = 0.943$

**Ответ:**  
Коэффициент технического использования равен K\_ти = 0.943

Рисунок 5.5 – Протокол выполнения примера 5 "Определение коэффициента технического использования системы"

## 5.4 Задания для самостоятельной работы

### Задача 5.1

На промышленные испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммарная наработка на отказ для первого насоса составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить среднюю наработку на отказ.

### Задача 5.2

На эксплуатацию поставлено 250 изделий. На моменты времени  $t_1 - t_7$  зафиксировано определенное количество отказов (таблица 5.3). Остальные изделия не отказали. Определить средний ресурс.

Таблица 5.3 – Исходные данные к задаче 5.2

Время работы изделий – $t_i$ , час	50	100	150	200	250	300	350
Количество отказов – $n(t_i)$	5	8	11	15	21	31	9

### Задача 5.3

На промышленные испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммарная наработка до отказа для первого насоса составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить средний ресурс насоса.

### Задача 5.4

Длительность проведения технического обслуживания для бурового насоса составляет 45 часов. Межремонтный цикл составляет 2335 часов. Определить коэффициент готовности бурового насоса.

### Задача 5.5

Какую длительность восстановления работоспособности должен иметь объект с межремонтным циклом 2000 часов, чтобы коэффициент готовности объекта составлял 0,95.

### Задача 5.6

Определить среднее время восстановления компрессора, если на проведение 5 мелких ремонтов было затрачено 30,5 часа.

### Задача 5.7

Годовое время работы одной буровой лебедки составляет 3500 часов. За год проводится 4 технических обслуживания продолжительностью 65 часов каждое и 1 средний ремонт продолжительностью 360 часов. Определить коэффициент технического использования буровой лебедки.

### Задача 5.8

Годовое время работы одной буровой лебедки составляет 3500 часов. За год проводится 4 технических обслуживания продолжительностью 65 часов каждое и 1 средний ремонт продолжительностью 360 часов. Определить коэффициент готовности буровой лебедки.

### Задача 5.9

В ходе наблюдений за работой турбобура были зафиксированы отказы в следующие моменты времени: 110, 167, 284, 365, 512, 650 часов работы. Определить среднюю наработку между отказами турбобура.

### Задача 5.10

В ходе наблюдений за работой турбобура были зафиксированы отказы в следующие моменты времени: 110, 167, 284, 365, 512, 650 часов работы. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа за 300 и 600 часов работы.

## **5.5 Контрольные вопросы по практической работе**

- 1) Какие показатели используются при определении долговечности?
- 2) Как определяются средний и гамма-процентный ресурс?
- 3) Как определяются средний и гамма-процентный срок службы?

## 6 Проверочный расчет тонкостенного аппарата под внутренним давлением с помощью пакета MathCAD<sup>6</sup>

### 6.1 Задание

В аппарате (рис. 6.1) над жидкостью находится газ с избыточным давлением " $P$ ". Плотность жидкости " $\rho$ ". Аппарат состоит из сферической крышки радиусом " $R_{ш}$ ", цилиндрической обечайки с внутренним диаметром " $D$ " и высотой " $h_{ц}$ ", конического днища высотой " $h_{к}$ ". Толщина элементов аппарата составляет " $S$ ". Доля заполнения цилиндрической обечайки жидкостью составляет " $k_3$ ". Допустимое напряжение материала аппарата на растяжение составляет " $[\sigma]$ ".

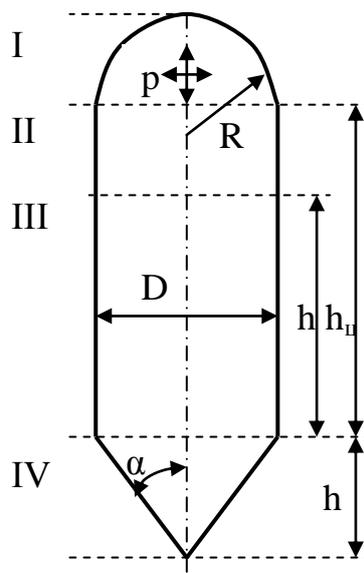


Рисунок 6.1 – Розрахункова схема апарата

Определить:

- а) величины меридионального " $\sigma_u$ " и кольцевого " $\sigma_t$ " напряжений в элементах аппарата;
- б) сделать проверку выполнения условий прочности в элементах аппарата;
- в) построить эпюры распределения напряжений в элементах аппарата.

Исходные данные к работе по вариантам приведены в табл. 6.1.

<sup>6</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [4, 5]

Таблица 6.1 – Исходные данные к работе

Вариант	Размеры элементов аппарата								
	$R_{ш}, м$	$D, м$	$h_{ц}, м$	$h_{к}, м$	$S, мм$	$k_3$	$P, кПа$	$\rho, кг/м^3$	$[\sigma], МПа$
1	3	2	5	2	5	0,9	35	1200	80
2	3	1,5	4	1	6	0,9	35	1200	80
3	2	1,5	3	1	5	0,9	35	1200	80
4	3,5	5	5	2	5	0,9	35	1200	80
5	3	4,5	5	2	6	0,9	35	1200	80
6	3	4	5	1,2	4	0,9	35	1200	80
7	2,5	4	5,5	1,5	5	0,9	35	1200	80
8	2,1	3	5	1,5	6	0,9	35	1200	80
9	2,2	2,8	4	1,5	6	0,9	35	1200	80
10	1,6	2,5	3	1,2	4	0,9	35	1200	80
11	1,4	2,5	2,5	1,2	4	0,9	35	1200	80
12	1,2	2	2,5	1	4	0,9	35	1200	80

## 6.2 Пример выполнения расчетов на прочность в элементах тонкостенного аппарата

### Исходные данные:

В аппарате над жидкостью находится газ с избыточным давлением  $P = 35$  кПа. Плотность жидкости  $\rho = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. Аппарат состоит из сферической крышки радиусом  $R_{ш} = 3,5$  м, цилиндрической обечайки с внутренним диаметром  $D = 5$  м и высотой  $h_{ц} = 5$  м, конического днища высотой  $h_{к} = 2$  м. Толщина элементов аппарата составляет  $S = 5$  мм. Доля заполнения цилиндрической обечайки жидкостью составляет  $k_3 = 0,9$ . Допустимое напряжение материала аппарата на растяжение составляет  $[\sigma] = 80$  МПа.

### Решение:

В соответствии с расчетной схемой аппарата, приведенной на рисунке 6.1, выполняем расчеты по отдельным элементам.

### **I. Крышка**

Крышка – сферический сегмент радиусом  $R_{ш} = 3,5$  м. Поскольку она работает под газовым давлением  $P$ , то значения меридионального и кольцевого напряжений будут одинаковы (рис. 6.2). Уравнение Лапласа, описывающее условие равновесия сил в элементе имеет вид:

$$\frac{\sigma_u}{R_u} + \frac{\sigma_t}{R_t} = \frac{P}{S}.$$

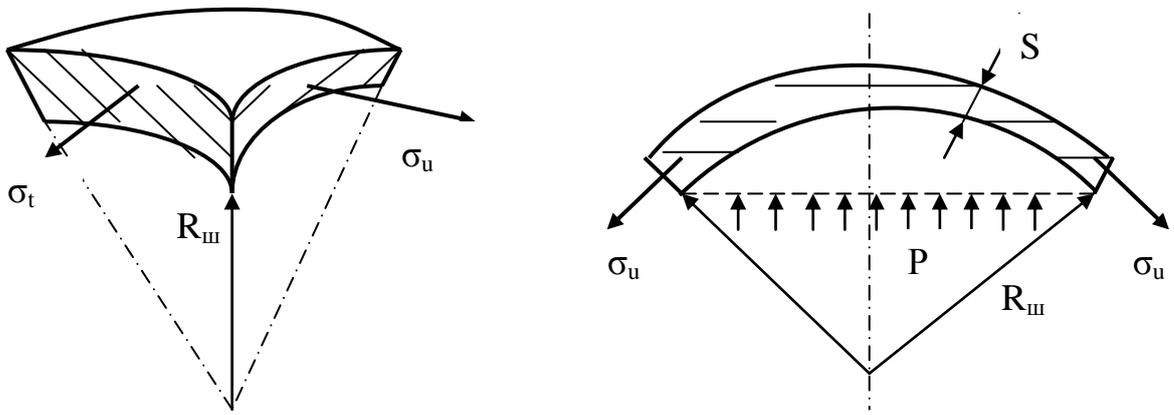


Рисунок 6.2 – Схема действия напряжений в элементе и зоне крышки

1) Меридиональное напряжение:

С учетом того, что  $R_u = R_t = R_ш$  из условия равновесия получаем:

$$\sigma_u = \frac{R_ш \cdot P}{2 \cdot S} = \frac{3,5 \cdot 35000}{2 \cdot 0,005} = 12,25 \text{ МПа} .$$

2) Кольцевое напряжение:

$$\sigma_t = \sigma_u = 12,25 \text{ МПа}$$

## II. Газовая часть цилиндра

3) Внутренний радиус цилиндрической обечайки

$$R_t = D/2 = 5/2 = 2,5 \text{ м} .$$

4) Выделим в газовой (верхней) части цилиндра элемент (рис. 6.3) и из уравнения равновесия для этого элемента, ввиду того, что  $R_u \rightarrow \infty$ , находим значение кольцевого напряжения:

$$\sigma_t = \frac{R_t \cdot P}{S} = \frac{2,5 \cdot 35000}{0,005} = 17,5 \text{ МПа} .$$

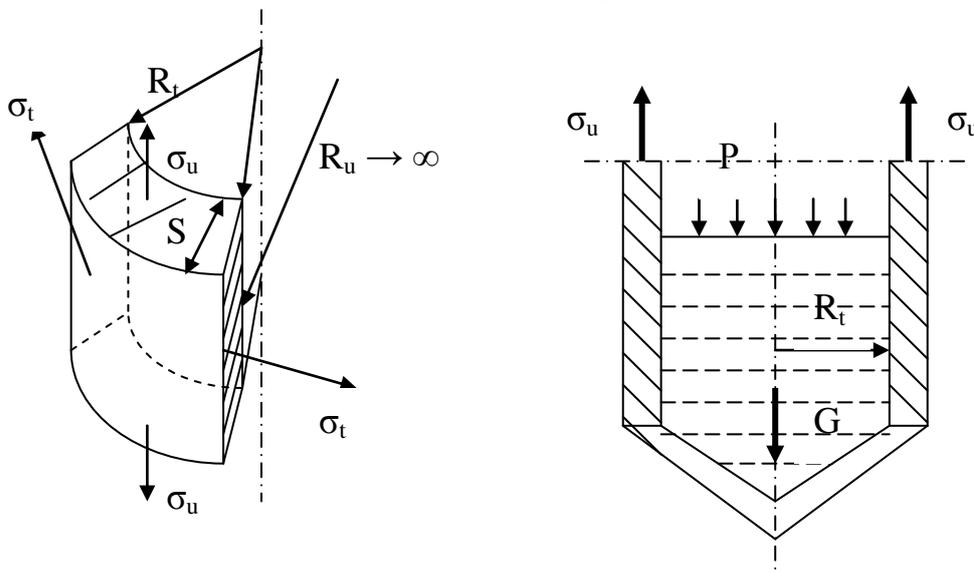


Рисунок 6.3 – Действие напряжений на элемент и зону газовой части корпуса

5) Высота заполнения цилиндрической обечайки жидкостью составляет

$$h = k_3 \cdot h_{\text{ц}} = 0,9 \cdot 5 = 4,5 \text{ м.}$$

6) Вес жидкости в цилиндрической части сосуда:

$$G_{\text{ц}} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{4} \cdot \rho \cdot g = \frac{3,14 \cdot 5^2 \cdot 4,5}{4} \cdot 1200 \cdot 9,81 = 1040 \text{ кН.}$$

7) Вес жидкости в конической части сосуда:

$$G_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{\text{к}}}{3 \cdot 4} \cdot \rho \cdot g = \frac{3,14 \cdot 5^2 \cdot 2}{3 \cdot 4} \cdot 1200 \cdot 9,81 = 154 \text{ кН.}$$

8) Общий вес жидкости:

$$G = G_{\text{ц}} + G_{\text{к}} = 1040 \cdot 10^3 + 154 \cdot 10^3 = 1194 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

9) Меридиональное напряжение  $\sigma_{\text{и}}$ :

Для равновесия выделенной зоны необходимо, чтобы алгебраическая сумма всех сил на ось симметрии оболочки равнялась нулю. Пренебрегая весом сосуда и газа в сосуде, получим уравнение равновесия в виде:

$$\sigma_{\text{и}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{т}} \cdot S - P \cdot \pi \cdot D^2 / 4 - G = 0,$$

откуда получаем меридиональное напряжение  $\sigma_{\text{и}}$

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{P \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} + G}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{т}} \cdot S} = \frac{35000 \cdot 3,14 \cdot \frac{5^2}{4} + 1194 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 0,005} = 24,0 \text{ МПа.}$$

### III. Жидкостная часть цилиндрического корпуса

10) Давление по высоте столба жидкости

Выделим в жидкостной (нижней) части цилиндрического корпуса зону оболочки на расстоянии "X" от ее низа (рис. 6.4).

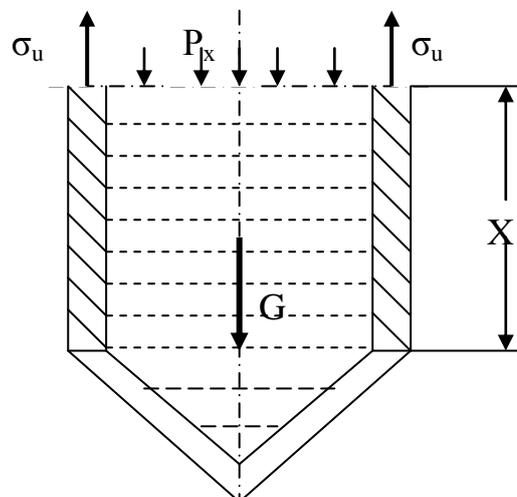


Рисунок 6.4 – Схема действия напряжений в зоне жидкостной части корпуса

Значение избыточного статического давления  $P_X$  является функцией координаты "X" и состоит из газового давления P, под которым находится жидкость, а также давления от расположенной выше жидкости:

$$P_X = P + \rho \cdot g \cdot (h - X).$$

11) Из уравнения равновесия Лапласа:  $\frac{\sigma_u}{R_u} + \frac{\sigma_t}{R_t} = \frac{P_x}{S}$  поскольку  $R_u \rightarrow \infty$

получаем выражение для кольцевого напряжения по высоте столба жидкости:

$$\sigma_{t,X} = \frac{[P + (h - X) \cdot \rho \cdot g] \cdot R_t}{S} = \frac{[35000 + (4,5 - X) \cdot 1200 \cdot 9,81] \cdot 2,5}{0,005}.$$

В этом выражении "X" может изменяться от 0 до  $h = 4,5$  м. При  $X = 0$   $\sigma_t = 44,0$  МПа; при  $X = h = 4,5$  м  $\sigma_t = 17,5$  МПа. По высоте столба жидкости напряжение  $\sigma_t$  изменяется по линейному закону.

12) Для оценки меридионального напряжения  $\sigma_u$  используем уравнение равновесия жидкостной зоны аппарата:

$$\sigma_u \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot S - P_X \cdot \pi \cdot D^2 / 4 - G_1 = 0,$$

где  $G_1 = G_k + X \cdot \rho \cdot g \cdot \pi \cdot D^2 / 4$ .

Тогда после превращений имеем:

$$\sigma_u = \frac{[P + (h - X) \cdot \rho \cdot g] \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot X + G_k}{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot S} = \frac{(P + \rho \cdot g \cdot h) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + G_k}{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot S} =$$

$$= \frac{P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + G}{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot S} = \frac{35000 \cdot \frac{3,14 \cdot 5^2}{4} + 1194 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 5 / 2 \cdot 0,005} = 24,0 \text{ МПа}.$$

Таким образом, по всей высоте цилиндрического корпуса  $\sigma_u$  имеет постоянное значение 24,0 МПа.

#### IV. Коническое днище

Используем метод сечений на произвольном уровне и получим элемент поверхности и расчетную зону для конического днища (рис. 6.5).

13) Половина угла раскрытия конического днища:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{D/2}{h_k}\right) = \arctg\left(\frac{5/2}{2}\right) = 0,8961 \text{ рад} = 51,3 \text{ град}.$$

14) Для конической оболочки кольцевой радиус  $R_t$  является функцией координаты "X", которая изменяется от 0 до  $h_k$ :

$$R_t = \frac{r_k}{\cos \alpha} = \frac{X \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha} = \frac{X \cdot \operatorname{tg}(0,8961)}{\cos(0,8961)} = \frac{1,25 \cdot X}{0,623} = 2,001 \cdot X.$$

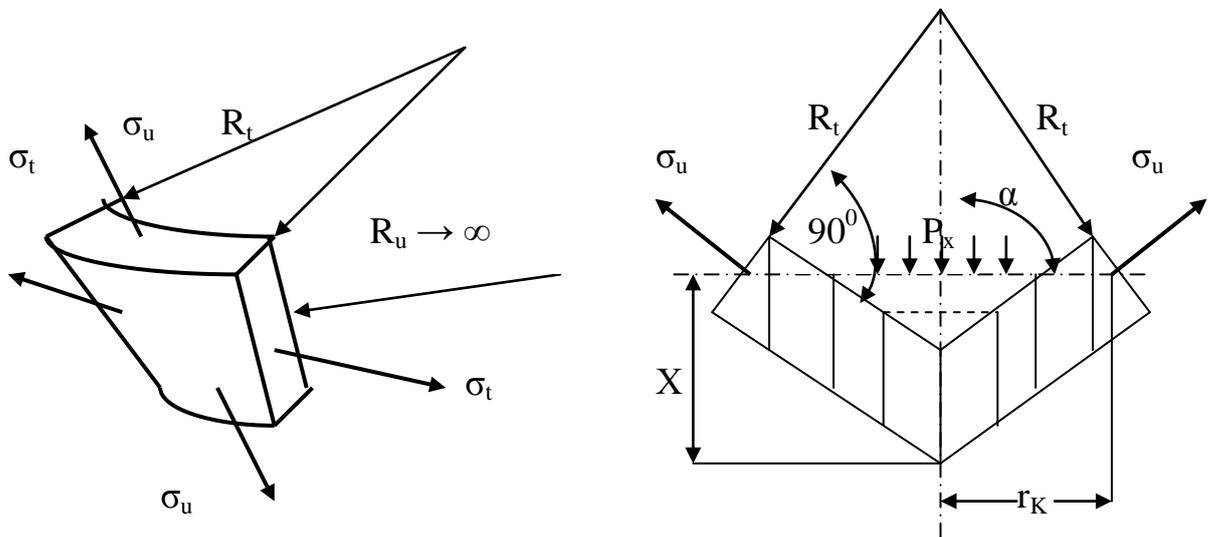


Рисунок 6.5 – Действие напряжений в элементе и зоне конического

15) Давление по высоте конического днища определится из выражения:

$$P_X = P + \rho \cdot g \cdot (h + h_k - X).$$

16) Из условия равновесия элемента  $\frac{\sigma_u}{R_u} + \frac{\sigma_t}{R_t} = \frac{P_X}{S}$  получаем уравнение

для расчета кольцевого напряжения:

$$\sigma_t = \frac{[P + (h + h_k - X) \cdot \rho \cdot g] \cdot R_t}{S} = \frac{[35000 + (4,5 + 2 - X) \cdot 1200 \cdot 9,81] \cdot 2,001 \cdot X}{0,005} =$$

$$= 44,63 \cdot X - 4,711 \cdot X^2, \text{ МПа.}$$

Из этого уравнения видим, что кольцевое напряжение изменяется по параболическому закону: при  $X = 0$   $\sigma_t = 0$ ; при  $X = h_k/2 = 1$  м  $\sigma_t = 39,9$  МПа; при  $X = h_k = 2$  м  $\sigma_t = 70,4$  МПа.

17) Для определения  $\sigma_u$  используем условия равновесия зоны в виде отсеченной части сосуда:

$$2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot S \cdot \sigma_u \cdot \cos \alpha - P_X \cdot \pi \cdot r_k^2 - G_2 = 0,$$

где  $2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot S$  – площадь пересечения оболочки;

$\sigma_u \cdot \cos \alpha$  – проекция меридионального напряжения на ось симметрии;

$r_k$  – радиус широтного круга;

$G_2 = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot X \cdot \rho \cdot g$  – вес жидкости в отсеченной части сосуда.

В развернутом виде условие равновесия можно записать в виде:

$$2 \cdot \pi \cdot X \cdot \text{tg} \alpha \cdot S \cdot \sigma_u \cdot \cos \alpha - [P + (h + h_k - X) \cdot \rho \cdot g] \cdot \pi \cdot X^2 \cdot (\text{tg} \alpha)^2 -$$

$$- \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot X^2 \cdot (\text{tg} \alpha)^2 \cdot X \cdot \rho \cdot g = 0.$$

Отсюда находим:

$$\sigma_u = \frac{\frac{1}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot X^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + X \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot [P + (h + h_k - X) \cdot \rho \cdot g]}{2 \cdot S \cdot \cos \alpha} =$$

$$= \frac{\frac{1}{3} \cdot 1200 \cdot 9,81 \cdot X^2 \cdot 1,25 + X \cdot 1,25 \cdot [35000 + (4,5 + 2 - X) \cdot 1200 \cdot 9,81]}{2 \cdot 0,005 \cdot 0,623} =$$

$$= 22,31 \cdot X - 1,570 \cdot X^2, \text{ МПа.}$$

То есть меридиональное напряжение изменяется по параболическому закону. При  $X = 0$   $\sigma_u = 0$ ; при  $X = h_k/2 = 1$  м  $\sigma_u = 20,7$  МПа; при  $X = h_k = 2$  м  $\sigma_u = 38,3$  МПа.

18) Для всех элементов сосуда выполняются условия обеспечения необходимой прочности, поскольку меридианные и кольцевые напряжения во всех сечениях не превышают предельно допустимого значения  $[\sigma] = 80$  МПа.

19) По результатам расчетов строим эпюры распределения напряжений в элементах сосуда (рис. 6.6). Из эпюры видно, что в одних и тех же точках (например, сочленение цилиндра и конического днища) напряжение изменяется скачком, т.е. в одной точке два значения напряжения. В этом заключается недостаток расчета аппаратов на основе мембранной теории расчета на прочность тонкостенных конструкций. В реальности такого не должно быть: в любой точке может быть только одно значение напряжения. Для более точных расчетов напряжений (в том числе в точках сочленений элементов аппарата) используются теории расчета толстостенных конструкций.

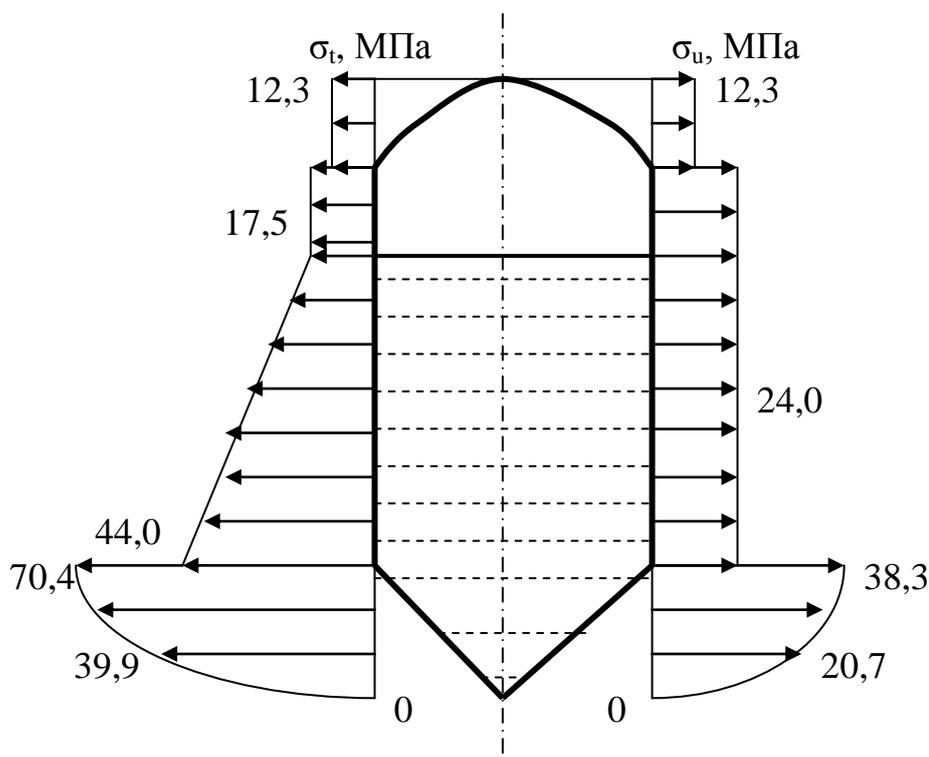


Рисунок 6.6 – Эпюра распределения напряжений по элементам аппарата

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рис. 6.7а и 6.7б.

**Дано:**

- $P_{isbyt} \approx 35000$  - избыточное давление газа, Па  
 $\rho \approx 1200$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>  
 $R_{ш} \approx 3.5$  - радиус цилиндрической крышки, м  
 $D \approx 5.0$  - внутренний диаметр цилиндрической обечайки, м  
 $h_{ц} \approx 5.0$  - высота цилиндрической обечайки, м  
 $h_{к} \approx 2$  - высота конического днища, м  
 $S \approx 0.005$  - толщина стенок аппарата, м  
 $k_z \approx 0.9$  - часть цилиндрической части аппарата, заполненная жидкостью  
 $\sigma_{доп} \approx 80 \cdot 10^6$  - допустимое напряжение на растяжение, Па  
 $g \approx 9.81$  - ускорение свободного падения, Н/кг

**Решение:****КРЫШКА**

- 1) Меридиональное напряжение, Па

$$\sigma_{u\_крышка} := \frac{R_{ш} \cdot P_{isbyt}}{2 \cdot S} = 12.3 \times 10^6$$

- 2) Кольцевое напряжение, Па

$$\sigma_{t\_крышка} \approx \sigma_{u\_крышка} = 12.3 \times 10^6$$

**ГАЗОВАЯ ЧАСТЬ ЦИЛИНДРА**

- 3) Радиус цилиндрической обечайки, м

$$R_t \approx 0.5 \cdot D = 2.5$$

- 4) Кольцевое напряжение, Па

$$\sigma_{t\_газ} := \frac{R_t \cdot P_{isbyt}}{S} = 17.5 \times 10^6$$

- 5) Высота столба жидкости в цилиндрической части аппарата, м

$$h \approx k_z \cdot h_{ц} = 4.5$$

- 6) Вес жидкости в цилиндрической части сосуда, Н

$$G_{ц} \approx \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{4} \cdot \rho \cdot g = 1.040 \times 10^6$$

- 7) Вес жидкости в конической части сосуда, Н

$$G_{к} \approx \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{к}}{3 \cdot 4} \cdot \rho \cdot g = 154 \times 10^3$$

- 8) Общий вес жидкости в сосуде, Н

$$G \approx G_{ц} + G_{к} = 1.194 \times 10^6$$

- 9) Меридиональное напряжение, Па

$$\sigma_{u\_газ} := \frac{P_{isbyt} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} + G}{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot S} = 24.0 \times 10^6$$

**ЖИДКОСТНАЯ ЧАСТЬ ЦИЛИНДРА**

- 10) Давление по высоте столба жидкости, Па

$$P(X) \approx P_{isbyt} + \rho \cdot g \cdot (h - X)$$

- 11) Кольцевое напряжение по высоте столба жидкости (линейный закон), Па

$$\sigma_{t\_жидк}(X) := \frac{P(X) \cdot R_t}{S}$$

$$\text{При } X = 0 \quad \sigma_{t\_жидк}(0) = 44.0 \times 10^6$$

$$\text{При } X = h \quad \sigma_{t\_жидк}(h) = 17.5 \times 10^6$$

- 12) Меридиональное напряжение (постоянное по высоте цилиндрического корпуса), Па

$$\sigma_{u\_жидк} := \frac{P_{isbyt} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} + G}{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot S} = 24.0 \times 10^6$$

Рисунок 6.7а – Протокол выполнения задания "Расчет на прочность в элементах тонкостенного аппарата"

**КОНИЧЕСКОЕ ДНИЩЕ**

13) Половина угла раскрытия конического днища

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{0.5 \cdot D}{h_k}\right) = 0.8961 \text{ рад} \quad \alpha \cdot \frac{180}{\pi} = 51.3 \text{ град}$$

14) Кольцевой радиус в зависимости от расстояния от нижней точки днища, м

$$R_t(X) := X \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

15) Давление по высоте столба жидкости, Па

$$P(X) := P_{\text{isbyt}} + \rho \cdot g \cdot (h + h_k - X)$$

16) Кольцевое напряжение по высоте столба жидкости (параболический закон), Па

$$\sigma_{t\_днище}(X) := \frac{P(X) \cdot R_t(X)}{S}$$

При  $X = 0$        $\sigma_{t\_днище}(0) = 0.000 \times 10^0$

При  $X = 0.5 \cdot h_k$        $\sigma_{t\_днище}(0.5 \cdot h_k) = 39.9 \times 10^6$

При  $X = h_k$        $\sigma_{t\_днище}(h_k) = 70.4 \times 10^6$

17) Меридиональное напряжение (параболический закон), Па

$$\sigma_{u\_днище}(X) := \frac{\frac{1}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot X^2 \cdot \tan(\alpha) + P(X) \cdot X \cdot \tan(\alpha)}{2 \cdot S \cdot \cos(\alpha)}$$

При  $X = 0$        $\sigma_{u\_днище}(0) = 0.000 \times 10^0$

При  $X = 0.5 \cdot h_k$        $\sigma_{u\_днище}(0.5 \cdot h_k) = 20.7 \times 10^6$

При  $X = h_k$        $\sigma_{u\_днище}(h_k) = 38.3 \times 10^6$

18) Проверка обеспечения необходимой прочности всех элементов сосуда

Итог :=

```

Мах_крышка ← max(σ_u_крышка, σ_t_крышка)
Мах_газ ← max(σ_u_газ, σ_t_газ)
Мах_жидк ← max(σ_u_жидк, σ_t_жидк(h))
Мах_днище ← max(σ_u_днище(h_k), σ_t_днище(h_k))
Мах ← max(Мах_крышка, Мах_газ, Мах_жидк, Мах_днище)
Итог ← "Напряжения НЕ ПРЕВЫШАЮТ допуст. значений" if Мах < σ_доп
Итог ← "Напряжения ПРЕВЫШАЮТ допуст. значения" otherwise
Итог

```

Итог = "Напряжения НЕ ПРЕВЫШАЮТ допуст. значений"

Рисунок 6.7б – Протокол выполнения задания "Расчет на прочность в элементах тонкостенного аппарата" (продолжение рисунка 6.7а)

### 6.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 6.1

Определить меридиональное напряжение в крышке сферической формы, если радиус крышки 2,5 м, избыточное давление газа под крышкой 2000 Па, а толщина стенки аппарата 10 мм.

#### Задача 6.2

Определить кольцевое напряжение в цилиндрической стенке аппарата, если внутренний диаметр цилиндра 4,5 м, избыточное давление жидкости внутри аппарата 20000 Па, а толщина стенки аппарата 15 мм.

#### Задача 6.3

Определить вес жидкости в цилиндрической части аппарата, если внутренний диаметр цилиндра 2,5 м, высота столба жидкости в аппарате 3 м, а плотность жидкости  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

#### Задача 6.4

Определить давление в основании столба жидкости высотой 2,5 м, если плотность жидкости  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , а давление на верхней поверхности жидкости 30 кПа.

#### 6.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Как называются основные элементы расчетного вертикального аппарата с тонкими стенками?
- 2) Как определить давление по высоте столба жидкости?
- 3) Как записывается уравнение равновесия элемента тонкостенной оболочки?
- 4) Как называются параметры, которые входят в уравнение равновесия элемента тонкостенной оболочки?
- 5) Какая размерность следующих параметров: меридиональное напряжение, кольцевое напряжение, площадь, сила, давление, плотность?
- 6) Как записывается линейный закон изменения функции одной переменной, например,  $y = f(x)$ ?
- 7) Как записывается параболический закон изменения функции одной переменной, например,  $y = f(x)$ ?
- 8) По какой причине напряжения в точке сочленения цилиндрической части и конического днища аппарата изменяются скачкообразно?

## 7 Расчет кожухотрубчатого теплообменника жесткой конструкции на прочность с помощью пакета MathCAD<sup>7</sup>

### 7.1 Задание

Выполнить проверочный расчет на прочность теплообменного кожухотрубчатого аппарата жесткой конструкции (табл. 7.1) с внутренним диаметром корпуса  $D_B$ , толщиной стенки  $S_K$ . Количество труб в теплообменнике "n", их внешний диаметр  $d_3$  и толщина стенки  $S_T$ . Давление вещества в трубах  $P_T$ , в межтрубном пространстве  $P_{MT}$ . Модули упругости материала корпуса и труб:  $E_K$  и  $E_T$ . Температуры корпуса и труб:  $t_K$  и  $t_T$ . Коэффициенты линейного расширения материала корпуса и труб:  $\alpha_K$  и  $\alpha_T$ . Допустимые напряжения материала корпуса и труб:  $[\sigma]_K$  и  $[\sigma]_T$ . Температура окружающей среды  $t_0$ .

Таблица 7.1 – Исходные данные к работе

№	Параметры теплообменника												
	$D_B$ , м	$S_K$ , мм	$d_3$ , мм	$S_T$ , мм	n, шт.	$P_{MT}$ , МПа	$P_T$ , МПа	$E_K \cdot 10^{-5}$ , МПа	$E_T \cdot 10^{-5}$ , МПа	$t_K$ , °С	$t_T$ , °С	$\alpha_K \cdot 10^7$ , 1/К	$\alpha_T \cdot 10^7$ , 1/К
1	0,6	8	30	2,5	144	0,4	1,8	1,5	1,2	40	65	122	106
2	0,7	10	32	2,5	152	0,3	1,6	1,5	1,6	45	75	114	100
3	0,8	12	28	2	180	0,2	1,4	1,2	1,7	40	70	123	131
4	0,55	14	25	2	205	0,4	1,2	2,1	1,8	45	60	105	101
5	0,65	10	28	2	168	0,25	1,8	2	1,5	42	80	112	119
6	0,75	12	30	2	184	0,35	1,4	1,5	1,6	44	85	133	103
7	0,45	14	32	2,5	198	0,45	1,2	2	1,7	46	90	123	106
8	0,46	15	30	2,5	136	0,4	1,6	1,7	1,4	48	82	122	109
9	0,47	9	25	2	156	0,4	1,8	2,1	1,6	58	92	112	101
10	0,48	10	24	2	172	0,38	1,6	2	1,7	54	88	102	101
11	0,49	11	25	2,5	172	0,36	1,4	2,2	1,8	54	84	122	102
12	0,51	12	24	2	186	0,34	1,2	1,4	1,4	54	82	128	133

### 7.2 Методические указания к выполнению

В теплообменниках с жестким соединением между корпусом и трубными решетками возникают дополнительные напряжения в трубах и корпусе в результате разной степени их удлинения при нагревании или охлаждении. Эти напряжения, которые являются следствием разницы температур и свойств конструкционного материала труб и корпуса, могут привести к нарушению плотности трубчатки и деформации труб.

<sup>7</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [4, 5]

Для приближенного определения напряжений, которые возникают в трубчатке жесткой конструкции, принимают следующие предположения:

1. Установленные трубы являются прямыми и могут поддаваться лишь действия сил растяжения или сжатия;
2. Большая жесткость трубных решеток не позволяет трубам деформироваться в зоне их крепления;
3. Деформация решеток осуществляется лишь на периферии, за пределами расположения труб.

На рисунке 7.1 приведена схема движения теплоносителей и элементы крепления трубной решетки в теплообменнике жесткой конструкции, а на рисунке 7.2 – схема действия сил в трубчатке.

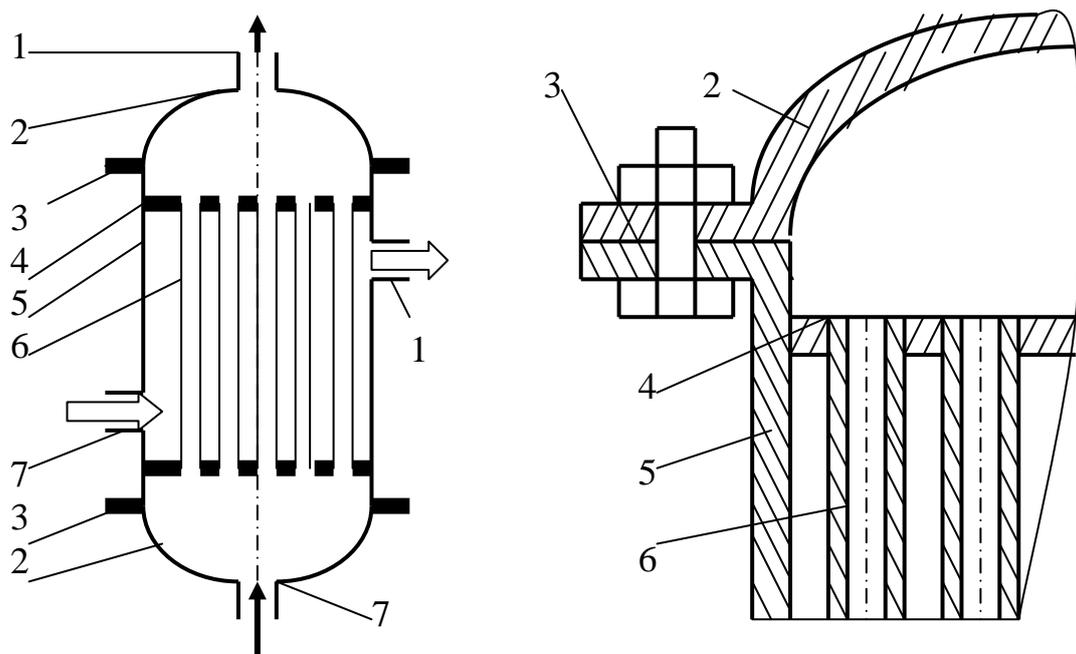


Рисунок 7.1 – Схема теплообменника и узел трубной решетки:

⇨ ⇨ потоки теплоносителей

1 – выходные патрубки теплоносителей; 2 – крышки; 3 – фланцы; 4 – трубные решетки; 5 – корпус теплообменника; 6 – трубы; 7 – входные патрубки теплоносителей

Величина осевой силы в трубчатке, которая возникает под действием давления среды и направлена на разрыв трубы и раздвижку трубных решеток, составляет:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где  $Q_1 = \frac{\pi \cdot (D_B^2 - n \cdot d_3^2)}{4} \cdot P_{MT}$  – сила от давления в пространстве между

трубами, которая направлена на отрыв решетки от труб и корпуса;

$Q_2 = \frac{\pi \cdot D_B^2}{4} \cdot P_T$  – усилие от давления под крышкой, которое передается

на трубную решетку через болты;

$$Q_3 = \frac{\pi \cdot (D_B^2 - n \cdot d_B^2)}{4} \cdot P_T - \text{усилие от давления над решеткой, которое}$$

прижимает решетку к трубам и корпусу;

$D_B$  – внутренний диаметр корпуса теплообменника;

$n$ ,  $d_3$  и  $d_B$  – количество труб, их наружный и внутренний диаметры;

$P_{MT}$  и  $P_T$  – давление среды между трубами и в трубах.

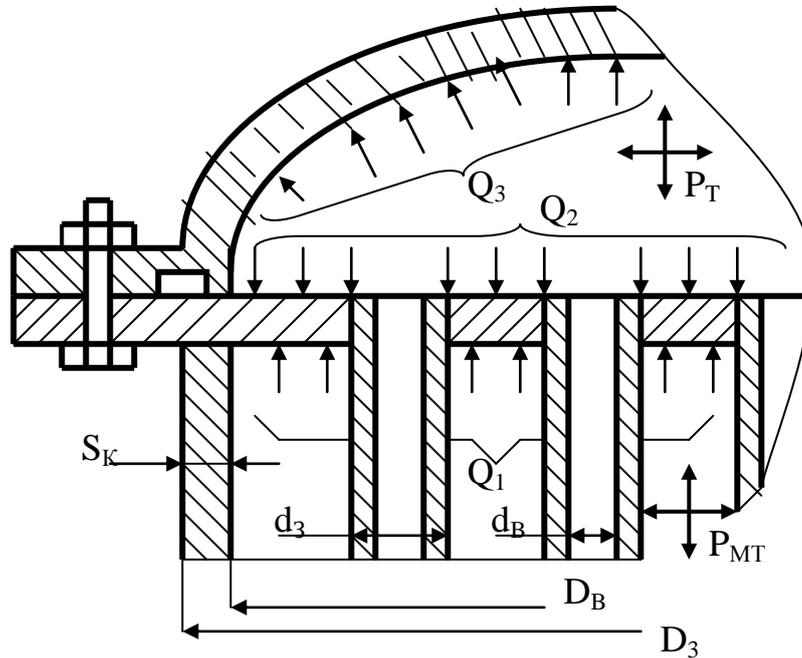


Рисунок 7.2 – Схема действия сил на трубчатку

С учетом приведенных формул для  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$  получаем:

$$Q = Q_K + Q_T = \frac{\pi \cdot (D_B^2 - n \cdot d_3^2)}{4} \cdot P_{MT} + n \cdot \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} \cdot P_T,$$

где  $Q_K = Q \cdot \frac{F_K \cdot E_K}{F_K \cdot E_K + F_T \cdot E_T}$  – осевая сила, которая возникает в корпусе

от давления среды в аппарате и которая отодвигает корпус от трубной решетки;

$Q_T = Q \cdot \frac{F_T \cdot E_T}{F_K \cdot E_K + F_T \cdot E_T}$  – осевая сила, в трубах от давления среды в

аппарате и которая направлена на отрыв труб от трубной решетки;

$F_K = \frac{\pi \cdot (D_3^2 - D_B^2)}{4}$ ;  $F_T = \frac{n \cdot \pi \cdot (d_3^2 - d_B^2)}{4}$  – площадь сечения корпуса и

труб;

$D_3$  – внешний диаметр корпуса;

$E_K$  и  $E_T$  – модули упругости материала корпуса и труб.

Осевые напряжения, которые возникают при этом в корпусе и трубах:

$$\sigma_K = Q_K / F_K ; \sigma_T = Q_T / F_T .$$

Температурные напряжения образуют равные по величине и противоположные за знаком силы в корпусе  $Q_K^t$  и в трубах  $Q_T^t$ , которые отодвигают их от трубных решеток:

$$Q_K^t = -Q_T^t = \frac{F_K \cdot E_K \cdot F_T \cdot E_T}{F_K \cdot E_K + F_T \cdot E_T} \cdot (\Delta t_T \cdot \alpha_T - \Delta t_K \cdot \alpha_K),$$

где  $\Delta t_K$  – разница между температурами корпуса и окружающего среды;

$\Delta t_T$  – разница между температурами труб и окружающего среды;

$\alpha_K$  и  $\alpha_T$  – коэффициенты линейного расширения материала корпуса и труб.

Напряжение в корпусе и трубах из-за разницы температур их стенок:

$$\sigma_K^t = Q_K^t / F_K; \sigma_T^t = Q_T^t / F_T.$$

То есть, напряжение и силы, которые возникают в трубах и корпусе, не зависят от их длины, а определяются площадью сечения их стенок ( $F_K; F_T$ ), свойствами материалов ( $\alpha_K, \alpha_T, E_K, E_T$ ) и их температурами ( $\Delta t_K, \Delta t_T$ ).

Полные силы от совместного действия давления и разницы температур составляют для корпуса и труб:

$$Q_K^\Sigma = Q_K + Q_K^t; Q_T^\Sigma = Q_T + Q_T^t.$$

Полные осевые напряжения составляют для корпуса и труб:

$$\sigma_K^\Sigma = \sigma_K + \sigma_K^t; \sigma_T^\Sigma = \sigma_T + \sigma_T^t.$$

Если суммарные осевые напряжения в корпусе и трубах не превышают допустимых, то конструкция камеры нагревания теплообменника может быть жесткой. В противоположном случае нужно установить устройство для компенсации или выбрать теплообменник другой, более сложной конструкции.

### 7.3 Пример расчета прочности кожухотрубчатого теплообменника

#### Исходные данные:

Определить возможность использования в технологическом процессе кожухотрубчатого теплообменника жесткой конструкции с внутренним диаметром корпуса  $D_B = 610$  мм и толщиной его стенки  $S_K = 12$  мм. В теплообменнике установлено  $n = 150$  труб с внешним диаметром  $d_3 = 32$  мм и толщиной стенки  $S_T = 2,5$  мм. Давление вещества в трубах составляет  $P_T = 1,8$  МПа, в межтрубном пространстве –  $P_{MT} = 0,4$  МПа. Модуль упругости и допустимое напряжение материала корпуса  $E_K = 2 \cdot 10^5$  МПа и  $[\sigma]_K = 80$  МПа, материала труб –  $E_T = 1,5 \cdot 10^5$  МПа и  $[\sigma]_T = 60$  МПа. Корпус работает при рабочей температуре  $t_K = 50$  °С, трубы – при  $t_T = 90$  °С; температура окружающего среды –  $t_0 = 30$  °С. Коэффициент линейного расширения материала корпуса составляет  $\alpha_K = 12,2 \cdot 10^{-6}$  1/К, труб –  $\alpha_T = 10,6 \cdot 10^{-6}$  1/К.

#### Решение:

1) Внешний диаметр корпуса:

$$D_3 = D_B + 2 \cdot S_K = 610 + 2 \cdot 12 = 634 \text{ мм} = 0,634 \text{ м}.$$

2) Внутренний диаметр труб:

$$d_B = d_3 - 2 \cdot S_T = 32 - 2 \cdot 2,5 = 27 \text{ мм} = 0,027 \text{ м}.$$

3) Осевая сила, которая возникает под действием давления среды и направленная разорвать трубы и раздвинуть трубные решетки:

$$Q = \frac{\pi \cdot (D_B^2 - n \cdot d_3^2)}{4} \cdot P_{MT} + n \cdot \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} \cdot P_T =$$

$$= \frac{\pi \cdot (0,61^2 - 150 \cdot 0,032^2)}{4} \cdot 0,4 \cdot 10^6 + 150 \cdot \frac{\pi \cdot 0,027^2}{4} \cdot 1,8 \cdot 10^6 = 223 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

4) Площадь сечения корпуса аппарата:

$$F_K = \frac{\pi \cdot (D_3^2 - D_B^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,634^2 - 0,610^2)}{4} = 0,0234 \text{ м}^2.$$

5) Площадь сечения труб аппарата:

$$F_T = \frac{n \cdot \pi \cdot (d_3^2 - d_B^2)}{4} = \frac{150 \cdot \pi \cdot (0,032^2 - 0,027^2)}{4} = 0,0348 \text{ м}^2.$$

6) Осевая сила, которая возникает в корпусе от давления среды в аппарате и отодвигающая корпус от трубной решетки:

$$Q_K = \frac{F_K \cdot E_K}{F_K \cdot E_K + F_T \cdot E_T} \cdot Q = \frac{0,0234 \cdot 2 \cdot 10^5}{0,0234 \cdot 2 \cdot 10^5 + 0,0348 \cdot 1,5 \cdot 10^5} \cdot 223 \cdot 10^3 = 106 \text{ кН}.$$

7) Осевая сила, которая возникает в трубах от давления среды в аппарате и направленная на отрыв труб от трубной решетки:

$$Q_T = \frac{F_T \cdot E_T}{F_K \cdot E_K + F_T \cdot E_T} \cdot Q = \frac{0,0348 \cdot 1,5 \cdot 10^5}{0,0234 \cdot 2 \cdot 10^5 + 0,0348 \cdot 1,5 \cdot 10^5} \cdot 223 \cdot 10^3 = 118 \text{ кН}.$$

8) Осевое напряжение в корпусе от действия давления среды в аппарате:

$$\sigma_K = \frac{Q_K}{F_K} = \frac{106 \cdot 10^3}{0,0234} = 4,51 \text{ МПа}.$$

9) Осевое напряжение в трубах от действия давления среды в аппарате:

$$\sigma_T = \frac{Q_T}{F_T} = \frac{118 \cdot 10^3}{0,0348} = 3,38 \text{ МПа}.$$

10) Перепад температур между корпусом и окружающей средой:

$$\Delta t_K = t_K - t_0 = 50 - 30 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

11) Перепад температур между трубами и окружающей средой:

$$\Delta t_T = t_T - t_0 = 90 - 30 = 60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

12) Сила в корпусе, возникающая под действием температурных напряжений:

$$Q_K^t = \frac{F_K \cdot E_K \cdot F_T \cdot E_T}{F_K \cdot E_K + F_T \cdot E_T} \cdot (\Delta t_T \cdot \alpha_T - \Delta t_K \cdot \alpha_K) =$$

$$= \frac{0,0234 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,0348 \cdot 1,5 \cdot 10^5}{0,0234 \cdot 2 \cdot 10^5 + 0,0348 \cdot 1,5 \cdot 10^5} (10,6 \cdot 10^{-6} \cdot 60 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 20) = 968 \text{ кН}.$$

13) Сила в трубах, возникающая под действием температурных напряжений:

$$Q_T^t = -Q_K^t = -968 \text{ кН}.$$

14) Напряжение в корпусе из-за разницы температур стенок:

$$\sigma_K^t = \frac{Q_K^t}{F_K} = \frac{968 \cdot 10^3}{0,0234} = 41,3 \text{ МПа}.$$

15) Напряжение в трубах из-за разницы температур их стенок:

$$\sigma_T^t = \frac{|Q_T^t|}{F_T} = \frac{968 \cdot 10^3}{0,0348} = 27,8 \text{ МПа}.$$

16) Полное осевое напряжение в корпусе:

$$\sigma_K^\Sigma = \sigma_K + \sigma_K^t = 4,51 \cdot 10^6 + 41,3 \cdot 10^6 = 45,8 \text{ МПа}.$$

Это напряжение меньше допустимого:  $\sigma_K^\Sigma < [\sigma]_K$ .

17) Полное осевое напряжение в трубах:

$$\sigma_T^\Sigma = \sigma_T + \sigma_T^t = 3,38 \cdot 10^6 + 27,8 \cdot 10^6 = 31,2 \text{ МПа}.$$

Это напряжение меньше допустимого:  $\sigma_T^\Sigma < [\sigma]_T$ .

Ответ:

Значения осевых напряжений и в трубах, и в корпусе аппарата не превышают предельно допустимых.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунках 7.3а и 7.3б.

## 7.4 Задания для самостоятельной работы

### Задача 7.1

Определить площадь сечения корпуса аппарата, если наружный диаметр корпуса 850 мм, а внутренний – 800 мм.

### Задача 7.2

Определить площадь сечения пучка труб аппарата, если наружный диаметр каждой трубы 50 мм, а внутренний – 40 мм. Количество труб – 200.

### Задача 7.3

Определить осевое напряжение в корпусе от действия давления среды в аппарате, если осевая сила, отодвигающая корпус от трубной решетки, равна 25000 Н, а площадь сечения корпуса аппарата равна  $0,03 \text{ м}^2$ .

### Задача 7.4

Определить полное осевое напряжение в корпусе аппарата, если осевое напряжение в корпусе от действия давления среды в аппарате равно 6,7 МПа, а напряжение в корпусе из-за разницы температур стенок 46,7 МПа.

**Дано:**

$D_{\text{в}} := 0.61$	- внутренний диаметр корпуса, м
$S_{\text{к}} := 0.012$	- толщина стенки корпуса, м
$d_{\text{з}} := 0.032$	- наружный диаметр труб в теплообменнике, м
$S_{\text{т}} := 0.0025$	- толщина стенки труб, м
$n := 150$	- число труб
$P_{\text{мт}} := 0.4 \cdot 10^6$	- давление в межтрубном пространстве, Па
$P_{\text{т}} := 1.8 \cdot 10^6$	- давление в трубах, Па
$E_{\text{к}} := 2.0 \cdot 10^{11}$	- модуль упругости материала корпуса, Па
$E_{\text{т}} := 1.5 \cdot 10^{11}$	- модуль упругости материала труб, Па
$t_{\text{к}} := 50$	- температура корпуса, С
$t_{\text{т}} := 90$	- температура труб, С
$\alpha_{\text{к}} := 12.2 \cdot 10^{-6}$	- коэффициент линейного расширения материала корпуса, 1/К
$\alpha_{\text{т}} := 10.6 \cdot 10^{-6}$	- коэффициент линейного расширения материала труб, 1/К
$\sigma_{\text{к доп}} := 80 \cdot 10^6$	- допустимое напряжение материала корпуса, Па
$\sigma_{\text{т доп}} := 60 \cdot 10^6$	- допустимое напряжение материала труб, Па
$t_0 := 30$	- температура окружающей среды, С

**Решение:**

1. Наружный диаметр корпуса, м

$$D_{\text{з}} := D_{\text{в}} + 2 \cdot S_{\text{к}} = 0.634$$

2. Внутренний диаметр трубы, м

$$d_{\text{в}} := d_{\text{з}} - 2 \cdot S_{\text{т}} = 0.027$$

3. Осевая сила, направленная на разрыв труб и раздвижку трубных решеток, Н

$$Q_{\text{ось}} := P_{\text{мт}} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{\text{в}}^2 - n \cdot d_{\text{з}}^2)}{4} + P_{\text{т}} \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{в}}^2}{4} = 223 \times 10^3$$

4. Площадь сечения корпуса аппарата, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{к}} := \frac{\pi \cdot (D_{\text{з}}^2 - D_{\text{в}}^2)}{4} = 0.0234$$

5. Площадь сечения труб аппарата, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{т}} := n \cdot \frac{\pi \cdot (d_{\text{з}}^2 - d_{\text{в}}^2)}{4} = 0.0348$$

6. Осевая сила внутри корпуса, направленная на раздвижку корпуса от трубной решетки, Н

$$Q_{\text{ось к}} := Q_{\text{ось}} \cdot \frac{F_{\text{к}} \cdot E_{\text{к}}}{F_{\text{к}} \cdot E_{\text{к}} + F_{\text{т}} \cdot E_{\text{т}}} = 106 \times 10^3$$

7. Осевая сила внутри труб, направленная на отрыв труб от трубной решетки, Н

$$Q_{\text{ось т}} := Q_{\text{ось}} \cdot \frac{F_{\text{т}} \cdot E_{\text{т}}}{F_{\text{к}} \cdot E_{\text{к}} + F_{\text{т}} \cdot E_{\text{т}}} = 118 \times 10^3$$

8. Осевое напряжение, в корпусе от давления среды в аппарате, Па

$$\sigma_{\text{ось к}} := \frac{Q_{\text{ось к}}}{F_{\text{к}}} = 4.51 \times 10^6$$

9. Осевое напряжение, в трубах от давления среды в аппарате, Па

$$\sigma_{\text{ось т}} := \frac{Q_{\text{ось т}}}{F_{\text{т}}} = 3.38 \times 10^6$$

Рисунок 7.3а – Протокол выполнения задания "Расчет прочности кожухотрубчатого теплообменника" (начало)

10. Перепад температуры между корпусом и окружающей средой, С  
 $\Delta t_k := t_k - t_0 = 20$

11. Перепад температуры между трубами и окружающей средой, С  
 $\Delta t_t := t_t - t_0 = 60$

12. Силы в корпусе, возникающие под действием температурных напряжений, Н  
 $Q_{\text{темп}_k} := \frac{F_{k-E_k} \cdot F_{t-E_t}}{F_{k-E_k} + F_{t-E_t}} \cdot (\Delta t_{t-\alpha_t} - \Delta t_{k-\alpha_k}) = 968 \times 10^3$

13. Силы в трубах, возникающие под действием температурных напряжений, Н  
 $Q_{\text{темп}_t} := -Q_{\text{темп}_k} = -968 \times 10^3$

14. Напряжения в корпусе из-за разницы температуры корпуса и труб, Па  
 $\sigma_{\text{темп}_k} := \frac{Q_{\text{темп}_k}}{F_k} = 41.3 \times 10^6$

15. Напряжения в трубах из-за разницы температуры корпуса и труб, Па  
 $\sigma_{\text{темп}_t} := \frac{|Q_{\text{темп}_t}|}{F_t} = 27.8 \times 10^6$

16. Полное осевое напряжение в корпусе, Па  
 $\sigma_k := \sigma_{\text{ось}_k} + \sigma_{\text{темп}_k} = 45.8 \times 10^6$

17. Полное осевое напряжение в трубах, Па  
 $\sigma_t := \sigma_{\text{ось}_t} + \sigma_{\text{темп}_t} = 31.2 \times 10^6$

**Ответ:**

Итог :=  $\begin{cases} \text{И} \leftarrow \text{"Напряж. НЕ ПРЕВЫШАЮТ допуст. знач."} & \text{if } \sigma_k < \sigma_{k\_доп} \wedge \sigma_t < \sigma_{t\_доп} \\ \text{И} \leftarrow \text{"Напряж. ПРЕВЫШАЮТ допуст. знач."} & \text{otherwise} \\ \text{И} \end{cases}$

Итог = "Напряж. НЕ ПРЕВЫШАЮТ допуст. знач."

Рисунок 7.36 – Протокол выполнения задания "Расчет прочности кожухотрубчатого теплообменника" (продолжение рисунка 7.3а)

## 7.5 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Какое назначение кожухотрубчатого теплообменника?
- 2) Из каких основных элементов состоит кожухотрубчатый теплообменник?
- 3) Где входят в теплообменник и где выходят из теплообменника теплоносители (показать на схеме)?
- 4) В чем измеряются следующие параметры: а) напряжение от действия внутреннего давления; б) напряжение от разности температур; в) сила, возникающая под действием термических напряжений; г) давление в межтрубном пространстве; д) модуль упругости материала труб; е) коэффициент линейного расширения материала труб?
- 5) Как определить совместное напряжение в трубах от действия давления теплоносителя и от перепада температур в трубах?
- 6) Как определить напряжение по сечению трубы, если известна сила, приложенная к этому сечению и известна площадь сечения?
- 7) Что является первоисточником при образовании термических напряжений по сечению трубы?

## 8 Расчет конструктивных элементов колонного аппарата с учетом ветровой нагрузки с помощью пакета MathCAD<sup>8</sup>

### 8.1 Задание

Абсорбционная стальная колонна (рис. 8.1), которая имеет высоту "H", внутренний диаметр "D", толщину стенки "S" и тепловой изоляции "S<sub>1</sub>", расположена в ветровом районе "Vet". Средняя температура стенки составляет "t". Толщина слоя на поверхности стенки, подверженная коррозии "C<sub>1</sub>". Максимальная масса колонны с внутренним оборудованием "M<sub>MAX</sub>", минимальная масса колонны "M<sub>MIN</sub>". Колонна опирается на опорное кольцо с внутренним диаметром "D<sub>В</sub>" и внешним "D<sub>Н</sub>", которое крепится к бетонному фундаменту с помощью "n" анкерных болтов. Требуется выполнить проверку прочности корпуса колонны и бетонного фундамента с учетом ветровой нагрузки, определить минимально допустимые значения толщины опорного кольца и внутреннего диаметра нарезки фундаментных болтов.

Исходные данные для выполнения расчетов приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1 – Выходные данные к выполнению работы

№ вар.	H, м	D, м	S, мм	S <sub>1</sub> , мм	M <sub>MAX</sub> , ТОНН	M <sub>MIN</sub> , ТОНН	C <sub>1</sub> , мм	Ветровой район – Vet	t, °С	D <sub>В</sub> , м	D <sub>Н</sub> , м	Кол-во болтов – n
1	37	1,7	15	80	39	31	2	I	250	1,36	2,55	20
2	35	1,8	20	80	45	36	2	II	100	1,44	2,7	20
3	40	1,6	15	80	42	34	2	III	150	1,28	2,4	20
4	32	1,5	14	70	32	26	1,5	IV	200	1,2	2,25	20
5	43	1,5	15	70	40	32	1,2	V	180	1,25	2,2	24
6	46	2	18	100	48	38	2,5	VI	150	1,6	3	24
7	41	1,8	18	100	45	36	2,5	VII	150	1,48	2,6	24
8	44	1,6	16	100	46	37	3	I	200	1,3	2,5	24
9	39	1,6	19	70	38	30	2,2	II	200	1,25	2,35	20
10	37	1,8	14	70	34	27	1,5	III	100	1,5	2,6	20
11	36	1,7	15	90	35	28	1,5	IV	250	1,4	2,5	20
12	42	1,9	20	90	46	37	2,5	V	250	1,52	2,85	20

<sup>8</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [4, 5]

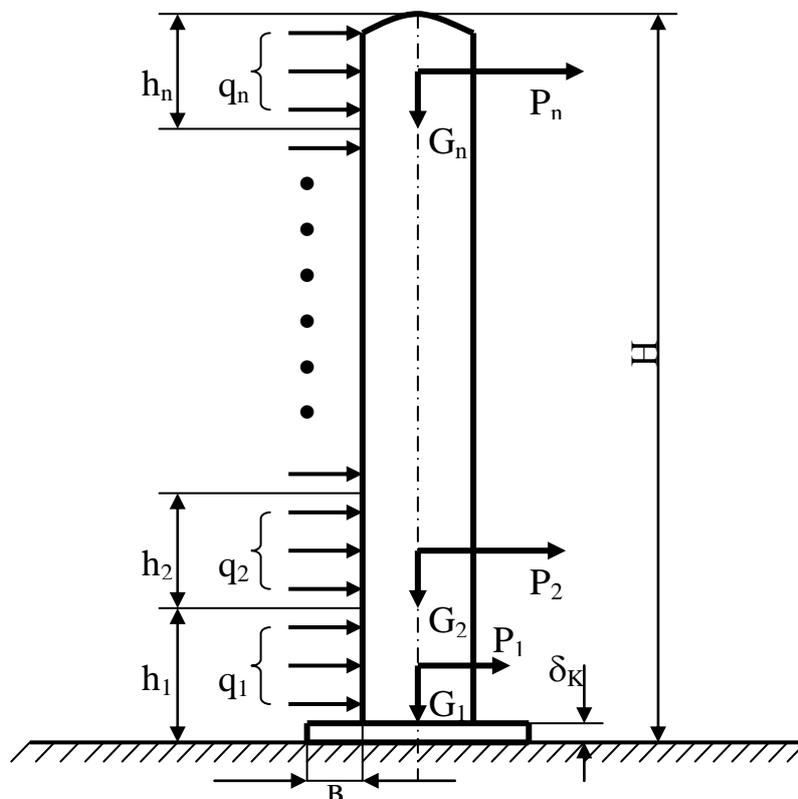


Рисунок 8.1 – Расчетная схема колонны

В нечётных вариантах материал стенки колонны – легированная аустенитная сталь, в чётных вариантах – углеродистая сталь.

Другие параметры, необходимые для расчета, являются общими:

– толщина слоя на поверхности анкерного болта, подвергаемая коррозии  $C_2 = 3$  мм;

– допустимое напряжение для материала корпуса колонны  $[\sigma_{СТ}] = 90$  МПа (для аппаратов, располагаемых снаружи  $[\sigma_{СТ}]$  составляет 80-90 МПа);

– допустимое давление на бетонное основание колонны  $[q_0] = 2,5$  МПа (в зависимости от марки бетона  $[q_0]$  составляет 2-2,5 МПа);

– допустимое напряжение материала опорного кольца на изгиб  $[\sigma_{зГ}] = 55$  МПа ( $[\sigma_{зГ}]$  равно 50-60 МПа);

– допустимое напряжение на растяжение материала болта  $[\sigma_{РОЗ}] = 125$  МПа (для Стали 3 величина  $[\sigma_{РОЗ}]$  равна 110-140 МПа).

## 8.2 Методические указания к выполнению работы

Расчет толщин стенок, сферических крышек и днищ колонных аппаратов выполняют обычно за методиками расчета толщин соответствующих элементов тонкостенных аппаратов. Особенно важным для колонных аппаратов является расчет их нижней части. Абсорбционные башни, ректификационные и экстракционные колонные аппараты имеют большую высоту и обычно являются вынесенными за пределы здания цеха. На колонну действует ветровая и сейсмическая нагрузка, которая зависит от высоты, диаметра колонны, колебаний разных машин и механизмов, которые связаны с

колонной (помпы, компрессоры и т.д.). Для обеспечения стойкости снизу колонны приваривают опорное кольцо, с помощью которого она закрепляется к фундаменту (рис. 8.1) анкерными (фундаментными) болтами.

Расчет колонны на ветровую нагрузку выполняется в следующем порядке. Аппарат по высоте условно разбивают на участки " $h_i$ ", величиной не больше 10 м. Сила веса " $G_i$ " принимается сосредоточенной в середине каждого " $i$ " участка. Ветровая нагрузка, которая является распределенной по высоте, также заменяется сосредоточенными силами " $P_i$ ", которые прилагаются к тем же точкам, что и сила веса " $G_i$ ".

Нормативный скоростной напор ветра " $q$ " на расстоянии 10 м от поверхности Земли принимают по справочным данным в зависимости от географического (ветрового) района (табл. 8.2). Для колонн высотой более, чем 10 м, нормативный скоростной напор " $q_i$ " или определяют интерполяцией данных табл. 8.2, или получают, как произведение ветрового напора на высоте 10 м на поправочный коэффициент  $\Theta$ . Его значение при высоте  $H = 20$  м составляет  $\Theta = 1,38$ ; при  $H = 30$  м  $\Theta = 1,48$ ; при  $H = 50$  м  $\Theta = 1,82$ .

Таблица 8.2 – Удельный ветровой напор, Па

Географический район	Высота над поверхностью Земли			
	до 10 м	20 м	40 м	100 м
I	270	365	485	595
II	350	470	630	770
III	450	610	810	990
IV	550	740	990	1210
V	700	945	1260	1540
VI	850	1150	1530	1870
VII	1000	1350	1800	2200

Сила " $P_i$ ", которая действует на " $i$ " участок цилиндрической колонны от ветрового напора, определяется за формулой:

$$P_i = c_0 \cdot \beta_i \cdot q_i \cdot D_i \cdot h_i,$$

где  $c_0$  – коэффициент аэродинамического обтекания, который для цилиндрических аппаратов равняется 0,6;

$$\beta_i – \text{коэффициент возрастания скоростного напора ветра: } \beta_i = 1 + \varepsilon \cdot m_i;$$

$\varepsilon$  – коэффициент динамичности, который определяют из рис. 8.2 в зависимости от периода собственных колебаний колонны –  $T$ . Для нахождения " $\varepsilon$ " в интервале от  $T = 0$  с до  $T = 10$  с можно использовать формулу:

$$\varepsilon = 1 + 0,89 \cdot T - 0,113 \cdot T^2 + 4,68 \cdot 10^{-3} \cdot T^3;$$

$m_i$  – коэффициент пульсаций скоростного напора ветра, который определяют по высоте участка над Землей (таблица 8.3);

$q_i$  – нормативный скоростной напор ветра, который определяется из табл. 8.2 или с применением поправочного коэффициента  $\Theta$ ;

$D_i$  – внешний диаметр "i" участка колонны; при наличии тепловой изоляции – это внешний диаметр изоляции;

$h_i$  – высота "i" участка аппарата.

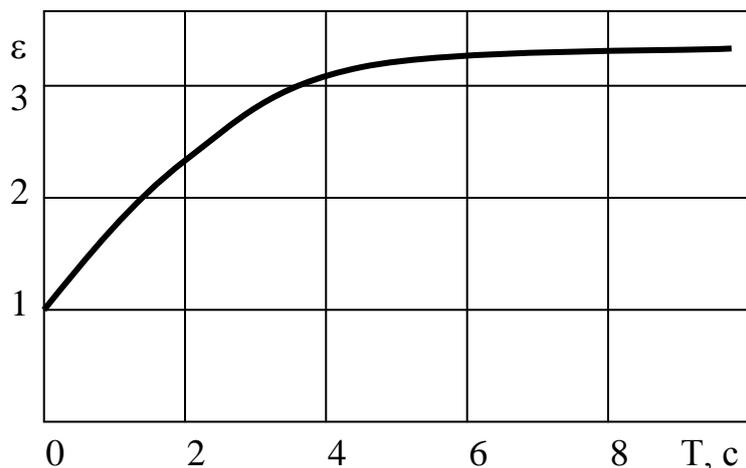


Рисунок 8.2 – Зависимость коэффициента динамичности от периода собственных колебаний колонны

Таблица 8.3 – Коэффициент пульсаций скоростного напора ветра в зависимости от высоты над поверхностью Земли

$H_i$	0 м	20 м	40 м	60 м	80 м	100 м	200 м
$m_i$	0,35	0,35	0,32	0,28	0,25	0,21	0,21

Период собственных колебаний колонны "T" определяют по формуле:

$$T = 1,79 \cdot H \cdot \sqrt{M_{\text{MAX}} \cdot \frac{H}{E_t \cdot I}}, \text{ с,}$$

где  $H$  – высота колонны без изоляции, м;

$M_{\text{MAX}}$  – максимальная масса колонны, кг;

$E_t$  – модуль упругости материала колонны при рабочей температуре (рис. 8.3), Па. Для нахождения  $E_t$  также можно использовать формулы, справедливые в интервале температур от 0 до 500 °С:

$$E_t = 2,03 \cdot 10^{11} - 3,4 \cdot 10^6 \cdot t + 7,5 \cdot 10^4 \cdot t^2 - 780 \cdot t^3 \quad \text{– для углеродистых сталей;}$$

$$E_t = 1,98 \cdot 10^{11} - 9,2 \cdot 10^7 \cdot t \quad \text{– для легированных сталей аустенитного класса;}$$

$I = \pi \cdot D_{\text{CP}}^3 \cdot (S - C_1) / 8$  – момент инерции поперечного сечения относительно оси,  $\text{м}^4$ ;

$C_1$  – толщина слоя на поверхности колонны, подверженная коррозии, м;

$S$  – толщина стенки колонны, м;

$D_H$  и  $D_B$  – внешний и внутренний диаметры опорного кольца, м.

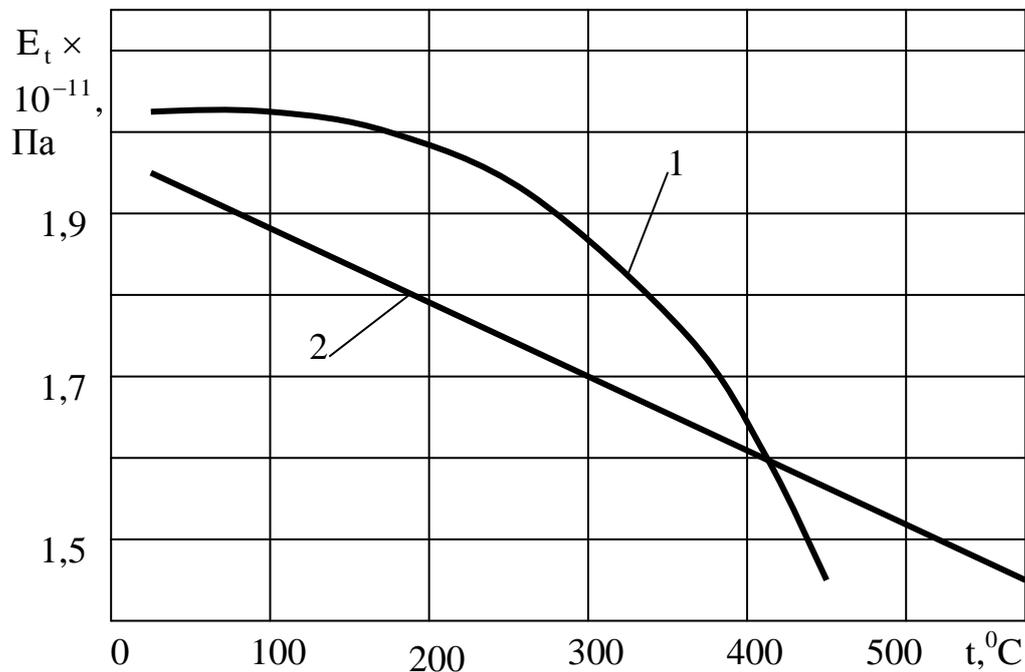


Рисунок 8.3 – Зависимость модуля упругости от температуры:

1 – углеродистые стали; 2 – легированные стали

Изгибающий момент от ветровой нагрузки относительно основы аппарата определяют по формуле:

$$M_B = \sum_{i=1}^N P_i \cdot x_i, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $x_i$  – расстояние от середины "i" участка до основания аппарата, м;

$N$  – число участков по высоте колонны.

После определения сгибающего момента  $M_B$  выполняют проверку аппарата на прочность. Для этого напряжения от осевой силы и сгибающего момента складывают и определяют максимальное суммарное напряжение сжатия с подветренной стороны:

$$\sigma_{CT} = \frac{G_{BEC}}{F} + \frac{M_B}{W}, \text{ Па},$$

где  $F$  и  $W$  – площадь и момент сопротивления поперечного кольцевого перерезу колони:

$$F = \pi \cdot D_{CP} \cdot (S - C_1), \text{ м}^2;$$

$$W = \pi \cdot D_{CP}^2 \cdot (S - C_1) / 4, \text{ м}^3;$$

$G_{BEC} = M_{MAX} \cdot g$  – максимальный вес аппарата, который учитывает вес самого аппарата; всех конструкций, которые опираются на колонну; вес изоляции, а также вес жидкости, которой заполняют аппарат при гидравлических испытаниях.

Полученное значение  $\sigma_{CT}$  сравнивают с допустимым и делают выводы относительно прочности корпуса колонны. Максимальное допустимое напряжение сжатия  $[\sigma_{CT}]$  для аппаратов, которые расположены под

открытым небом, составляет 80-90 МПа. В случае несоответствия условию  $\sigma_{CT} \leq [\sigma_{CT}]$ , нужно увеличить толщину стенки аппарата.

Расчет опоры состоит из определения площади опоры, которая стыкуется с фундаментом и толщины опорного кольца. Кольцевая опора нагружена осевой силой  $G_{ВЕС} = M_{МАХ} \cdot g$  и ветровым моментом  $M_B$  (рис. 8.4). Наибольшее удельное давление на опорной поверхности кольца наблюдается с подветренной стороны в крайней точке "а", где суммируются напряжения от сжатия и сгибания:

$$q_0 = \frac{G_{ВЕС}}{F_{ОП}} + \frac{M_B}{W_{ОП}},$$

где  $F_{ОП}$  – площадь опорного кольца:  $F_{ОП} = \frac{\pi \cdot (D_H^2 - D_B^2)}{4}$ ;

$W_{ОП}$  – момент сопротивления опорной площади:  $W_{ОП} = \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D_H^4 - D_B^4}{D_H} \right)$ .

Допустимое удельное давление на бетонный фундамент  $[q_0]$  в зависимости от марки бетона составляет 2,0-2,5 МПа. В случае невыполнения условия прочности фундамента  $q_0 \leq [q_0]$ , необходимо изменить значения  $D_H$  и  $D_B$  для обеспечения приведенного соотношения.

Толщину опорного кольца определяют в расчете на изгиб выступающей за колонну его участка (рис. 8.5):

$$\delta_K \geq B \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot q_0}{[\sigma_{3Г}]}}$$

где "В" – длина выступающей части кольца, м;

$[\sigma_{3Г}] = 50-60$  МПа – допустимое напряжение материала опорного кольца на изгиб.

Усилие, которое действует на наиболее нагруженный фундаментный болт:

$$P_B = \frac{F_{ОП} \cdot q_1}{n}, \text{ Н,}$$

где n – количество фундаментных болтов;

$q_1$  – удельная сила, которая отрывает кольцо от опоры в точке "б" (рис. 8.4)

$$q_1 = \frac{M_B}{W_{ОП}} - \frac{M_{МИН} \cdot g}{F_{ОП}}, \text{ Па,}$$

где  $M_{МИН}$  – масса аппарата без изоляции и внутренних устройств.

Внутренний диаметр нарезки болта:

$$d_B = \sqrt{\frac{4 \cdot P_B}{\pi \cdot [\sigma_{РОЗ}]} + C_2},$$

где  $[\sigma_{PO3}]$  – допустимое напряжение на растяжение материала болта; для анкерных болтов из стали 3 величина  $[\sigma_{PO3}]$  составляет 110-140 МПа;

$C_2$  – толщина слоя на поверхности анкерного болта, подвергаемая коррозии. Этот слой обычно принимают 3 мм.

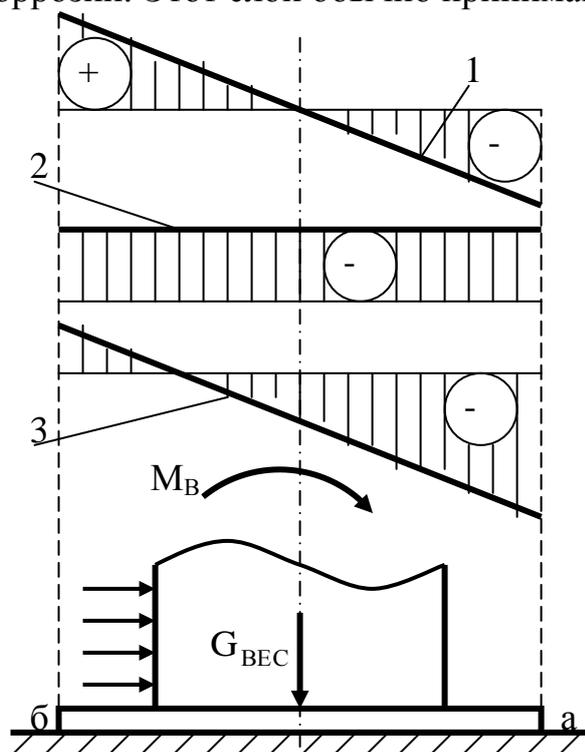


Рисунок 8.4 – Напряжение в опоре:  
1 – изгиб; 2 – сжатие; 3 – сумма

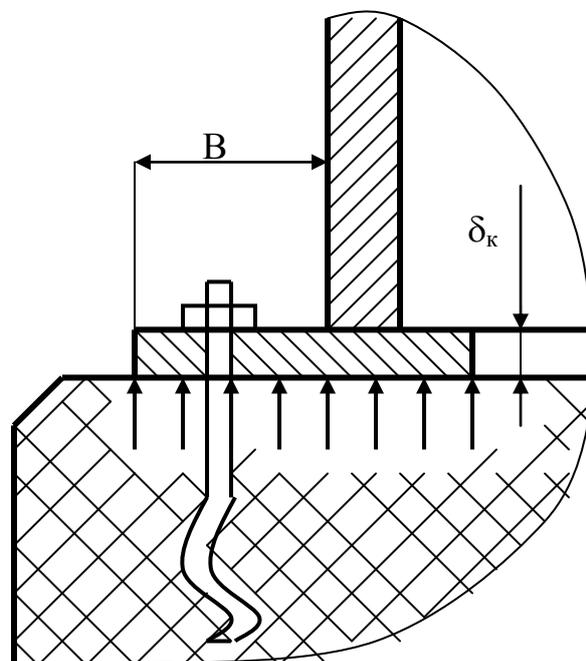


Рисунок 8.5 – Узел опорного кольца

### 8.3 Пример расчета прочности корпуса колонны и бетонного фундамента с учетом ветровой нагрузки

#### Исходные данные:

Абсорбционная колонна, которая имеет высоту  $H = 38$  м, внутренний диаметр  $D = 1,8$  м, толщину стенки  $S = 16$  мм и тепловой изоляции  $S_1 = 80$  мм, расположена в  $V_{et} = IV$  ветровом районе и выполнена из легированной аустенитной стали. Средняя температура стенки колонны составляет  $t = 250$  °С. Толщина слоя на поверхности стенки, подверженная коррозии  $C_1 = 2$  мм. Максимальная масса заполненной колонны с внутренним оборудованием при гидравлических испытаниях  $M_{MAX} = 40$  тонн, минимальная масса ее  $M_{MIN} = 32$  тонн. Колонна опирается на опорное кольцо с внутренним диаметром  $D_B = 1,44$  м и внешним  $D_H = 2,7$  м, которое крепится к бетонному фундаменту с помощью  $n = 20$  анкерных болтов. Выполнить проверку прочности корпуса колонны и бетонного фундамента с учетом ветровой нагрузки, определить минимально допустимые значения толщины опорного кольца и внутреннего диаметра нарезки фундаментных болтов.

Решение:

1) Разбиваем условно колонну по высоте на  $N = 4$  участка длиной  $h_1 = 10$  м;  $h_2 = 10$  м;  $h_3 = 10$  м;  $h_4 = 8$  м.

2) Внешний диаметр колонны на этих участках (с учетом тепловой изоляции):

$$D_{\text{НАР}} = D + 2 \cdot S + 2 \cdot S_1 = 1,8 + 2 \cdot 0,016 + 2 \cdot 0,080 = 1,992 \text{ м.}$$

3) Из табл. 8.2 для IV ветрового района находим величину удельного ветрового напора на каждом из участков по высоте колонны с использованием линейной интерполяции:

$$q_1 = q_{10} = 550 \text{ Па;}$$

$$q_2 = q_{10} + (q_{20} - q_{10}) \cdot \frac{h_2/2}{20 - 10} = 550 + (740 - 550) \cdot \frac{10/2}{20 - 10} = 645 \text{ Па ;}$$

$$q_3 = q_{20} + (q_{40} - q_{20}) \cdot \frac{h_3/2}{40 - 20} = 740 + (990 - 740) \cdot \frac{10/2}{40 - 20} = 802,5 \text{ Па ;}$$

$$q_4 = q_{20} + (q_{40} - q_{20}) \cdot \frac{h_3 + h_4/2}{40 - 20} = 740 + (990 - 740) \cdot \frac{10 + 8/2}{40 - 20} = 915 \text{ Па ,}$$

где  $q_{10}$ ,  $q_{20}$ ,  $q_{40}$  – удельный ветровой напор на высоте 10, 20 и 40 м.

4) Средний диаметр корпуса колонны:

$$D_{\text{СР}} = D + S = 1,8 + 0,016 = 1,816 \text{ м.}$$

5) Момент инерции поперечного перерезу колонны относительно центральной оси:

$$I = \pi \cdot D_{\text{СР}}^3 \cdot (S - C_1) / 8 = \pi \cdot 1,816^3 \cdot (0,016 - 0,002) / 8 = 0,033 \text{ м}^4.$$

6) Из рисунка 8.3 находим модуль упругости легированной аустенитной стали при температуре  $t = 250$  °С:  $E_t = 1,75 \cdot 10^{11}$  Па .

7) Период собственных колебаний колонны:

$$T = 1,79 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{H \cdot M_{\text{МАХ}}}{E_t \cdot I}} = 1,79 \cdot 38 \cdot \sqrt{\frac{38 \cdot 40000}{1,75 \cdot 10^{11} \cdot 0,033}} = 1,1 \text{ с.}$$

8) Из рисунка 8.2 коэффициент динамичности при  $T = 1,1$  с:  $\varepsilon = 1,85$ .

9) Коэффициент пульсаций скоростного напора ветра на участках по высоте колонны (из табл. 8.3):

$$m_1 = m_{20} = 0,35;$$

$$m_2 = m_{20} = 0,35;$$

$$m_3 = m_{20} + (m_{40} - m_{20}) \cdot \frac{h_3/2}{40 - 20} = 0,35 + (0,32 - 0,35) \cdot \frac{10/2}{40 - 20} = 0,342;$$

$$m_4 = m_{20} + (m_{40} - m_{20}) \cdot \frac{h_3 + h_4/2}{40 - 20} = 0,35 + (0,32 - 0,35) \cdot \frac{10 + 8/2}{40 - 20} = 0,329,$$

где  $m_{20}$ ,  $m_{40}$  – коэффициент пульсаций напора ветра на высоте 20 и 40 м.

10) Коэффициент роста скоростного напора ветра по участкам колонны:

$$\beta_1 = 1 + \varepsilon \cdot m_1 = 1 + 1,85 \cdot 0,35 = 1,65;$$

$$\beta_2 = 1 + \varepsilon \cdot m_2 = 1 + 1,85 \cdot 0,35 = 1,65;$$

$$\beta_3 = 1 + \varepsilon \cdot m_3 = 1 + 1,85 \cdot 0,3425 = 1,63;$$

$$\beta_4 = 1 + \varepsilon \cdot m_4 = 1 + 1,85 \cdot 0,329 = 1,61.$$

11) Сила, которая прилагается к участкам колонны от ветрового напора:

$$P_1 = c_0 \cdot \beta_1 \cdot q_1 \cdot D_{\text{НАР}} \cdot h_1 = 0,6 \cdot 1,65 \cdot 550 \cdot 1,992 \cdot 10 = 10,8 \text{ кН};$$

$$P_2 = c_0 \cdot \beta_2 \cdot q_2 \cdot D_{\text{НАР}} \cdot h_2 = 0,6 \cdot 1,65 \cdot 645 \cdot 1,992 \cdot 10 = 12,7 \text{ кН};$$

$$P_3 = c_0 \cdot \beta_3 \cdot q_3 \cdot D_{\text{НАР}} \cdot h_3 = 0,6 \cdot 1,63 \cdot 802,5 \cdot 1,992 \cdot 10 = 15,7 \text{ кН};$$

$$P_4 = c_0 \cdot \beta_4 \cdot q_4 \cdot D_{\text{НАР}} \cdot h_4 = 0,6 \cdot 1,61 \cdot 915 \cdot 1,992 \cdot 8 = 14,1 \text{ кН}.$$

12) Изгибающий момент от ветровой нагрузки относительно основы аппарата:

$$\begin{aligned} M_B &= \sum_{i=1}^N P_i \cdot x_i = P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2 + P_3 \cdot x_3 + P_4 \cdot x_4 = P_1 \cdot (h_1 / 2) + \\ &+ P_2 \cdot (h_1 + h_2 / 2) + P_3 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 / 2) + P_4 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 / 2) = \\ &= 10800 \cdot (10 / 2) + 12700 \cdot (10 + 10 / 2) + 15700 \cdot (10 + 10 + 10 / 2) + \\ &+ 14100 \cdot (10 + 10 + 10 + 8 / 2) = 1115 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

13) Площадь поперечного сечения стенки корпуса колонны:

$$F = \pi \cdot D_{\text{СР}} \cdot (S - C_1) = \pi \cdot 1,816 \cdot (0,016 - 0,002) = 0,0799 \text{ м}^2.$$

14) Момент сопротивления поперечного кольцевого сечения колонны:

$$W = \pi \cdot D_{\text{СР}}^2 \cdot (S - C_1) / 4 = \pi \cdot 1,816^2 \cdot (0,016 - 0,002) / 4 = 0,0363 \text{ м}^3.$$

15) Максимальный вес аппарата

$$G_{\text{ВЕС}} = M_{\text{МАХ}} \cdot g = 40000 \cdot 9,81 = 392,4 \text{ кН}.$$

16) Напряжение сжатия в опорном сечении корпуса колонны с подветренной стороны (сторона, противоположная той, на которую дует ветер):

$$\sigma_{\text{СТ}} = \frac{G_{\text{ВЕС}}}{F} + \frac{M_B}{W} = \frac{392400}{0,0799} + \frac{1115000}{0,0363} = 35,7 \text{ МПа}.$$

17) Эта величина отвечает условию прочности корпуса колонны:

$$(\sigma_{\text{СТ}} = 35,7 \text{ МПа}) < ([\sigma_{\text{СТ}}] = 90 \text{ МПа}).$$

18) Площадь опорного кольца колонны:

$$F_{\text{ОП}} = \frac{\pi \cdot (D_H^2 - D_B^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (2,7^2 - 1,44^2)}{4} = 4,097 \text{ м}^2.$$

19) Момент сопротивления опорной плоскости:

$$W_{\text{ОП}} = \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D_H^4 - D_B^4}{D_H} \right) = \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{2,7^4 - 1,44^4}{2,7} \right) = 1,776 \text{ м}^3.$$

20) Наибольшее удельное давление, которое оказывает опорное кольцо на фундамент в крайней точке с подветренной стороны:

$$q_0 = \frac{G_{\text{ВЕС}}}{F_{\text{ОП}}} + \frac{M_B}{W_{\text{ОП}}} = \frac{392400}{4,097} + \frac{1115000}{1,776} = 0,724 \text{ МПа}.$$

21) Получено значение  $q_0$  не превышает величины допустимого удельного давления на бетонный фундамент  $[q_0] = 2,5 \text{ МПа}$ , то есть условие прочности фундамента выдерживается.

22) Размер выступающей за корпус колонны части опорного кольца:

$$B = (D_H - D - 2 \cdot S) / 2 = (2,7 - 1,8 - 2 \cdot 0,016) / 2 = 0,434 \text{ м.}$$

23) Необходимая толщина опорного кольца колонны:

$$\delta_K \geq B \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot q_0}{[\sigma_{3Г}]} } = 0,434 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 724000}{55}} = 0,0862 \text{ м} = 86,2 \text{ мм.}$$

Принимаем минимально необходимую толщину кольца  $\delta_K = 87 \text{ мм}$ .

24) Удельная сила, которая отрывает опорное кольцо от фундамента в крайней точке с наветренной стороны (сторона, на которую дует ветер):

$$q_1 = \frac{M_B}{W_{OP}} - \frac{M_{MIN} \cdot g}{F_{OP}} = \frac{1115000}{1,776} - \frac{32000 \cdot 9,81}{4,097} = 551 \text{ кПа.}$$

25) Усилие, которое действует на наиболее нагруженный фундаментный болт с наветренной стороны:

$$P_B = \frac{F_{OP} \cdot q_1}{n} = \frac{4,097 \cdot 551000}{20} = 113 \text{ кН.}$$

26) Внутренний диаметр нарезки анкерных болтов:

$$d_B = \sqrt{\frac{4 \cdot P_B}{\pi \cdot [\sigma_{PO3}]}} + C_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 113000}{\pi \cdot 125 \cdot 10^6}} + 0,003 = 0,0369 \text{ м} = 36,9 \text{ мм.}$$

Принимаем диаметр болтов по внутренней нарезке  $d_B = 37 \text{ мм}$ .

Ответ:

Показатели прочности колонного аппарата, работающего в условиях ветровой нагрузки не превышают допустимые значения.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунках 8.6а-8.6в.

## 8.4 Задания для самостоятельной работы

### Задача 8.1

Определить внешний диаметр колонны, если внутренний диаметр равен 2,5 м, толщина стальной стенки корпуса 25 мм, а толщина тепловой изоляции на поверхности корпуса 100 мм.

### Задача 8.2

Определить средний диаметр стального корпуса колонны, если внутренний диаметр равен 2,5 м, толщина стальной стенки 25 мм.

### Задача 8.3

Определить изгибающий момент от ветровой нагрузки относительно основы аппарата, если высота колонны 10 м, а сила, которая прилагается к средней точке по высоте колонны, от ветрового напора 15700 Н.

### Задача 8.4

Определить максимальный вес аппарата, если его масса 50 тонн.

### Задача 8.5

Определить площадь сечения опорного кольца колонны, если наружный диаметр кольца 3 м, а внутренний диаметр кольца равен 2,5 м.

ORIGIN := 1  
**Дано:**  
H := 38. - высота колонны, м  
h\_max := 10. - максимальная длина расчетных участков по высоте колонны, м  
D\_кол := 1.8 - внутренний диаметр колонны, м  
S := 0.016 - толщина стенки колонны, м  
S\_1 := 0.080 - толщина тепловой изоляции, м  
t := 250. - средняя температура стенки колонны, С  
C\_1 := 0.0020 - толщина слоя на пов-сти стенки колонны, подверженного коррозии, м  
C\_2 := 0.003 - толщина слоя на пов-сти анкерного болта, подверженного коррозии, м  
Vet\_район := 4 - географический (ветровой) район  
M\_max := 40000. - максимальная масса заполненной колонны при гидравл. испыт., кг  
M\_min := 32000. - минимальная масса колонны, кг  
D\_н := 2.70 - наружный диаметр опорного кольца, м  
D\_в := 1.44 - внутренний диаметр опорного кольца, м  
n := 20 - количество анкерных болтов, крепящих опорное кольцо к фундаменту  
g := 9.81 - ускорение свободного падения, Н/кг  
Stal := 2 - сталь (углеродистая сталь - 1; легиров. сталь аустенитного класса - 2)  
 $\sigma_{ст\_доп} := 90 \cdot 10^6$  - допустимое напряжение для материала корпуса колонны, Па  
 $q_0\_доп := 2.5 \cdot 10^6$  - допустимое давление на бетонное основание колонны, Па  
 $\sigma_{изг\_доп} := 55 \cdot 10^6$  - допустимое напряжение материала опорного кольца на изгиб, Па  
 $\sigma_{растяж\_доп} := 125 \cdot 10^6$  - допустимое напряжение на растяжение материала болта, Па

**Решение:**

1. Разбивка колонны по высоте на расчетные участки:

$N := \text{ceil}\left(\frac{H}{h\_max}\right) = 4$  - число участков:

$h := \begin{cases} h_1 \leftarrow h\_max & \text{if } N > 1 \\ h_1 \leftarrow H & \text{otherwise} \end{cases}$   
for i ∈ 2..N  
 $\begin{cases} h_i \leftarrow h_{i-1} + h\_max & \text{if } i < N \\ h_i \leftarrow H & \text{otherwise} \end{cases}$

$h^T = (10 \ 20 \ 30 \ 38)$  - конец каждого участка, м:

$\Delta h := \begin{cases} \Delta h_1 \leftarrow h_1 \\ \text{for } i \in 2..N \\ \Delta h_i \leftarrow h_i - h_{i-1} \\ \Delta h \end{cases}$

$\Delta h^T = (10 \ 10 \ 10 \ 8)$  - длина каждого участка, м:

2. Наружный диаметр колонны на расчетных участках (с учетом тепловой изоляции), м

$D := D\_кол + 2 \cdot S + 2 \cdot S_1 = 1.992$

3. Удельный ветровой напор на каждом расчетном участке по высоте колонны, Па  
Справочная таблица:

1	270	365	485	595
2	350	470	630	770
3	450	610	810	990
4	550	740	990	1210
5	700	945	1260	1540
6	850	1150	1530	1870
7	1000	1350	1800	2200

Рисунок 8.6а – Протокол выполнения задания "Расчет конструктивных элементов колонного аппарата с учетом ветровой нагрузки" (начало)

$i := 1..4$      $qh_i := (Уд\_напор\_ветра^{(i+1)})_{Vet \text{ район}}$      $Высота := (10 \ 20 \ 40 \ 100)^T$   
 Из этой таблицы для ветрового района Vet район = 4 удельный ветровой напор равен, Па:  
 $qh^T = (550 \ 740 \ 990 \ 1210)$     при высотах:  $Высота^T = (10 \ 20 \ 40 \ 100)$  метров  
 $q := \begin{cases} q_1 \leftarrow \text{linterp}(Высота, qh, h_1) \\ \text{for } i \in 2..N \\ q_i \leftarrow 0.5 \cdot (\text{linterp}(Высота, qh, h_i) + \text{linterp}(Высота, qh, h_{i-1})) \\ q \end{cases}$   
 $q^T = (550.0 \ 645.0 \ 802.5 \ 915.0)$  - уд. ветровой напор на участках по высоте колонны, Па  
 4. Средний диаметр корпуса колонны, м  
 $D_{cp} := D_{кол} + S = 1.816$   
 5. Момент инерции поперечного сечения колонны относительно центральной оси, м<sup>4</sup>  
 $I := \frac{\pi \cdot D_{cp}^3}{96} \cdot (S - C_1) = 0.033$   
 6. Модуль упругости материала колонны при рабочей температуре  
 $E(t) := \begin{cases} E \leftarrow 2.03 \cdot 10^{11} - 3.4 \cdot 10^6 \cdot t + 7.5 \cdot 10^4 \cdot t^2 - 780 \cdot t^3 & \text{if } Stal = 1 \\ E \leftarrow 1.98 \cdot 10^{11} - 9.2 \cdot 10^7 \cdot t & \text{if } Stal = 2 \end{cases}$   
 При температуре  $t = 250$  град.С модуль упругости составит, Па:  $E_t := E(t) = 1.75 \times 10^{11}$   
 7. Период собственных колебаний колонны, с  
 $T := 1.79 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{H \cdot M_{max}}{E_t \cdot I}} = 1.1$   
 8. Коэффициент динамичности для величины  $T = 1.1$  с  
 $\epsilon_{д(T)} := 1 + 0.89 \cdot T - 0.113 \cdot T^2 + 4.68 \times 10^{-3} \cdot T^3$   
 $\epsilon := \epsilon_{д(T)} = 1.85$   
 9. Коэффициент пульсации скоростного напора ветра на участках по высоте колонны  
 Справочная таблица:  
 $Koef := \begin{pmatrix} 0 & 20 & 40 & 60 & 80 & 100 & 200 \\ 0.35 & 0.35 & 0.32 & 0.28 & 0.25 & 0.21 & 0.21 \end{pmatrix}^T$   
 $hk := Koef^{(1)}$      $kh := Koef^{(2)}$   
 $m := \begin{cases} m_1 \leftarrow \text{linterp}(hk, kh, h_1) \\ \text{for } i \in 2..N \\ m_i \leftarrow 0.5 \cdot (\text{linterp}(hk, kh, h_i) + \text{linterp}(hk, kh, h_{i-1})) \\ m \end{cases}$   
 $m^T = (0.35 \ 0.35 \ 0.342 \ 0.329)$   
 10. Коэффициент возрастания скоростного напора ветра на участках колонны  
 $\beta := 1 + \epsilon \cdot m$   
 $\beta^T = (1.65 \ 1.65 \ 1.63 \ 1.61)$   
 11. Сила, приложенная к участкам цилиндрической колонны от ветрового напора, Н  
 $C_0 := 0.6$  - коэффициент аэродинамического обтекания. Для круглых колонн равен 0,6.  
 $i := 1..N$      $P_i := C_0 \cdot \beta_i \cdot q_i \cdot D \cdot \Delta h_i$   
 $P^T = (10.8 \times 10^3 \ 12.7 \times 10^3 \ 15.7 \times 10^3 \ 14.1 \times 10^3)$   
 12. Изгибающий момент от ветровой нагрузки относительно основания аппарата, Н\*м  
 $M_{в} := \sum_{i=1}^N \left[ P_i \cdot \left( h_i - \frac{\Delta h_i}{2} \right) \right] = 1.115 \times 10^6$   
 13. Площадь поперечного сечения стенки корпуса колонны, м<sup>2</sup>  
 $F := \pi \cdot D_{cp} \cdot (S - C_1) = 0.0799$

Рисунок 8.6б – Протокол выполнения задания "Расчет конструктивных элементов колонного аппарата с учетом ветровой нагрузки" (продолжение рисунка 8.6а)

14. Момент сопротивления поперечного кольцевого сечения колонны, м<sup>3</sup>

$$W := \frac{\pi \cdot D_{cp}^2}{4} \cdot (S - C_1) = 0.0363$$

15. Максимальный вес аппарата, Н

$$G_{вес} := M_{max} \cdot g = 392.4 \times 10^3$$

16. Напряжение сжатия в опорном сечении корпуса колонны с подветренной стороны (сторона, противоположная той, на которую дует ветер), Па

$$\sigma_{ст} := \frac{G_{вес}}{F} + \frac{M_{в}}{W} = 35.7 \times 10^6$$

17. Вывод по прочности колонны

$$\text{Вывод} := \begin{cases} B \leftarrow \text{"Напряж. сжатия ОТВЕЧАЕТ условию прочности корпуса"} & \text{if } \sigma_{ст} \leq \sigma_{ст\_доп} \\ B \leftarrow \text{"Напряж. сжатия НЕ ОТВЕЧАЕТ условию прочности корпуса"} & \text{otherwise} \\ B \end{cases}$$

Вывод = "Напряж. сжатия ОТВЕЧАЕТ условию прочности корпуса"

18. Площадь опорного кольца колонны, м<sup>2</sup>

$$F_{оп} := \frac{\pi \cdot (D_{н}^2 - D_{в}^2)}{4} = 4.097$$

19. Момент сопротивления опорной площади, м<sup>3</sup>

$$W_{оп} := \frac{\pi \cdot (D_{н}^4 - D_{в}^4)}{32 \cdot D_{н}} = 1.776$$

20. Наибольшее удельное давление, которое оказывает опорное кольцо на фундамент в крайней точке с подветренной стороны, Па

$$q_0 := \frac{G_{вес}}{F_{оп}} + \frac{M_{в}}{W_{оп}} = 724 \times 10^3$$

21. Вывод по нагрузке на фундамент основания

$$\text{Вывод} := \begin{cases} B \leftarrow \text{"Давление на бетонный фундамент МЕНЬШЕ допустимого"} & \text{if } q_0 \leq q_{0\_доп} \\ B \leftarrow \text{"Давление на бетонный фундамент БОЛЬШЕ допустимого"} & \text{otherwise} \\ B \end{cases}$$

Вывод = "Давление на бетонный фундамент МЕНЬШЕ допустимого"

22. Длина выступающей за корпус колонны части опорного кольца (без учета тепловой изоляции), м

$$B := \frac{D_{н} - D_{кол}}{2} - S = 0.434$$

23. Минимально необходимая толщина опорного кольца колонны, м

$$\delta_k := B \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot q_0}{\sigma_{изг\_доп}}} = 0.0862$$

Принимаем, мм  $\delta_k := \text{ceil}(\delta_k \cdot 1000.) = 87$

24. Удельная сила, которая отрывает опорное кольцо от фундамента в крайней точке с наветренной стороны (сторона, на которую дует ветер), Па

$$q_1 := \frac{M_{в}}{W_{оп}} - \frac{M_{min-g}}{F_{оп}} = 551 \times 10^3$$

25. Усилие, которое действует на наиболее нагруженный анкерный болт с наветренной стороны, Н

$$P_6 := \frac{F_{оп} \cdot q_1}{n} = 113 \times 10^3$$

26. Минимальный внутренний диаметр нарезки анкерных болтов, м

$$d_v := \sqrt{\frac{4 \cdot P_6}{\pi \cdot \sigma_{растяж\_доп}}} + C_2 = 0.0369$$

Принимаем, мм  $d_v := \text{ceil}(d_v \cdot 1000.) = 37$

Рисунок 8.6в – Протокол выполнения задания "Расчет конструктивных элементов колонного аппарата с учетом ветровой нагрузки" (продолжение рисунков 8.6а и 8.6б)

### **8.5 Контрольные вопросы по практической работе**

- 1) С какой целью колонные аппараты выносятся за пределы цеха?
- 2) В какой части колонного аппарата ветровая нагрузка может привести к разрушению аппарата?
- 3) В каком географическом районе ветровая нагрузка наименьшая и в каком – наибольшая?
- 4) В чем измеряются следующие параметры: а) максимальная масса колонны; б) давление на бетонное основание колонны; в) удельный ветровой напор; г) период собственных колебаний колонны; д) модуль упругости материала колонны; е) изгибающий момент?
- 5) Можно ли складывать напряжения от действия осевой силы и от сгибающего момента?
- 6) Как определить вес колонны, если известна масса колонны?
- 7) Как зависит усилие, которое действует на наиболее нагруженный фундаментный болт, от количества болтов?

## 9 Охлаждение газа атмосферным воздухом. Тепловые расчеты<sup>9</sup>

### 9.1 Основы расчетов охлаждения газа атмосферным воздухом

В тепловых расчетах встречаются близкие по формулировкам параметры, характеризующие физическую теплоту вещества: энтальпия и удельная энтальпия. Энтальпия имеет размерность Дж или Дж/с = Вт, а удельная энтальпия имеет размерность Дж/кг, Дж/м<sup>3</sup>, Дж/моль.

В расчетах нагрева и охлаждения газов чаще всего используют энтальпию в размерности Вт, которую определяют по формуле:

$$I = V \cdot c \cdot t \text{ [Вт]}, \quad (9.1)$$

а также удельную энтальпию в размерности Дж/м<sup>3</sup>, которую определяют по формуле:

$$i = c \cdot t \text{ [Дж/м}^3\text{]}. \quad (9.2)$$

Здесь:  $V$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость газа, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t$  – температура, °С.

Рассмотрим тепловой баланс процесса смешивания горячего газа с атмосферным воздухом. Общая энтальпия смеси должна быть равна сумме энтальпий горячего газа и атмосферного воздуха:

$$(V_{\Gamma} + V_{\text{в}}) \cdot c_{\text{см}} \cdot t_{\text{см}} = V_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} + V_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} \text{ [Вт]}, \quad (9.3)$$

где  $V_{\Gamma}$  – расход горячего газа, поступающего на охлаждение при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/с;  $V_{\text{в}}$  – расход атмосферного воздуха, вводимого в горячий газ при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/с;  $c_{\text{см}}$ ,  $c_{\Gamma}$ ,  $c_{\text{в}}$  – удельная объемная теплоемкость соответственно смеси газа с воздухом, газа и воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{\text{см}}$ ,  $t_{\Gamma}$ ,  $t_{\text{в}}$  – температура соответственно смеси газа с воздухом, газа и воздуха, °С.

Без большой погрешности можно принять, что теплоемкости газов и воздуха при нормальных условиях одинаковы и приблизительно равны 1,38 кДж/(м<sup>3</sup>·К). Тогда уравнение (9.3) теплового баланса примет вид

$$(V_{\Gamma} + V_{\text{в}}) \cdot t_{\text{см}} = V_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} + V_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}. \quad (9.4)$$

Из этого уравнения можно найти температуру смеси газа с воздухом при известных их расходах и начальных температурах:

---

<sup>9</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [6]

$$t_{\text{см}} = \frac{V_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} + V_{\text{В}} \cdot t_{\text{В}}}{V_{\Gamma} + V_{\text{В}}}. \quad (9.5)$$

Количество воздуха, которое нужно ввести в горячий газ для получения смеси требуемой температуры, может быть определено по формуле

$$V_{\text{В}} = \frac{V_{\Gamma} \cdot (t_{\Gamma} - t_{\text{см}})}{t_{\text{см}} - t_{\text{В}}}. \quad (9.6)$$

В горячий газ атмосферный воздух обычно вводят без применения вентиляторов. Если в газоходе, который находится под разрежением, установить патрубок, сообщающийся с атмосферой, то атмосферный воздух через этот патрубок будет всасываться в газоход. Количество воздуха, всасываемого в газоход, можно регулировать вручную или автоматически при помощи шиберного устройства.

Охлаждение газа таким методом требует подсоса значительного количества атмосферного воздуха, что приводит к увеличению объема газа, поступающего на очистку. В свою очередь чем больше газа поступает на очистку, тем большие габариты должны иметь аппараты и газовый тракт и тем больше будет расход энергии для транспортировки газа и его очистки. Поэтому этот метод применяют для небольшого снижения температуры газа, обычно при начальной температуре газа меньше 150°C.

## 9.2 Примеры расчетов

### 9.2.1 Пример 1 – Энтальпия газа

Исходные данные:

Имеется газ с температурой  $t = 140$  °С. Его удельная теплоемкость  $c = 1,4$  кДж/(м<sup>3</sup> · К).

Задание:

Определить удельную энтальпию газа.

Решение:

а) Удельная энтальпия газа определяется по формуле (9.2)

$$i = c \cdot t = 1400 \cdot 140 = 196000 \text{ Дж/м}^3.$$

Ответ:

Удельная энтальпия газа составляет 196000 Дж/м<sup>3</sup>.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 9.1

<b>Дано:</b>	
$c := 1.4 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость газа, Дж/(м <sup>3</sup> *К)
$t := 140.$	- температура газа, С
<b>Решение:</b>	
$i := c \cdot t = 196000$	- удельная энтальпия, Дж/м <sup>3</sup>
<b>Ответ:</b>	
Удельная энтальпия газа составляет $i = 196000$ Дж/м <sup>3</sup>	

Рисунок 9.1 – Протокол выполнения примера 1 "Энтальпия газа"

## 9.2.2 Пример 2 – Температура смеси газов

### Исходные данные:

Технологический газ перед очисткой охлаждается воздухом. Температура газа  $t_g = 1000$  °С, расход газа  $V_g = 0,01$  м<sup>3</sup>/с. Температура атмосферного воздуха  $t_v = 20$  °С, расход воздуха  $V_v = 0,02$  м<sup>3</sup>/с. Удельные теплоемкости газа ( $c_g$ ), воздуха ( $c_v$ ) и смеси ( $c_{см}$ ) принять равными между собой.

### Задание:

Определить температуру смеси газа с воздухом после охлаждения газа перед его очисткой.

### Решение:

Из уравнения теплового баланса (9.3)

$$(V_g + V_v) \cdot c_{см} \cdot t_{см} = V_g \cdot c_g \cdot t_g + V_v \cdot c_v \cdot t_v,$$

при условии  $c_g = c_v = c_{см}$ , определяется температура смеси газа с воздухом в виде (9.5):

$$t_{см} = \frac{V_g \cdot t_g + V_v \cdot t_v}{V_g + V_v} = \frac{0,01 \cdot 1000 + 0,02 \cdot 20}{0,01 + 0,02} = 347 \text{ °С.}$$

### Ответ:

Температура смеси газа с воздухом после охлаждения газа перед его очисткой составляет 347 °С.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 9.2

<b>Дано:</b>	
$t_g := 1000.$	- температура газа, С
$V_g := 0.01$	- расход газа, м <sup>3</sup> /с
$t_v := 20.$	- температура воздуха, С
$V_v := 0.02$	- расход воздуха, м <sup>3</sup> /с
<b>Решение:</b>	
Из теплового баланса $(V_g + V_v) \cdot c \cdot t_{см} = V_g \cdot c \cdot t_g + V_v \cdot c \cdot t_v$ выражается	
$t_{см} := \frac{V_g \cdot t_g + V_v \cdot t_v}{V_g + V_v} = 347$	- температура смеси, С
<b>Ответ:</b>	
Температура смеси газов составляет $t_{см} = 347$ град. С	

Рисунок 9.2 – Протокол выполнения примера 2 "Температура смеси газов"

### **9.3 Задания для самостоятельной работы**

#### **Задача 9.1**

Определить удельную энтальпию газа, если его удельная теплоемкость  $1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ , а температура  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **Задача 9.2**

Определить температуру смеси после охлаждения газа (температура  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , расход  $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ ) атмосферным воздухом (температура  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , расход  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Удельные теплоемкости газа, воздуха и смеси принять равными между собой.

#### **Задача 9.3**

Определить расход воздуха с температурой  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  для охлаждения газа (температура  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , расход  $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ ), если требуемая температура смеси составляет  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Удельные теплоемкости газа, воздуха и смеси принять равными между собой.

#### **Задача 9.4**

Определить количество физической теплоты смеси газа и воздуха, если перед смешением поток газ имел теплоту  $20 \text{ кВт}$ , а поток воздуха –  $0,5 \text{ кВт}$ .

### **9.4 Контрольные вопросы по практической работе**

- 1) Какую размерность имеет энтальпия газа?
- 2) Какую размерность имеет удельная энтальпия газа?
- 3) Какую размерность имеет удельная теплоемкость газа?
- 4) Как можно назвать уравнение, показывающее общую энтальпию смеси в виде суммы энтальпий горячего газа и атмосферного воздуха?
- 5) Каким способом обычно подмешивают холодный воздух при охлаждении горячего дыма перед очисткой?
- 6) Как называется устройство, с помощью которого можно регулировать количество холодного воздуха, всасываемого в газопровод для охлаждения газа?
- 7) Какие недостатки имеет способ охлаждения горячего газа холодным воздухом?

## 10 Охлаждение газа в поверхностных холодильниках. Тепловые расчеты<sup>10</sup>

### 10.1 Основы расчетов охлаждения газа в поверхностных холодильниках

В поверхностных холодильниках (теплообменниках) газ отдает теплоту через стенку холодильника среде с более низкой температурой – воздуху или воде. В результате температура газа снижается. В металлургии для охлаждения газа перед газоочисткой используют воздушные поверхностные холодильники, водяные холодильники колонного типа и котлы-утилизаторы. Часто теплообменники, реализующие способ передачи теплоты через разделительную стенку называют рекуперативными.

Количество теплоты, которое газ должен отдать для своего охлаждения до заданной температуры, определяют по формуле

$$Q = V \cdot (i_1 - i_2) = V \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \text{Вт}, \quad (10.1)$$

где  $V$  – расход газа, подлежащего охлаждению,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $i_1, i_2$  – удельная энтальпия соответственно начального и конечного состояний газа,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная объемная теплоемкость газа,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $t_1, t_2$  – температура соответственно начального и конечного состояний газа,  $^\circ\text{С}$ .

Это количество теплоты передается через стенку поверхностного холодильника охлаждающей среде, вследствие чего она нагревается. Из условий теплового баланса без учета потерь теплоты в окружающую среду площадь поверхности холодильника, находят по выражению

$$S = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}, \text{м}^2, \quad (10.2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\Delta t$  – средняя разность температур газа и охлаждающей среды (средний температурный напор),  $^\circ\text{С}$ .

Значение коэффициента теплопередачи зависит от формы поверхности холодильника, скорости газа и охлаждаемой среды, взаимного направления их движения (прямотока или противотока) и других факторов. Например, в газовых холодильниках с естественной циркуляцией охлаждающего воздуха  $k = 4-12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при средней скорости газа  $6-9 \text{ м}/\text{с}$  и температуре  $300-400 \text{ }^\circ\text{С}$ . При принудительно организованной подаче воздуха  $k = 14-20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Меньшие значения коэффициента теплопередачи принимают в том случае, когда охлаждают запыленный газ и на поверхности охлаждения возможно оседание пыли, которая затрудняет теплопередачу.

Среднюю разность температур определяют как среднелогарифмическую между температурными напорами в начале и в конце холодильника:

---

<sup>10</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [6]

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10.3)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_{\text{м}}$  – соответственно большая и меньшая разность температур газа и охлаждающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

## 10.2 Примеры расчетов

### 10.2.1 Пример 1 – Охлаждение газа в поверхностном холодильнике

Исходные данные:

Внутри поверхностного холодильника проходит газ. Газ охлаждается с температуры  $t_{\text{нач}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$  до температуры  $t_{\text{кон}} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Расход газа  $V = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ , а его удельная теплоемкость  $c = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .

Задание:

Определить количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике.

Решение:

а) Количество теплоты определяется по формуле (10.1)

$$Q = V \cdot c \cdot (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 0,01 \cdot 1,4 \cdot 10^3 \cdot (1000 - 200) = 11200 \text{ Вт}.$$

Ответ:

Количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике составляет 11200 Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 10.1.

<b>Дано:</b>	
$t_{\text{нач}} := 1000.$	- температура газа в начале холодильника, С
$t_{\text{кон}} := 200.$	- температура газа в конце холодильника, С
$V_{\text{г}} := 0.01$	- расход газа, м3/с
$c := 1.4 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость газа, Дж/(м3*К)
<b>Решение:</b>	
$\Delta Q := V_{\text{г}} \cdot c \cdot (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 11.2 \times 10^3$ - количество теплоты, Вт	
<b>Ответ:</b>	
Количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике составляет	
$\Delta Q = 11200 \text{ Вт}$	

Рисунок 10.1 – Протокол выполнения примера 1 "Охлаждение газа в поверхностном холодильнике"

### 10.2.2 Пример 2 – Площадь поверхности холодильника

Исходные данные:

Внутри поверхностного холодильника проходит газ. Необходимо передавать количество теплоты  $\Delta Q = 20$  кВт от газа к охлаждающей среде. Коэффициент теплопередачи через стенку холодильника  $k = 2,5$  Вт /( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ), а средняя разность температур газа и охлаждающей среды  $\Delta t = 350$  °С.

Задание:

Определить необходимую площадь поверхности холодильника.

Решение:

а) Количество теплоты определяется по формуле (10.2)

$$S = \frac{\Delta Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{20 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 350} = 22,9 \text{ м}^2.$$

Ответ:

Необходимая площадь поверхности холодильника для охлаждения газа составляет  $22,9 \text{ м}^2$ .

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 10.2.

<b>Дано:</b>	
$\Delta Q := 20 \cdot 10^3$	- количество теплоты, Вт
$k := 2.5$	- коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> *К)
$\Delta t_{sr} := 350.$	- средняя разность температур между газом и воздухом, С
<b>Решение:</b>	
Из формулы для теплового потока $\Delta Q = k \cdot \Delta t_{sr} \cdot S$ выражается	
$S := \frac{\Delta Q}{k \cdot \Delta t_{sr}} = 22.9$	- площадь поверхности, м <sup>2</sup>
<b>Ответ:</b>	
Площадь поверхности холодильника для охлаждения газа составляет $S = 23 \text{ м}^2$	

Рисунок 10.2 – Протокол выполнения примера 2 "Площадь поверхности холодильника"

### 10.2.3 Пример 3 – Средняя разность температур газа и охлаждающей среды в поверхностном холодильнике

Исходные данные:

Внутри поверхностного холодильника проходит газ. В начале холодильника разность температур газа и охлаждающей среды  $\Delta t_{\text{г}} = 980$  °С, а в конце –  $\Delta t_{\text{м}} = 180$  °С.

Задание:

Определить среднюю разность температур газа и охлаждающей среды по площади холодильника.

Решение:

а) Средняя разность температур газа и охлаждающей среды по площади холодильника определяется по формуле (10.3) как среднелогарифмическое значение

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{980 - 180}{\ln\left(\frac{980}{180}\right)} = 472 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Ответ:

Средняя разность температур газа и охлаждающей среды по площади холодильника составляет 472 °С.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 10.3.

<b>Дано:</b>	
$\Delta t_{\text{нач}} := 980.$	- начальная разность температур между газом и воздухом, С
$\Delta t_{\text{кон}} := 180.$	- конечная разность температур между газом и воздухом, С
<b>Решение:</b>	
$\Delta t_{\text{sr}} := \frac{\Delta t_{\text{нач}} - \Delta t_{\text{кон}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{нач}}}{\Delta t_{\text{кон}}}\right)} = 472$	- средняя разность температур между газом и воздухом, С
<b>Ответ:</b>	
Средняя разность температур между газом и воздухом составляет $\Delta t_{\text{sr}} = 472$ град.С	

Рисунок 10.3 – Протокол выполнения примера 3 "Средняя разность температур газа и охлаждающей среды в поверхностном холодильнике"

### 10.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 10.1

Определить количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике, если расход газа 0,02 м<sup>3</sup>/с, его удельная теплоемкость 1,3 кДж/(м<sup>3</sup>·К), а температура газа в начале и в конце холодильника 1200 °С и 100 °С, соответственно.

#### Задача 10.2

Определить температуру газа на выходе из поверхностного холодильника, если расход газа 0,02 м<sup>3</sup>/с, его удельная теплоемкость 1,3 кДж/(м<sup>3</sup>·К), а температура газа в начале холодильника 1200 °С. В процессе теплообмена газ отдал 20 кВт теплоты.

#### Задача 10.3

Определить температуру газа на входе в поверхностный холодильник, если расход газа 0,02 м<sup>3</sup>/с, его удельная теплоемкость 1,3 кДж/(м<sup>3</sup>·К), а температура газа в конце холодильника 100 °С. В процессе теплообмена газ отдал 20 кВт теплоты.

#### Задача 10.4

Определить количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике, если расход газа  $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ , а изменение удельной энтальпии  $200 \text{ кДж}/\text{м}^3$ .

#### Задача 10.5

Определить площадь поверхности холодильника, через которую необходимо передавать количество теплоты  $35 \text{ кВт}$  от газа к охлаждающей среде, если коэффициент теплопередачи через стенку холодильника  $3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а средняя разность температур газа и охлаждающей среды  $350 \text{ }^\circ\text{С}$ .

#### Задача 10.6

Определить количество теплоты, которое возможно передавать через площадь поверхности холодильника  $35 \text{ м}^2$ , если коэффициент теплопередачи через стенку холодильника  $3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а средняя разность температур газа и охлаждающей среды  $350 \text{ }^\circ\text{С}$ .

#### Задача 10.7

Определить среднюю разность температур газа и охлаждающей среды в холодильнике, если в начале холодильника разность температур  $1000 \text{ }^\circ\text{С}$ , а в конце –  $500 \text{ }^\circ\text{С}$ .

### **10.4 Контрольные вопросы по практической работе**

- 1) Каким способом осуществляется передача теплоты от горячего газа в поверхностных холодильниках?
- 2) Как определить количество теплоты, которое газ известного расхода должен отдать для своего охлаждения от начальной до заданной температуры?
- 3) Какую размерность имеет коэффициент теплопередачи?
- 4) От каких факторов зависит, главным образом, значение коэффициента теплопередачи?
- 5) Что называют температурным напором в поверхностных холодильниках (рекуперативных теплообменниках)?
- 6) Как рассчитывается среднелогарифмическая разность температур в поверхностных холодильниках?
- 7) Какую размерность имеет количество теплоты, определяемое произведением расхода газа на изменение удельной энтальпии газа?

# 11 Охлаждение газа при непосредственном контакте его с водой. Тепловые расчеты<sup>11</sup>

## 11.1 Основы расчетов охлаждения газа при непосредственном контакте с водой

При применении воды в качестве охлаждающей среды можно добиться охлаждения газа до более низких температур, чем при охлаждении воздухом. Это объясняется тем, что вода по сравнению с воздухом обладает большей теплоемкостью, более высоким коэффициентом теплоотдачи.

Температура охлаждения газа зависит от начальной температуры воды. При расчетах температуру воды принимают при наиболее неблагоприятных (летних) условиях: речной, озерной и прудовой воды  $\sim 25$  °С, артезианской  $\sim 15$  °С и оборотной 30-35 °С.

В дальнейших расчетах расход воды будет иметь размерность "кг/с", а расход газа –  $\text{м}^3/\text{с}$ . Соответственно при расчетах расхода воды будут использоваться массовые удельные теплоемкости, имеющие размерность "Дж/(кг·К)", а при расчетах расхода газа объемные удельные теплоемкости – Дж/( $\text{м}^3 \cdot \text{К}$ ).

Расход воды на охлаждение газа (V) определяют из уравнения теплового баланса для воды:

$$Q = V \cdot (1 - \psi) \cdot (i_{\text{в.к}} - i_{\text{в.н}}) + V \cdot \psi \cdot [(i_{\text{в.100}} - i_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + (i_{\text{пар}} - i_{\text{пар.100}})] = \\ = V \cdot (1 - \psi) \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в.к}} - t_{\text{в.н}}) + V \cdot \psi \cdot [c_{\text{в}} \cdot (100 - t_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{пар}} \cdot (t_{\text{г.к}} - 100)],$$

откуда

$$V = \frac{Q}{(1 - \psi) \cdot (i_{\text{в.к}} - i_{\text{в.н}}) + \psi \cdot [(i_{\text{в.100}} - i_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + (i_{\text{пар}} - i_{\text{пар.100}})]} = \\ = \frac{Q}{(1 - \psi) \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в.к}} - t_{\text{в.н}}) + \psi \cdot [c_{\text{в}} \cdot (100 - t_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{пар}} \cdot (t_{\text{г.к}} - 100)]}, \text{кг/с},$$

где Q – количество теплоты отдаваемое газом воде, Вт;  $i_{\text{в.к}}$  и  $i_{\text{в.н}}$  – энтальпия, соответственно, начального и конечного состояний воды, Дж/кг;  $i_{\text{пар}}$  и  $i_{\text{пар.100}}$  – энтальпия водяного пара, соответственно, при температуре  $t_{\text{г.к}}$  (температуре газа после контакта с водой) и при температуре 100 °С (температура испарения воды), Дж/кг;  $c_{\text{в}}$  и  $c_{\text{пар}}$  – удельная массовая теплоемкость, соответственно, воды и водяного пара, Дж/(кг·К);  $t_{\text{в.к}}$  и  $t_{\text{в.н}}$  – соответственно начальная и конечная температура воды, °С;  $\psi$  – коэффициент испарения воды (доля воды, перешедшая в пар);  $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2258$  кДж/кг – теплота испарения 1 кг воды.

<sup>11</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [6]

Количество теплоты  $Q$ , которое необходимо отнять от газа в процессе его охлаждения, определяют по формуле

$$Q = V_{\Gamma} \cdot (i_{\Gamma,н} - i_{\Gamma,к}) = V_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot (t_{\Gamma,н} - t_{\Gamma,к}), \text{Вт}, \quad (11.3)$$

где  $V_{\Gamma}$  – количество влажного газа, подлежащего охлаждению,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $i_{\Gamma,н}$ ,  $i_{\Gamma,к}$  – удельная энтальпия соответственно начального и конечного состояний газа,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $c_{\Gamma}$  – удельная объемная теплоемкость газа,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $t_{\Gamma,н}$ ,  $t_{\Gamma,к}$  – температура соответственно начального и конечного состояний газа,  $^{\circ}\text{C}$ .

## 11.2 Примеры расчетов

### 11.2.1 Пример 1 – Теплота, поглощаемая водой при отсутствии испарения

#### Исходные данные:

Установка охлаждения газа при прямом контакте с водой. Температура воды увеличилась с  $t_{в,н} = 20^{\circ}\text{C}$  до  $t_{в,к} = 50^{\circ}\text{C}$ , расход воды составил  $V = 10$   $\text{кг}/\text{с}$ , испарение отсутствует. Удельная теплоемкость воды  $c_{в} = 4,18$   $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

#### Задание:

Определить количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом.

#### Решение:

а) Количество теплоты определяется по формуле (11.1) при условии, что доля испаренной влаги равна нулю ( $\psi = 0$ )

$$Q = V \cdot (1 - \psi) \cdot c_{в} \cdot (t_{в,к} - t_{в,н}) = 10 \cdot (1 - 0) \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot (50 - 20) \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

#### Ответ:

Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет  $1,3 \cdot 10^6$  Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 11.1.

<b>Дано:</b>	
$t_{\text{нач}} := 20.$	- начальная температура воды, С
$t_{\text{кон}} := 50.$	- конечная температура воды, С
$V_{\text{вода}} := 10.$	- расход воды, кг/с
$c_{\text{вода}} := 4.18 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость воды, Дж/(кг*К)
<b>Решение:</b>	
$\Delta Q := V_{\text{вода}} \cdot c_{\text{вода}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) = 1.3 \times 10^6$ - количество теплоты, Вт	
<b>Ответ:</b>	
Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет	
$\Delta Q = 1.3 \times 10^6$ Вт	

Рисунок 11.1 – Протокол выполнения примера 1 "Теплота, поглощаемая водой при отсутствии испарения"

### 11.2.2 Пример 2 – Теплота, поглощаемая водой при полном испарении

воды

Исходные данные:

Установка охлаждения газа при прямом контакте с водой. При расходе воды  $V = 10$  кг/с вся вода испарилась ( $\psi = 1$ ). Начальная температура воды  $t_{в.н} = 20$  °С, удельная теплоемкость воды  $c_v = 4,18$  кДж/(кг·К), удельная теплоемкость водяного пара  $c_{пар} = 1,9$  кДж/(кг·К). Температура газа на выходе из контакта с водой (температура выхода водяного пара)  $t_{г.к} = 200$  °С. Теплота испарения 1 кг воды составляет  $Q_{H_2O} = 2258$  кДж/кг.

Задание:

Определить количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом.

Решение:

а) Количество теплоты определяется по формуле (11.1)

$$Q = V \cdot \psi \cdot [c_v \cdot (100 - t_{в.н}) + Q_{H_2O} + c_{пар} \cdot (t_{г.к} - 100)] = \\ = 10 \cdot 1 \cdot [4,18 \cdot 10^3 \cdot (100 - 20) + 2258 \cdot 10^3 + 1,9 \cdot 10^3 \cdot (200 - 100)] = 27,8 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет  $27,8 \cdot 10^6$  Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 11.2.

<b>Дано:</b>	
$t_{в.н} := 20.$	- начальная температура воды, С
$t_{г.к} := 200.$	- конечная температура газа, С
$V := 10.$	- расход воды, кг/с
$c_v := 4.18 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость воды, Дж/(кг*К)
$c_{пар} := 1.9 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг*К)
$r_{исп} := 2258 \cdot 10^3$	- теплота испарения воды, Дж/кг
<b>Решение:</b>	
$\Delta Q := V \cdot [c_v \cdot (100 - t_{в.н}) + r_{исп} + c_{пар} \cdot (t_{г.к} - 100)] = 27.8 \times 10^6$ - количество теплоты, Вт	
<b>Ответ:</b>	
Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет	
$\Delta Q = 27.8 \times 10^6$ Вт	

Рисунок 11.2 – Протокол выполнения примера 2 "Теплота, поглощаемая водой при полном испарении воды"

### 11.2.3 Пример 3 – Теплота, поглощаемая водой при частичном испарении

воды

Исходные данные:

Установка охлаждения газа при прямом контакте с водой. При расходе воды  $V = 10$  кг/с испарилось 40 % воды (т.е.  $\psi = 0,4$ ). Начальная температура воды  $t_{в.н} = 20$  °С, а конечная  $t_{в.к} = 50$  °С, удельная теплоемкость воды

$c_v = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , удельная теплоемкость водяного пара  $c_{\text{пар}} = 1,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Температура газа на выходе из контакта с водой (температура выхода водяного пара)  $t_{г.к} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплота испарения 1 кг воды составляет  $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2258 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Задание:

Определить количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом.

Решение:

а) Количество теплоты определяется по формуле (11.1)

$$Q = V \cdot (1 - \psi) \cdot c_v \cdot (t_{в.к} - t_{в.н}) + V \cdot \psi \cdot [c_v \cdot (100 - t_{в.н}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{пар}} \cdot (t_{г.к} - 100)] =$$

$$= 10 \cdot (1 - 0,4) \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot (50 - 20) +$$

$$+ 10 \cdot 0,4 \cdot [4,18 \cdot 10^3 \cdot (100 - 20) + 2258 \cdot 10^3 + 1,9 \cdot 10^3 \cdot (200 - 100)] = 11,9 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет  $11,9 \cdot 10^6 \text{ Вт}$ .

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 11.3.

<b>Дано:</b>	
$t_{в.н} := 20.$	- начальная температура воды, С
$t_{в.к} := 50.$	- начальная температура воды, С
$t_{г.к} := 200.$	- конечная температура газа, С
$V := 10.$	- расход воды, кг/с
$c_v := 4.18 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость воды, Дж/(кг*К)
$c_{\text{пар}} := 1.9 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг*К)
$r_{\text{исп}} := 2258 \cdot 10^3$	- теплота испарения воды, Дж/кг
$\psi := 0.4$	- коэффициент испарения воды
<b>Решение:</b>	
$Q_{\text{вода}} := V \cdot [c_v \cdot (t_{в.к} - t_{в.н})]$	$= 1,3 \times 10^6$
$Q_{\text{пар}} := V \cdot [c_v \cdot (100 - t_{в.н}) + r_{\text{исп}} + c_{\text{пар}} \cdot (t_{г.к} - 100)]$	$= 27,8 \times 10^6$
$\Delta Q := (1 - \psi) \cdot Q_{\text{вода}} + \psi \cdot Q_{\text{пар}}$	$= 11,9 \times 10^6$
<b>Ответ:</b>	
Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет	
$\Delta Q = 11,9 \times 10^6 \text{ Вт}$	

Рисунок 11.3 – Протокол выполнения примера 3 "Теплота, поглощаемая водой при частичном испарении воды"

### 11.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 11.1

Определить количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом, если температура воды увеличилась с  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , расход воды составил  $10 \text{ кг}/\text{с}$ , испарение отсутствует. Удельная теплоемкость воды  $4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

### Задача 11.2

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если при расходе воды 10 кг/с вся вода испарилась. Начальная температура воды 20 °С, а удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/(кг·К), удельная теплоемкость водяного пара  $c_{\text{пар}} = 1,9$  кДж/(кг·К). Температура газа на выходе из контакта с водой (температура выхода водяного пара) 200 °С. Теплота испарения 1 кг воды составляет 2258 кДж/кг.

### Задача 11.3

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если при расходе воды 10 кг/с вода не испарялась. Начальная температура воды 0 °С, а конечная 100 °С. Удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/(кг·К).

### Задача 11.4

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если при расходе воды 10 кг/с испарилось 50% воды. Начальная температура воды 20 °С, а конечная – 50 °С. Удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/(кг·К), удельная теплоемкость водяного пара  $c_{\text{пар}} = 1,9$  кДж/(кг·К). Температура газа на выходе из контакта с водой (температура выхода водяного пара) 200 °С. Теплота испарения 1 кг воды составляет 2258 кДж/кг.

### Задача 11.5

Определить расход воды при прямом контакте с газом для съёма у охлаждаемого газа теплоты 2 МВт, если температура воды увеличилась с 20 °С до 50 °С, а испарение отсутствует. Удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/(кг·К).

### Задача 11.6

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если температура газа упала с 1000°С до 350 °С, расход газа составил 10 м<sup>3</sup>/с. Удельная теплоемкость газа 1,38 кДж/(м<sup>3</sup>·К).

## 11.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) По каким причинам охлаждение газа водой более эффективно по сравнению с охлаждением воздухом?
- 2) Какую температуру можно принять в качестве начальной температуры воды перед подачей на охлаждающую установку при наличии на предприятии оборотного цикла водоснабжения?
- 3) В каких единицах обычно измеряют расход воды и в каких – расход газа?
- 4) При какой температуре происходит испарение воды?
- 5) Чему равна теплота испарения 1 кг воды?
- 6) Какую размерность имеет удельная массовая теплоемкость?
- 7) Какую размерность имеет удельная объемная теплоемкость?

## 12 Движение частицы пыли в неподвижной среде. Гидравлические расчеты<sup>12</sup>

### 12.1 Основы расчетов движения частичек пыли в неподвижной среде

С момента начала движения частицы в вязкой среде возникает сила сопротивления этому движению  $P$ , которая согласно закону Ньютона равна

$$P = C \cdot F \cdot \frac{\rho_r \cdot w^2}{2} = C \cdot F \cdot P_{\text{дин}}, [\text{Н}] \quad (12.1)$$

где  $C$  – аэродинамический коэффициент;  $F$  – площадь проекций частицы на плоскость, нормальную к направлению движения,  $\text{м}^2$ ;  $w$  – скорость движения частицы относительно среды,  $\text{м/с}$ ;  $\rho_r$  – плотность вещества окружающей среды,  $\text{кг/м}^3$ .

Этот закон применим и в том случае, если частица неподвижна, а поток газа обтекает ее со скоростью  $w$ .

При движении частицы в неподвижной среде или обтекании неподвижной частицы потока газа возможны ламинарный и турбулентный режимы движения. В этом случае основной характеристикой режима движения является число Рейнольдса, определяемое, однако, не по диаметру газопровода, а по размеру движущейся частицы  $d$  и относительной скорости  $w$ :

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_r}{\mu},$$

где  $d$  – диаметр частицы,  $\text{м}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Численное значение  $Re$  позволяет установить не только режим движения, но и численное значение аэродинамического коэффициента "С" (по эмпирическим зависимостям, проверенным практикой). Так, для областей с ламинарным, турбулентным режимом и промежуточной области характерные значения  $Re$  и  $C$  приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Аэродинамический коэффициент "С" в зависимости от  $Re$

№	Режим течения	$Re$	$C$
1	ламинарный	$\leq 2$	$24/Re$
2	промежуточный	2-500	$18,5/Re^{0,6}$
3	турбулентный	$> 500$	0,44

При ламинарном режиме для частиц сферической формы после подстановки в уравнение (12.1)  $F = \pi \cdot d^2 / 4$  и развернутого значения величины аэродинамического коэффициента получим

<sup>12</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [7]

$$P = \frac{24 \cdot \mu}{w \cdot d \cdot \rho_r} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_r \cdot w^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w. \quad (12.2)$$

Этой формулой выражается закон Стокса, справедливый для ламинарного режима движения частицы сферической формы в однородной, не ограниченной стенками вязкой среде.

В наиболее простом случае, когда частица движется вниз, под действием силы тяжести с возрастающей скоростью, вследствие возрастания силы сопротивления быстро наступает момент, когда обе эти силы приходят в равновесие. С этого момента частица начинает двигаться вниз с постоянной скоростью (скоростью витания)  $w_B$ , которую легко определить из уравнения равновесия:

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_r) \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_B,$$

откуда

$$w_B = \frac{d^2 \cdot (\rho_q - \rho_r) \cdot g}{18 \cdot \mu},$$

где  $\rho_q$  и  $\rho_r$  – плотность соответственно частицы пыли и окружающей среды (газа);  $w_B$  – скорость витания (скорость седиментации).

Поскольку  $\rho_q \gg \rho_r$ , то плотностью газа можно пренебречь и тогда последнее уравнение можно переписать в виде

$$w_B = \frac{d^2 \cdot \rho_q \cdot g}{18 \cdot \mu}. \quad (12.3)$$

Очевидно, что  $w_B$  можно рассматривать и как скорость направленного вверх вертикального потока газа, при которой данная частица будет удерживаться в занимаемом ею положении. Из сказанного следует, что масса частицы  $M$  в пределах применимости закона Стокса может быть выражена через скорость витания следующим образом:

$$M = \frac{P}{g} = \frac{3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_B}{g}. \quad (12.4)$$

Если известна скорость витания частиц, то из уравнение (12.3) можно найти диаметр частиц

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot w_B}{\rho_q \cdot g}}. \quad (3.5)$$

Данное выражение показывает, что при постоянной плотности  $\rho_r$  и вязкости среды  $\mu$  каждой скорости витания соответствует свой размер частиц той или иной плотности.

## 12.2 Примеры расчетов

### 12.2.1 Пример 1 – Аэродинамический коэффициент

#### Исходные данные:

Имеется устройство с неподвижной газовой средой, в котором частички пыли постепенно падают вниз. Сила сопротивления этому движению  $P$ , которая определяется по формуле (12.1). В той формуле  $C$  – аэродинамический коэффициент, который зависит от числа Рейнольдса в соответствии с табл. 12.1.

#### Задание:

В среде MathCAD определить функцию  $C = f(Re)$  и построить ее график при изменении числа  $Re$  от 1,5 до 600. Найти значения  $C$  в фиксированных точках при  $Re = \{5; 50; 500\}$ .

#### Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 12.1.

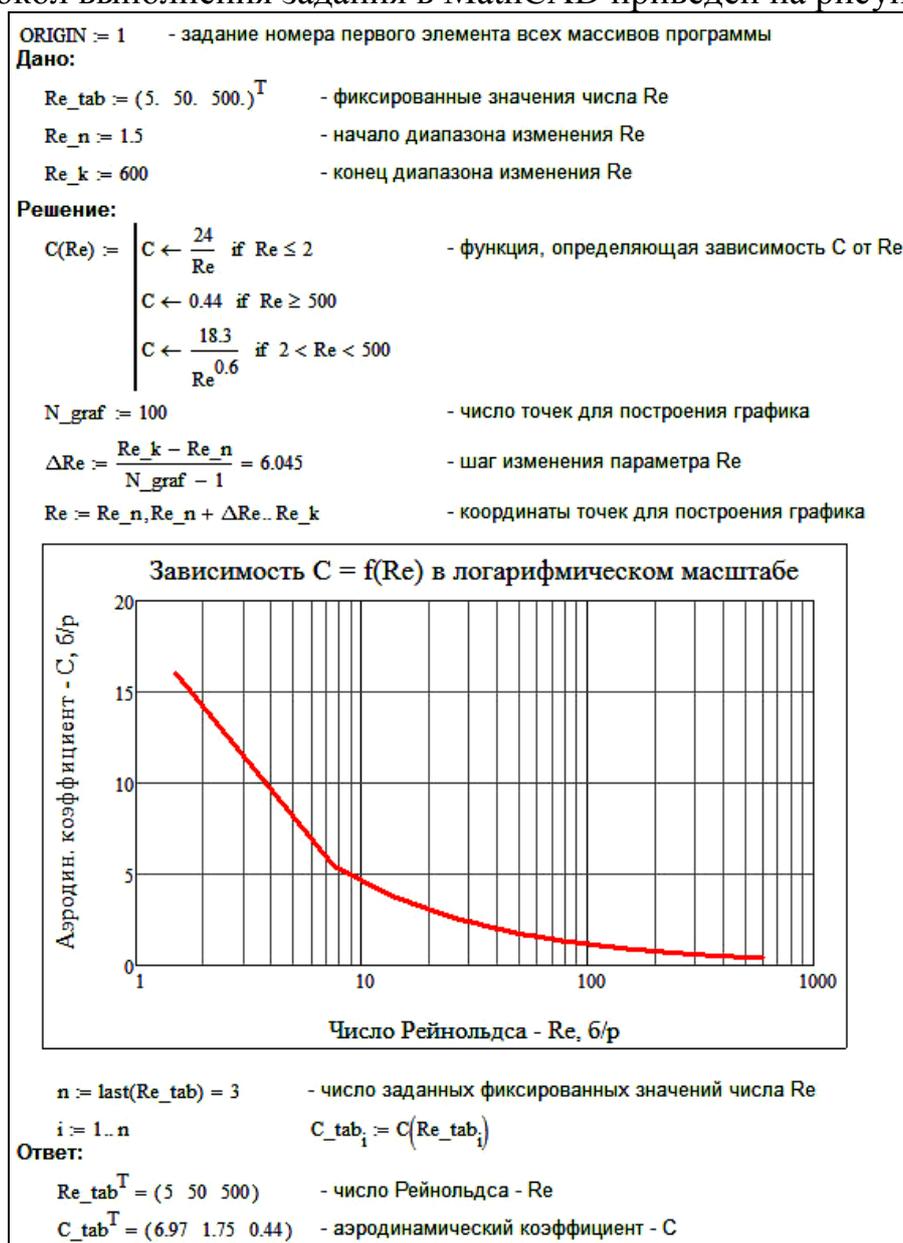


Рисунок 12.1 – Протокол выполнения примера 1 "Аэродинамический коэффициент"

Ответ:

Значения  $C$  в фиксированных точках при  $Re = \{5; 50; 500\}$  составляют:  
 $C = \{6,97; 1,75; 0,44\}$ .

### 12.2.2 Пример 2 – Скорость витания

Исходные данные:

Имеется устройство с неподвижной воздушной средой, в котором частички пыли постепенно падают вниз со скоростью витания " $W$ ". Кинематическая вязкость воздуха  $\nu = 13,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , плотность воздуха  $\rho_v = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Задание:

В среде MathCAD определить функцию зависимости скорости витания от диаметра частиц " $d$ " и плотности частиц " $\rho$ " в виде  $W = f(d, \rho)$  и построить её график при изменении диаметра " $d$ " от 0 до 100 мкм при фиксированных значениях плотности пыли " $\rho = \{500; 1000; 2000\} \text{ кг}/\text{м}^3$ ". Найти значения  $W$  в фиксированных точках при  $d = \{2; 20; 100\}$  мкм для частиц пыли плотностью  $500 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 12.2.

Ответ:

Скорость витания частиц пыли плотностью  $\rho = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$  и диаметром  $d = \{2; 20; 100\}$  мкм равна, соответственно:  $W = \{0,0001; 0,0064; 0,1593\} \text{ м}/\text{с}$ .

### 12.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 12.1

Определить динамическое давление запыленного газа плотностью  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$  на частички пыли, если скорость движения частицы относительно газа равна  $1,5 \text{ м}/\text{с}$ .

#### Задача 12.2

Определить силу сопротивления движению пыли в неподвижном газе, если динамическое давление газа  $7 \text{ Па}$ , площадь проекции частицы на плоскость, нормальную к направлению движения  $0,000001 \text{ м}^2$ , аэродинамический коэффициент  $0,3$ .

#### Задача 12.3

Определить число Рейнольдса при движении частицы в неподвижной среде, если диаметр частицы  $1 \text{ мм}$ , коэффициент кинематической вязкости газа  $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , относительная скорость частицы  $2,5 \text{ м}/\text{с}$ .

#### Задача 12.4

Определить режим течения (ламинарный, промежуточный или турбулентный) при движении частицы в неподвижной среде, если диаметр частицы  $2 \text{ мм}$ , коэффициент кинематической вязкости газа  $12,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , относительная скорость частицы  $0,6 \text{ м}/\text{с}$ .

ORIGIN := 1 - задание номера первого элемента всех массивов программы

**Дано:**

$d\_tab := (2 \ 20 \ 100.)^T \cdot 10^{-6}$  - фиксированные значения диаметра d, м

$\rho := (500 \ 1000 \ 2000)^T$  - фиксированные значения плотности  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

$d\_n := 0 \cdot 10^{-6}$  - начало диапазона изменения d, м

$d\_k := 100 \cdot 10^{-6}$  - конец диапазона изменения d, м

$\nu := 13.23 \cdot 10^{-6}$  - кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с

$g := 9.81$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

$\rho\_v := 1.293$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

**Решение:**

$\mu := \nu \cdot \rho\_v = 1.711 \times 10^{-5}$  - динамическая вязкость, Па\*с

$W(d, \rho) := \frac{d^2 \cdot \rho \cdot g}{18 \cdot \mu}$  - функция, определяющая зависимость скорости витания от диаметра d и плотности  $\rho$

$N\_graf := 100$  - число точек для построения графика

$\Delta d := \frac{d\_k - d\_n}{N\_graf - 1} = 1.01 \times 10^{-6}$  - шаг изменения параметра d

$d := d\_n, d\_n + \Delta d, \dots, d\_k$  - координаты точек для построения графика

$W\_tab := W(d\_tab, \rho_1)^T = (0.0001 \ 0.0064 \ 0.1593)$

**Ответ:**

$d\_tab^T \cdot 10^{-6} = (2 \ 20 \ 100)$  - диаметр частиц - d, мкм

$W\_tab = (0.0001 \ 0.0064 \ 0.1593)$  - скорость витания - W, м/с при плотности  $\rho_1 = 500$  кг/м<sup>3</sup>

Рисунок 12.2 – Протокол выполнения примера 2 "Скорость витания"

**Задача 12.5**

Определить скорость витания частиц пыли плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup> и диаметром 2 мкм в неподвижной воздушной среде, если кинематическая вязкость воздуха  $13,23 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, плотность воздуха 1,293 кг/м<sup>3</sup>.

**Задача 12.6**

Определить скорость витания частиц пыли плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup> и диаметром 1,5 мкм в неподвижной воздушной среде, если динамическая вязкость воздуха  $17 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

### Задача 12.7

Определить диаметр частиц пыли плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$ , имеющих скорость витания  $0,5 \text{ м/с}$  в неподвижной воздушной среде, если динамическая вязкость воздуха  $17 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

### Задача 12.8 (повышенной трудности)

В среде MathCAD определить функцию зависимости диаметра частиц пыли от скорости витания в неподвижной воздушной среде и построить график функции при изменении скорости витания от  $0,001$  до  $3 \text{ м/с}$ . Найти значения диаметра в фиксированных точках при скоростях витания  $0,001 \text{ м/с}$ ;  $0,01 \text{ м/с}$ ;  $0,1 \text{ м/с}$ . Плотность частиц пыли  $850 \text{ кг/м}^3$ . Динамическая вязкость воздуха  $17 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

## 12.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Куда направлено движение частиц пыли в неподвижной газовой среде?
- 2) От каких параметров зависит аэродинамический коэффициент в формуле по определению силы сопротивления движению частиц в неподвижной газовой среде?
- 3) Какую размерность имеет число Рейнольдса?
- 4) Как связаны между собой коэффициенты кинематической и динамической вязкости?
- 5) Для какого режима течения строго справедлив закон Стокса?
- 6) Зависит ли скорость витания частиц пыли в неподвижной газовой среде от плотности этой среды?
- 7) Какой параметр сильнее всего влияет на скорость витания частиц пыли в неподвижной газовой среде: плотность среды, плотность частицы, вязкость среды или диаметр частицы?
- 8) Можно ли по измеренной скорости витания определить диаметр частицы пыли в неподвижной газовой среде?
- 9) Можно ли по измеренной скорости витания определить массу частицы пыли в неподвижной газовой среде?
- 10) Какую размерность имеет коэффициент кинематической вязкости?

## 13 Осаждение частиц пыли в камерах и газоходах. Гидравлические расчеты<sup>13</sup>

### 13.1 Основы расчетов осаждения частиц пыли в камерах и газоходах

В осадительных камерах выпадение частиц пыли из газового потока происходит под действием сил гравитации. Эффективность осаждения в значительной мере определяется временем пребывания частиц в камере, что вызывает необходимость увеличения размеров камеры. В наиболее неблагоприятных условиях находятся частицы под потолком камеры; им для осаждения нужно пройти наибольший путь, равный высоте камеры  $H$  (рис. 13.1).

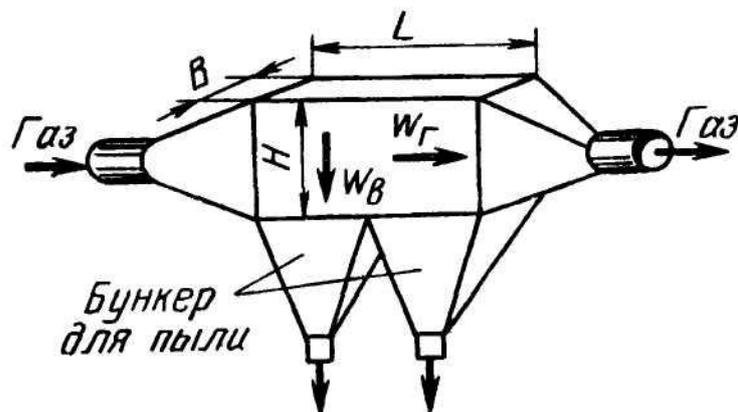


Рисунок 13.1 – Схема пылеосадительной камеры

При приближенном расчете осадительных камер принимают, что частицы движутся вдоль камеры со скоростью  $w_{\text{П}}$ , равной скорости газового потока  $w_{\Gamma}$ , и одновременно опускаются вниз со скоростью, равной скорости витания  $w_{\text{В}}$ . Для осаждения частица должна достичь дна раньше, чем газовый поток вынесет ее из камеры, поэтому время осаждения частицы  $t = H/w_{\text{В}}$  не должно превышать времени ее пребывания в камере  $t_1 = L/w_{\Gamma}$ :

$$H/w_{\text{В}} < L/w_{\Gamma}. \quad (13.1)$$

Выражая скорость газа через расход  $V_{\Gamma}$ , деленный на площадь поперечного сечения камеры  $H \cdot B$ , получим  $H/w_{\text{В}} = L \cdot H \cdot B/V_{\Gamma}$ , откуда с учетом выражения для скорости витания частиц

$$w_{\text{В}} = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}{18 \cdot \mu},$$

следует, что

<sup>13</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [7]

$$V_{\Gamma} = L \cdot B \cdot w_B = L \cdot B \cdot \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}{18 \cdot \mu}. \quad (13.2)$$

Из формулы (13.2) находят предельное количество газа, которое можно пропустить через камеру при гарантированном осаждении частиц диаметром  $d$  и больше.

Решая обратную задачу, можно найти минимальный диаметр частиц, которые будут осаждаться при расходе газа  $V_{\Gamma}$ :

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot V_{\Gamma}}{L \cdot B \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}}. \quad (13.3)$$

Формулы (13.2) и (13.3) показывают, что решающую роль при осаждении играет площадь дна камеры, увеличение которой существенно улучшает условия осаждения. Уменьшение высоты камеры без увеличения площади дна ее ничего не дает, так как одновременно уменьшается площадь поперечного сечения камеры, а следовательно, растет скорость газа и сокращается время пребывания частицы в камере. Данные формулы справедливы лишь при условии ламинарного режима движения в осадительных камерах. Вследствие низкой эффективности и больших размеров эти камеры в настоящее время почти не применяются.

Процессы осаждения, происходящие в пылевых камерах, наблюдаются и в горизонтальных газоходах. Однако в этих условиях осаждение пыли в большинстве случаев нежелательно, поэтому скорости в газоходах принимают значительно более высокими (18-20 м/с), чтобы обеспечивались турбулентный режим движения и унос даже крупных частиц, а также чтобы обеспечивалась экономия металла при изготовлении газоходов.

Классическим примером осадительной камеры является шлаковик мартеновской печи. Шлаковик служит для очистки дыма, образующегося при сжигании топлива в мартеновской печи, от относительно крупных частиц пыли при высокой температуре дыма (около 1400 °С).

Входящая в формулы (13.2, 13.3) динамическая вязкость газа очень сильно зависит от температуры и состава газа. Для определения динамической вязкости смеси газов из "n" компонентов необходимо предварительно определить плотности отдельных компонентов газа

$$\rho_1 = \frac{M_1}{22,4}; \rho_2 = \frac{M_2}{22,4}; \dots \rho_n = \frac{M_n}{22,4}, \quad (13.4)$$

где  $n$  – количество компонентов в смеси;  $M_1, M_2, \dots, M_n$  – молярные массы отдельных компонентов смеси, кг/кмоль; 22,4 – молярный объем, м<sup>3</sup> / кмоль

и плотность смеси газов

$$\rho_{\text{см}} = a_1 \cdot \rho_1 + a_2 \cdot \rho_2 + \dots + a_n \cdot \rho_n, \quad (13.5)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – объемные доли газов в смеси,  $\text{м}^3 / \text{м}^3$ .

Динамическая вязкость смеси при нормальных условиях ( $T_0 = 273\text{К}$ ;  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ ) определяется по формуле

$$\mu_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{см}}}{a_1 \cdot \frac{\rho_1}{\mu_1} + a_2 \cdot \frac{\rho_2}{\mu_2} + \dots + a_n \cdot \frac{\rho_n}{\mu_n}}, \text{Па}\cdot\text{с} \quad (13.6)$$

где  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  – динамическая вязкость отдельных газов в смеси,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

При рабочей температуре  $T$  [К] динамическая вязкость компонентов смеси определяется из выражения

$$\mu_i = \mu_{0,i} \frac{273 + C_i}{T + C_i} \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5} \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n. \quad (13.7)$$

Входящие в (13.7) значения  $\mu_{0,i}$  (вязкость при  $0^\circ\text{C}$ ) и константы  $C_i$  для различных газов приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1 – Параметры, характеризующие вязкость газов

№	Газ	Химическая формула	Вязкость $\mu_0$ (при $0^\circ\text{C}$ и давлении $101325 \text{ Па}$ )	Константа $C$
1	Воздух	79% $\text{N}_2$ + 21% $\text{O}_2$	$17,5 \cdot 10^{-6}$	124
2	Азот	$\text{N}_2$	$17 \cdot 10^{-6}$	114
3	Водяной пар	$\text{H}_2\text{O}$	$10 \cdot 10^{-6}$	961
4	Диоксид углерода	$\text{CO}_2$	$13,7 \cdot 10^{-6}$	254
5	Кислород	$\text{O}_2$	$20,3 \cdot 10^{-6}$	131
6	Оксид углерода	$\text{CO}$	$16,6 \cdot 10^{-6}$	100
7	Диоксид серы	$\text{SO}_2$	$11,7 \cdot 10^{-6}$	396
8	Водород	$\text{H}_2$	$8,42 \cdot 10^{-6}$	73
9	Метан	$\text{CH}_4$	$10,3 \cdot 10^{-6}$	162
10	Аммиак	$\text{NH}_3$	$9,18 \cdot 10^{-6}$	626

## 13.2 Примеры расчетов

### 13.2.1 Пример 1 – Динамическая вязкость газа

Исходные данные:

Имеется шлаковик мартеновской печи в виде осадительной камеры. В шлаковик входит газ – запыленный дым заданного состава:

Компоненты	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\Sigma$
Содержание	64 %	16 %	13 %	7 %	100 %

Температура дыма ( $t_r$ ) изменяется от 0 °С до 1400 °С.

Задание:

В среде MathCAD определить функцию зависимости динамической вязкости от температуры дыма  $\mu = f(t_r)$  и построить ее график. Найти значения динамической вязкости в фиксированных точках при  $t_r = \{0; 1000; 1400\}$  °С.

Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунках 13.1а-13.1б.

ORIGIN := 1 - задание номера первого элемента всех массивов программы

**Дано:**

$t_g := (0, 1000, 1400)^T$  - фиксированные значения температуры, град. С  
 $t_n := 0$  - начало диапазона изменения температуры, град. С  
 $t_k := 1400$  - конец диапазона изменения температуры, град. С  
 $a_{n2} := 0.64$  - объемная доля N2 в газе, м3/м3  
 $a_{h2o} := 0.16$  - объемная доля H2O в газе, м3/м3  
 $a_{co2} := 0.13$  - объемная доля CO2 в газе, м3/м3  
 $a_{o2} := 0.07$  - объемная доля O2 в газе, м3/м3

**Решение:**

1. Справочные данные по компонентам газовой смеси:

- молярная масса, кг/кмоль:  
 $M_{n2} := 28$        $M_{h2o} := 18$        $M_{co2} := 44$        $M_{o2} := 32$

- константы для расчета вязкости:  
 $C_{n2} := 114$        $C_{h2o} := 961$        $C_{co2} := 254$        $C_{o2} := 131$

- вязкость при 0 град.С, Па\*с:  
 $\mu_{n2\_0} := 17.0 \cdot 10^{-6}$      $\mu_{h2o\_0} := 10.0 \cdot 10^{-6}$      $\mu_{co2\_0} := 13.7 \cdot 10^{-6}$      $\mu_{o2\_0} := 20.3 \cdot 10^{-6}$

2. Функции зависимости вязкости от температуры для каждой компоненты смеси, Па\*с

$$\mu_{n2}(T_g) := \mu_{n2\_0} \cdot \frac{273 + C_{n2}}{T_g + C_{n2}} \cdot \left(\frac{T_g}{273}\right)^{1.5} \quad - N2$$

$$\mu_{h2o}(T_g) := \mu_{h2o\_0} \cdot \frac{273 + C_{h2o}}{T_g + C_{h2o}} \cdot \left(\frac{T_g}{273}\right)^{1.5} \quad - H2O$$

$$\mu_{co2}(T_g) := \mu_{co2\_0} \cdot \frac{273 + C_{co2}}{T_g + C_{co2}} \cdot \left(\frac{T_g}{273}\right)^{1.5} \quad - CO2$$

$$\mu_{o2}(T_g) := \mu_{o2\_0} \cdot \frac{273 + C_{o2}}{T_g + C_{o2}} \cdot \left(\frac{T_g}{273}\right)^{1.5} \quad - O2$$

3. Плотность компонентов газа, кг/м3

$$\rho_{n2} := \frac{M_{n2}}{22.4} = 1.25 \quad \rho_{h2o} := \frac{M_{h2o}}{22.4} = 0.804 \quad \rho_{co2} := \frac{M_{co2}}{22.4} = 1.964 \quad \rho_{o2} := \frac{M_{o2}}{22.4} = 1.429$$

4. Плотность смеси газов, кг/м3

$$\rho_{sm} := a_{n2} \cdot \rho_{n2} + a_{h2o} \cdot \rho_{h2o} + a_{co2} \cdot \rho_{co2} + a_{o2} \cdot \rho_{o2} = 1.284$$

5. Функция зависимости вязкости от температуры для смеси газов, Па\*с

$$\mu(T_g) := \frac{\rho_{sm}}{\frac{a_{n2} \cdot \rho_{n2}}{\mu_{n2}(T_g)} + \frac{a_{h2o} \cdot \rho_{h2o}}{\mu_{h2o}(T_g)} + \frac{a_{co2} \cdot \rho_{co2}}{\mu_{co2}(T_g)} + \frac{a_{o2} \cdot \rho_{o2}}{\mu_{o2}(T_g)}}$$

Рисунок 13.1а – Протокол выполнения примера 1 "Динамическая вязкость газа" (начало)

Ответ:

Значения динамической вязкости смеси газов в фиксированных точках при температурах  $t_r = \{0; 1000; 1400\}$  °C составляют:  $\mu = \{15,38 \cdot 10^{-6}; 49,15 \cdot 10^{-6}; 58,16 \cdot 10^{-6}\}$  Па·с.

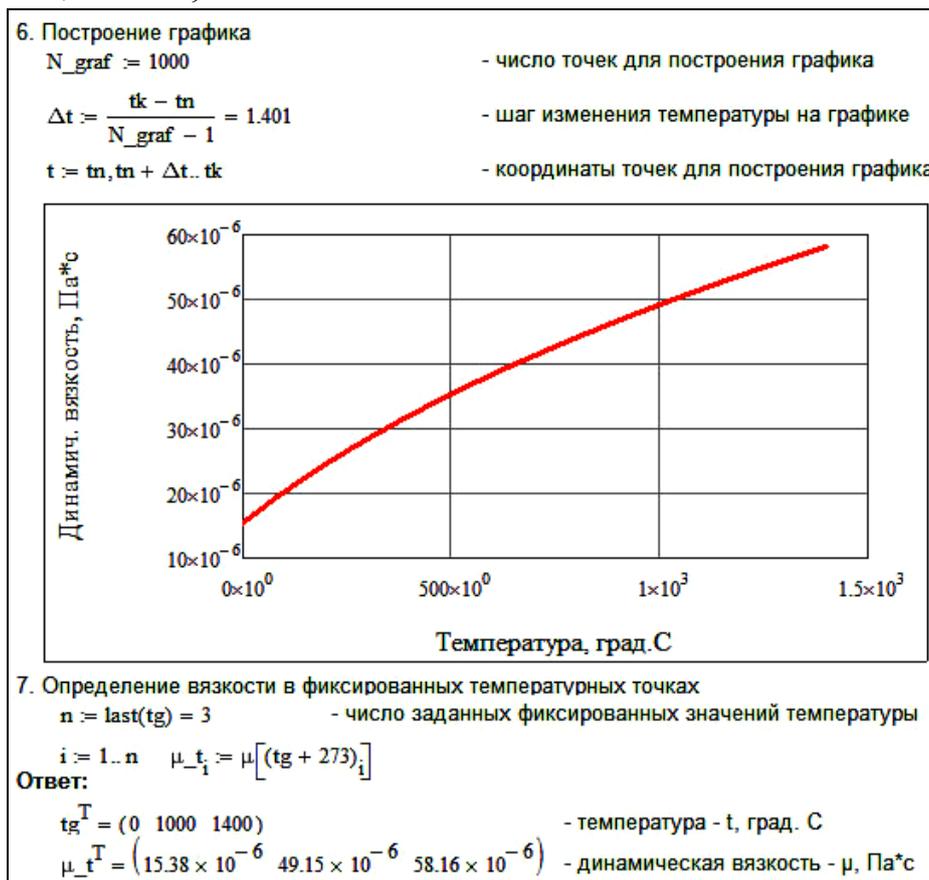


Рисунок 13.1б – Протокол выполнения примера 1 "Динамическая вязкость газа" (окончание)

### 13.2.2 Пример 2 – Расчет шлаковика мартеновской печи

#### Исходные данные:

Имеется шлаковик мартеновской печи в виде осадительной камеры (рис. 13.1). Размеры камеры:  $H \times B \times L = 5,4 \times 5,11 \times 12,055$  м. В шлаковик входит запыленный газ. Диаметр частиц пыли  $d = 100$  мкм. Температура газа  $t_r = 1400$  °C. Динамическая вязкость газа  $\mu = 58,16 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Плотность частиц пыли  $\rho_{п} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>. Плотность газа при нормальных условиях  $\rho_r = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>. Расход газа  $V_r = 56000$  м<sup>3</sup>/ч. Запыленность газового потока (концентрация пыли) на входе в шлаковик  $Z_{вход} = 30$  мг/м<sup>3</sup>.

#### Задание:

Определить степень очистки газа от пыли в шлаковике и запыленность потока газа на выходе из шлаковика.

#### Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 13.2.

#### Ответ:

Степень очистки газа от пыли в шлаковике составляет 12,1 %.  
 Запыленность потока газа на выходе из шлаковика составляет 26 мг/м<sup>3</sup>.

**Дано:**

- $H_k := 5.4$  - высота камеры шлаковика, м
- $L_k := 12.055$  - длина камеры шлаковика, м
- $B_k := 5.11$  - ширина камеры шлаковика, м
- $T_g := 1400 + 273$  - температура газа, К
- $\rho_p := 2000$  - плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>
- $g := 9.81$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>
- $Z_{\text{вход}} := \frac{30}{1000}$  - концентрация пыли (запыленность) на входе в камеру, кг/м<sup>3</sup>
- $d := 100 \cdot 10^{-6}$  - диаметр частиц пыли, м
- $\rho_g := 1.3$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>
- $V_g := \frac{56000}{3600}$  - расход газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/с
- $\mu := 58.16 \times 10^{-6}$  - динамическая вязкость газа при температуре газа  $T_g$ , Па\*с

**Решение:**

1. Скорость витания частиц пыли, м/с

$$W_{\text{vit}} := \frac{d^2 \cdot \rho_p \cdot g}{18 \cdot \mu} = 0.19$$

2. Действительная скорость газового потока вдоль камеры, м/с

$$W_g := \frac{V_g}{H_k \cdot B_k} \cdot \frac{T_g}{273} = 3.45$$

3. Максимальное время пребывания в камере частиц пыли, с

$$\tau := \frac{L_k}{W_g} = 3.5$$

4. Толщина газового слоя возле дна камеры, который очистится от пыли, м

$$H_{\text{ос}} := W_{\text{vit}} \cdot \tau = 0.65$$

5. Массовый расход пыли с потоком газа в начале камеры, кг/с

$$M_{p_n} := Z_{\text{вход}} \cdot V_g = 0.47$$

6. Массовый расход пыли, выпавшей из потока в бункер камеры, кг/с

$$M_{p_{\text{ос}}} := \begin{cases} M_{p_{\text{ос}}} \leftarrow \frac{H_{\text{ос}}}{H_k} \cdot M_{p_n} & \text{if } H_{\text{ос}} < H_k \\ M_{p_{\text{ос}}} \leftarrow M_{p_n} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{p_{\text{ос}}} = 0.057$$

7. Массовый расход пыли с потоком газа на выходе из камеры, кг/с

$$M_{p_k} := M_{p_n} - M_{p_{\text{ос}}} = 0.41$$

8. Степень очистки газа от пыли, %

$$\eta := \frac{M_{p_{\text{ос}}}}{M_{p_n}} \cdot 100 = 12.1$$

9. Концентрация пыли (запыленность) потока газа на выходе из камеры, кг/м<sup>3</sup>

$$Z_{\text{выход}} := \frac{M_{p_k}}{V_g} = 0.026$$

**Ответ:**

Степень очистки газа от пыли в камере шлаковика составляет  $\eta = 12.1$  %. Концентрация пыли (запыленность) потока газа на выходе из камеры составляет  $Z_{\text{выход}} = 0.026$  кг/м<sup>3</sup>.

Рисунок 13.2 – Протокол выполнения примера 2 "Расчет шлаковика мартеновской печи"

### 13.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 13.1

Определить плотность воздуха, состоящего из 21% кислорода и 79% азота.

#### Задача 13.2

Определить плотность газообразного аммиака  $\text{NH}_3$ .

#### Задача 13.3

Определить плотность метана.

#### Задача 13.4

Определить расход газа через поперечное сечение канала площадью  $2 \text{ м}^2$ , если скорость потока газа  $20 \text{ м/с}$ .

#### Задача 13.5

Определить действительную скорость газа при температуре газа  $546 \text{ К}$ , если скорость газа при нормальных условиях  $2 \text{ м/с}$ .

#### Задача 13.6

Определить площадь поперечного сечения пылеосадительной камеры для прохода газа, если ее высота  $2 \text{ м}$ , а ширина  $4 \text{ м}$ .

#### Задача 13.7

Определить время пребывания частиц пыли в пылеосадительной камере постоянного сечения, если ее длина  $4 \text{ м}$ , а скорость потока газа  $4 \text{ м/с}$ .

#### Задача 13.8

Определить степень очистки газа от пыли в пылеосадительной камере, если концентрация пыли до камеры  $55 \text{ мг/м}^3$ , а после камеры  $50 \text{ мг/м}^3$ .

#### Задача 13.9 (повышенной сложности)

Используя исходные данные примера 2 "Расчет шлаковика мартеновской печи" создать функцию зависимости степени очистки газа ( $\eta$ ) от диаметра частиц пыли ( $d$ ) и с ее помощью построить график  $\eta = f(d)$  при изменении диаметра от  $d = 0 \text{ мкм}$  до  $d = 100 \text{ мкм}$ .

### 13.4 Контрольные вопросы по практической работе

1) Как будет выглядеть траектория движения пылевой частицы внутри газового потока по длине осадительной камеры?

2) Под действием какой силы происходит выпадение частиц пыли из газового потока?

3) Как изменится интенсивность выпадения частиц пыли из газового потока, если уменьшилось время пребывания частиц в осадительной камере?

4) Какую размерность имеет скорость витания частиц пыли?

5) Какую размерность имеет расход газа через поперечное сечение камеры?

6) Как изменится степень очистки газа в осадительной камере при уменьшении скорости витания частиц пыли?

7) Почему нежелательно выпадение пыли в газоходах за пределами осадительных камер?

8) Как зависит вязкость потока газа от температуры? Что будет с вязкостью, если температура газа уменьшилась?

## 14 Расчет улавливания пыли в циклонах<sup>14</sup>

### 14.1 Основы расчетов процессов в центробежном пылеуловителе

Циклон является одним из наиболее распространенных пылеулавливающих аппаратов. Однако с высокой эффективностью циклоны способны улавливать пыль только размером 15-20 мкм и более.

Работа циклона основана на использовании центробежных сил, возникающих при вращении газового потока внутри корпуса циклона. Это вращение достигается путем тангенциального ввода газа в циклон. В результате действия центробежных сил частицы пыли, взвешенные в потоке газа, отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Газ, освобожденный от пыли, продолжая вращаться, совершает поворот на  $180^\circ$  и выходит из циклона через расположенную по оси выхлопную трубу (рис. 14.1). Частицы пыли, достигшие стенок корпуса, под действием перемещающегося в осевом направлении вращающегося потока и сил тяжести движутся по направлению к выходному отверстию корпуса и выводятся из циклона. Ввиду того что решающим фактором, обуславливающим движение пыли, являются аэродинамические силы, а не силы тяжести, циклоны можно располагать наклонно и даже горизонтально.

Наибольшее распространение в Украине получили цилиндрические циклоны конструкции НИИОгаза. Существуют три типа циклонов конструкции НИИОгаза основной серии ЦН (рис. 14.2), различающиеся между собой углом наклона входного патрубка к горизонту:

- а) ЦН-15 с углом наклона  $15^\circ$  (в том числе укороченный – ЦН-15У);
- б) ЦН-11 с углом наклона  $11^\circ$ . Он имеет повышенную эффективность по сравнению с ЦН-15, но обладает повышенным гидравлическим сопротивлением;
- в) ЦН-24 с углом наклона  $24^\circ$ . Он имеет меньшую эффективность по сравнению с ЦН-15, но обладает меньшим гидравлическим сопротивлением.

Любой циклон из размеров каждого типа может быть выражен в долях от диаметра циклона "D". Приняты следующие стандартные размеры диаметров, мм: 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2400; 3000. Из-за резкого снижения эффективности работы циклона с увеличением диаметра, применять циклоны типа ЦН диаметром более 1000 мм не рекомендуется. При увеличении расхода газа рекомендуется не увеличивать диаметр циклона, а применять группу циклонов, работающих параллельно.

Стандартные конструкции циклонов могут работать при температуре газа не выше  $400^\circ\text{C}$  и избыточном давлении не более 2,5 кПа.

---

<sup>14</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [7]

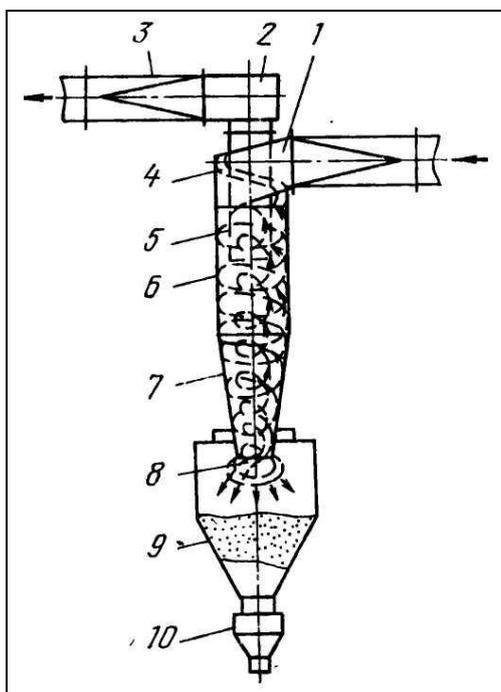


Рисунок 14.1 – Схема циклона:

1 – входной патрубок; 2 – раскручивающая улитка; 3 – выходной патрубок; 4 – крышка; 5 – выхлопная труба; 6 – цилиндрическая часть; 7 – коническая часть; 8 – пневмовыпускное отверстие; 9 – бункер для пыли; 10 – пылевой затвор

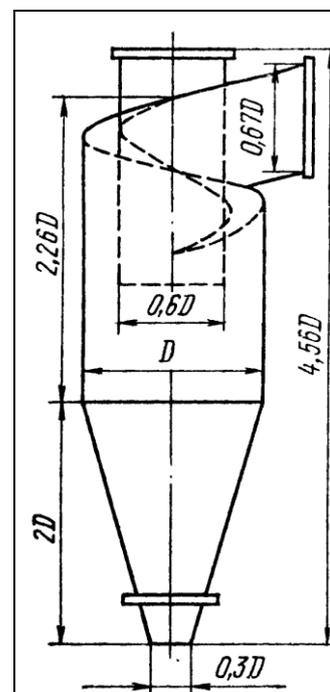


Рисунок 14.2 – Схема циклона серии ЦН

При движении во вращающемся криволинейном потоке газа частицы пыли находятся под действием силы тяжести, центробежной силы и силы сопротивления. Сила тяжести для частицы обычно пренебрежимо мала. Скорость частиц пыли в циклоне можно без большой ошибки считать равной скорости вращения газового потока.

Величина центробежной силы  $P_{ц}$ , действующей на частицу пыли массой  $M$ , равна:

$$P_{ц} = \frac{M \cdot w_{г}^2}{R} = \frac{\pi \cdot d_{п}^3}{6} \cdot \rho_{ч} \cdot \frac{w_{г}^2}{R}, \quad (14.1)$$

где  $R$  – радиус кривизны траектории в рассматриваемой точке.

Под влиянием центробежной силы частица приобретает скорость в радиальном направлении, встречая при своем движении сопротивление газового слоя. Движение частицы пыли в радиальном направлении приближенно можно рассматривать как прохождение через совокупность равновесных состояний, в каждом из которых изменяющаяся по величине центробежная сила уравнивается соответственно изменяющейся силой сопротивления. Применяя закон Стокса, можно написать:

$$\frac{\pi \cdot d_{п}^3}{6} \cdot \rho_{ч} \cdot \frac{w_{г}^2}{R} = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_{max}. \quad (14.2)$$

Таким образом, предельная скорость, которой может достигнуть частица пыли в радиальном направлении, равна

$$w_{\max} = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}{18 \cdot \mu \cdot R}. \quad (14.3)$$

В связи с непрерывным перемещением частицы в радиальном направлении величина радиуса  $R$ , а следовательно, и величина предельной скорости непрерывно меняются и могут быть выражены производной  $dR/dt$ . Следовательно

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}{18 \cdot \mu \cdot R}. \quad (14.4)$$

После разделения переменных и интегрирования в пределах от  $R_1$  до  $R_2$  и от 0 до  $t$  получим

$$R_2^2 - R_1^2 = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}{9 \cdot \mu},$$

откуда время прохождения частицей пути  $R_2 - R_1$  равно

$$t = 9 \cdot \mu \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}, \quad (14.5)$$

Диаметр частицы, успевающей за время  $t$  пройти путь  $R_2 - R_1$ , будет равен

$$d = \frac{3}{w_{\text{г}}} \cdot \sqrt{\mu \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{t \cdot \rho_{\text{ч}}}}. \quad (14.6)$$

Эффективность работы циклона возрастает с увеличением скорости газа  $w_{\text{г}}$ , размера частицы  $d$  и плотности частиц пыли  $\rho_{\text{ч}}$  и уменьшается с увеличением вязкости газа  $\mu$  и размеров циклона.

Методика расчета циклона направлена на определение диаметра циклона, гидравлического сопротивления циклона и степень очистки газа.

Основные справочные материалы для расчета приведены в таблицах 14.1-14.4.

Таблица 14.1 – Значение коэффициентов местного сопротивления циклонов (диаметр циклона  $D = 500$  мм, средняя скорость внутри циклона  $w > 3$  м/с)

Тип циклонов	Без дополнительных устройств		С раскручивателем		С кольцевым диффузором		С выходной улиткой	С отводом 90° $R/d = 1,5$	
	$\xi_{500}^C$	$\xi_{500}^П$	$\xi_{500}^C$	$\xi_{500}^П$	$\xi_{500}^C$	$\xi_{500}^П$	$\xi_{500}$	$L/d=0-12$ $\xi_{500}^C$	$L/d>12$ $\xi_{500}^C$
ЦН-11	245	250	–	–	207	215	235	245	250
ЦН-15	155	163	115	121	132	140	150	155	160
ЦН-15У	165	170	148	152	140	148	158	165	170
ЦН-24	75	80	61	66	64	70	73	75	80
СДК-ЦН-33	520	600	–	–	–	–	500	–	560
СК-ЦН-34	1050	1150	–	–	–	–	–	–	–

Здесь:  $\xi_{500}^C$  – коэффициент местного сопротивления при работе на выхлоп в сеть;  $\xi_{500}^П$  – то же, на выхлоп в атмосферу;  $d$  – диаметр выхлопной трубы;  $R$  – радиус отвода;  $L$  – длина прямого выходного участка.

Таблица 14.2 – Поправка  $K_1$  на влияние диаметра циклона  $D$

$D$ , мм	$K_1$ при типе циклонов		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34
150	0,94	0,85	1,00
200	0,95	0,90	1,00
300	0,96	0,93	1,00
450	0,99	1,00	1,00
500 и больше	1,00	1,00	1,00

Таблица 14.3 – Поправка  $K_2$  на влияние запыленности газа  $Z$

Тип циклонов	$K_2$ при запыленности газа						
	0	10 г/м <sup>3</sup>	20 г/м <sup>3</sup>	40 г/м <sup>3</sup>	80 г/м <sup>3</sup>	120 г/м <sup>3</sup>	150 г/м <sup>3</sup>
ЦН-11	1,0	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1,0	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,85
ЦН-15У	1,0	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1,0	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1,0	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1,0	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Таблица 14.4 – Расчетные параметры циклонов конструкции НИИОгаза

Параметры	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
$K$	41,4	41,4	41,4	46,9	35,97	34,97
$d_{50Ц}$ , мкм	2,47	3,06	3,48	4,71	1,428	1,297
$\sigma_{Ц}$	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,4281	0,41555
$w$ , м/с	3,5	3,5	3,5	4,5	2,5	2,5

## 14.2 Примеры расчетов

### 14.2.1 Пример 1 – Расчет циклона

#### Исходные данные:

В кислородно-конвертерном цеху размещается одиночный циклон для очистки дымовых газов. Расход газа при нормальных условиях  $V_0 = 4100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Плотность газа  $\rho_{г,0} = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ; температура газа  $t = 110 \text{ °C}$ ; динамическая вязкость газа  $\mu = 24,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; атмосферное давление  $p_{\text{бар}} = 101,3 \text{ кПа}$ ; разрежение в циклоне  $p_r = 30 \text{ Па}$ ; начальная концентрация пыли в газе  $z_{\text{нач}} = 50 \text{ г/м}^3$ ; характеристика дисперсного состава пыли: средний диаметр частиц  $d_m = 10 \text{ мкм}$ ; логарифм дисперсии по размеру частиц  $\lg \sigma_q = 0,7$ ; плотность частиц пыли  $\rho_q = 3000 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм при отсутствии раскручивателя потока газа и соединении циклона с газовой сетью составляет  $\xi_{500} = 155$ .

Справочные стандартные параметры циклона ЦН-15 при улавливании 50% пыли диаметром  $d_{т,50} = 4,5 \text{ мкм}$ : скорость  $w_T = 3,5 \text{ м/с}$ ; вязкость газа  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; диаметр  $D_T = 0,6 \text{ м}$ ; плотность частиц пыли  $\rho_T = 1930 \text{ кг/м}^3$ . Логарифм дисперсии по размеру частиц  $\lg \sigma_T = 0,352$ .

#### Задание:

В среде MathCAD выбрать циклон типа ЦН-15, а также определить его гидравлическое сопротивление и степень очистки газа.

#### Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рис. 14.1а-14.1б.

#### Ответ:

Диаметр циклона ЦН-15 составляет 0,8 м, а гидравлическое сопротивление 655 Па. Степень очистки газа составляет 66,6%. Концентрация пыли на выходе циклона  $16,7 \text{ г/м}^3$ .

## 14.3 Задания для самостоятельной работы

### Задача 14.1

Определить плотность воздуха при температуре  $0 \text{ °C}$ , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $1,293 \text{ кг/м}^3$ .

### Задача 14.2

Определить плотность воздуха при температуре  $273 \text{ °C}$ , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $1,293 \text{ кг/м}^3$ .

### Задача 14.3

Определить плотность воздуха при давлении  $202650 \text{ Па}$ , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $1,293 \text{ кг/м}^3$ .

ORIGIN := 1 - задание номера первого элемента всех массивов программы

**Дано:**

$V_0 := \frac{4100.}{3600.}$  - расход газа при норм. условиях, м<sup>3</sup>/с

$\rho_{g0} := 1.293$  - плотность газа при норм. условиях, кг/м<sup>3</sup>

$\mu := 24.8 \cdot 10^{-6}$  - динамическая вязкость газа, Па\*с

$T_g := 110. + 273$  - температура газа, К

$P_{bar} := 101300.$  - атмосферное давление, кПа

$P_r := 30.$  - разрежение (отрицательное избыточное давление), Па

$Z_{нач} := 50. \cdot 10^{-3}$  - начальная концентрация пыли в газе, кг/м<sup>3</sup>

$d_m := 10.$  - усредненный диаметр частиц пыли, мкм

$ig\sigma := 0.7$  - характеристика дисперсного состава пыли, б/р

$\rho_p := 3000.$  - плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>

$W_{opt} := 3.5$  - оптимальная (экономичная) скорость газа внутри циклона (справочная величина), м/с

$\xi_{500} := 155.$  - коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм (справочная величина для циклона ЦН-15 - без раскручивателя на выхлопе в сеть), б/р

**Решение:**

1. Плотность газа при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_g := \rho_{g0} \cdot \frac{273}{T_g} \cdot \frac{(P_{bar} - P_r)}{P_{bar}} = 0.92$$

2. Расход газа при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/с

$$V_g := V_0 \cdot \frac{\rho_{g0}}{\rho_g} = 1.598$$

3. Диаметр циклона при оптимальной скорости, м

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot V_g}{\pi \cdot W_{opt}}} = 0.76$$

4. Ближайший стандартный диаметр циклона, м

$$D_{st} := \frac{\text{round}(D \cdot 10, 0)}{10} = 0.800$$

5. Действительная скорость газа при стандартном диаметре циклона, м/с

$$W_g := \frac{4 \cdot V_g}{\pi \cdot D_{st}^2} = 3.2$$

Рисунок 14.1а – Протокол выполнения примера 1 "Расчет циклона" (начало)

#### Задача 14.4

Определить объемный расход воздуха при давлении 202650 Па, если расход воздуха при нормальных условиях составляет 1,5 м<sup>3</sup>/с.

#### Задача 14.5

Определить действительный объемный расход воздуха при оптимальной (экономичной) скорости потока 3,5 м/с, если диаметр циклона 0,5 м.

#### Задача 14.6

Определить гидравлическое сопротивление циклона, если коэффициент сопротивления равен 100, скорость потока 4 м/с, а плотность потока газа 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

#### Задача 14.7

Определить степень очистки газа в циклоне, если начальная концентрация пыли составляет 50 г/м<sup>3</sup>, а конечная 30 г/м<sup>3</sup>.

6. Поправочный коэффициент (K1), учитывающий влияние диаметра циклона ЦН-15, определяется из таблицы K1D:

$$K1\_D := \begin{pmatrix} 150 & 200 & 300 & 400 & 500 \end{pmatrix}^T \quad \begin{array}{l} \text{- диаметр циклона, мм} \\ \text{- коэффициент K1} \end{array}$$

$$K1 := \text{linterp}\left(\frac{K1\_D^{(1)}}{1000}, K1\_D^{(2)}, D\_st\right) = 1 \quad \text{- выбор K1 интерполяцией из табл. K1\_D}$$

7. Поправочный коэффициент (K2), учитывающий влияние запыленности газа, определяется из таблицы K2\_Z:

$$K2\_Z := \begin{pmatrix} 1 & 10 & 20 & 40 & 80 & 120 & 150 \end{pmatrix}^T \quad \begin{array}{l} \text{- запыленность (концентрация пыли), г/м3} \\ \text{- коэффициент K2} \end{array}$$

$$K2 := \text{linterp}(K2\_Z^{(1)} \cdot 10^{-3}, K2\_Z^{(2)}, Z\_нач) = 0.907 \quad \text{- выбор K2 интерполяцией из табл. K2\_Z}$$

8. Коэффициент сопротивления циклона, б/р

$$\xi := K1 \cdot K2 \cdot \xi_{500} = 141$$

9. Гидравлическое сопротивление циклона, Па

$$\Delta p := \xi \cdot \frac{\rho\_г \cdot W\_г^2}{2} = 655$$

10. Константы при определении размера улавливаемых частиц (справочно для циклона ЦН-15):

$$d_{t50\%} := 4.5 \text{ мкм}; \quad W_t := 3.5 \text{ м/с}; \quad \mu_t := 22.2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad D_t := 0.6 \text{ м}; \quad \rho_t := 1930 \text{ кг/м3};$$

$$I\sigma_t := 0.352$$

11. Размер частиц, улавливаемых циклоном при раб. условиях с эффективностью 50%, мкм

$$d_{50\%} := d_{t50\%} \cdot \sqrt{\frac{D\_st}{D_t} \cdot \frac{\rho_t}{\rho_p} \cdot \frac{\mu}{\mu_t} \cdot \frac{W_t}{W_g}} = 4.62$$

12. Параметр осаждения "X", б/р

$$X := \frac{\log\left(\frac{d_m}{d_{50\%}}\right)}{\sqrt{I\sigma_t^2 + I\sigma^2}} = 0.428$$

13. Степень очистки газа в циклоне определяется кумулятивной функцией на основе нормального закона распределения по формуле:

$$\eta = \left( \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp(-0.5 \cdot x^2) dx \right) \cdot \text{Функция в Маткаде является стандартной - спотм(x):}$$

$$\eta := \text{спотм}(X) = 0.666 \quad \text{или в процентах: } \eta \cdot 100 = 66.6 \%$$

14. Концентрация пыли в газе после циклона

$$Z_{кон} := Z_{нач} \cdot (1 - \eta) = 0.0167 \text{ кг/м3} \quad \text{или} \quad Z_{кон} \cdot 10^3 = 16.7 \text{ г/м3}$$

**Ответ:**

Диаметр циклона  $D\_st = 0.8 \text{ м}$ , гидравлическое сопротивление  $\Delta p = 655 \text{ Па}$ .

Степень очистки газа составляет  $\eta \cdot 100 = 66.6 \%$ . Концентрация пыли в газе после циклона,  $Z_{кон} \cdot 10^3 = 16.7 \text{ г/м3}$ .

Рисунок 14.1б – Протокол выполнения примера 1 "Расчет циклона" (окончание)

#### 14.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) При каком размере пылевых частиц циклон работает с максимальной эффективностью?
- 2) В результате действия каких сил частицы пыли, взвешенные в потоке газа, отбрасываются на стенки корпуса циклона и выпадают из потока?
- 3) Зависит ли эффективность работы циклона от диаметра циклона?
- 4) При какой температуре газа могут стабильно работать циклоны?

5) Как изменяется эффективность работы циклона с увеличением скорости газа?

6) Как изменяется эффективность работы циклона с увеличением размера частиц в газовом потоке?

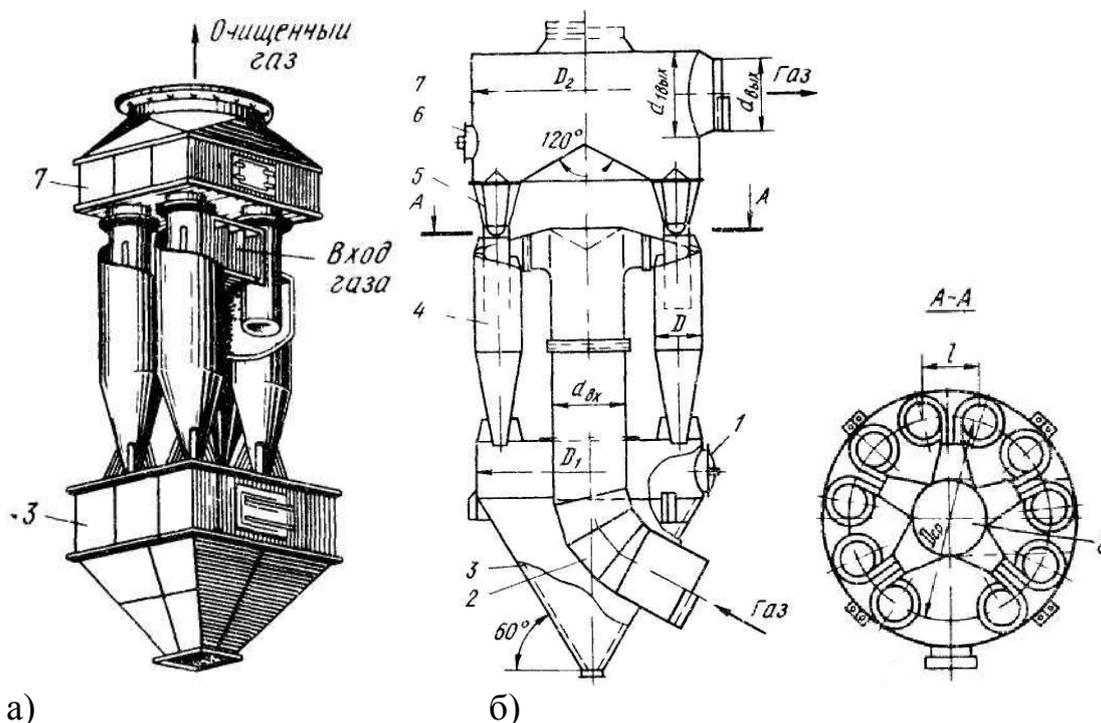
7) Как изменяется эффективность работы циклона с увеличением плотности частиц в газовом потоке?

8) Какой тип циклона для очистки газов наиболее распространен в Украине?

## 15 Определение гидравлического сопротивления и размеров циклона. Гидравлические расчеты<sup>15</sup>

### 15.1 Основы расчетов процессов в групповом центробежном пылеуловителе

Для очистки большого количества газа используют группу циклонов которые устанавливают на общий бункер (рис. 15.1). Во входном патрубке группового циклона запыленный газ разделяется на параллельные потоки, которые направляются в отдельные циклоны. Пыль осаждается в бункере, а очищенный газ отводится через общий выхлопной патрубок, выполненный в виде сборника или улитки. Между выхлопными трубами и сборником иногда размещают кольцевые диффузоры, дающие возможность снизить гидравлическое сопротивление циклонов. Групповые циклоны делают прямоугольной компоновки (рис. 15.1,а) и круговой (рис. 15.1,б). Число циклонов при прямоугольной компоновке не превышает 8, а при круговой – не более 14.



а)

б)

Рисунок 15.1 – Групповой циклон конструкции НИИОгаза:

а – прямоугольной компоновки из четырех циклонов; б – круговой компоновки из десяти элементов;

1 – люк; 2 – газоход подводящий; 3 – бункер; 4 – циклон; 5 – кольцевой диффузор; 6 – заглушка диаметром 500 мм; 7 – сборник чистого газа; 8 – коллектор входа газа

<sup>15</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [6]

При расчете сухих центробежных циклонов определяют их основные размеры, количество циклонов в группе, гидравлическое сопротивление и эффективность очистки газа.

Для ориентировочного выбора диаметра самых распространенных в Украине циклонов конструкции НИИОгаза (ЦН-15 и др.) и их числа в группе в зависимости от количества очищаемого газа можно пользоваться данными, приведенными в табл. 15.1. Последующим расчетом проверяют и уточняют эти табличные данные.

Таблица 15.1 – Ориентировочные значения количества очищаемого газа в циклонах конструкции НИИОгаза

Диаметр циклона D, мм	Количество очищаемого газа при числе циклонов в группе, м <sup>3</sup> /ч				
	один	два	четыре	шесть	восемь
400	1450-1691	–	5800-6764	–	–
450	1835-2141	–	7340-8564	–	–
500	2270-2645	4540-5290	9080-10580	13620-15870	–
550	2740-3200	5480-6400	10960-12800	16440-19200	–
600	3262-3810	6524-7620	13048-15240	19572-22860	–
650	3825-4460	7650-8920	15300-17840	22950-26760	–
700	4400-5180	8800-10360	17600-20720	26400-31080	–
750	5100-5950	10200-11900	20400-23800	30600-35700	40800-47600
800	5800-6760	11600-13500	23200-27040	34800-40560	46400-54080

Как видно из табл. 15.1 одному расходу могут соответствовать разные сочетания диаметра и количества циклонов в группе. В этом случае желательно выбирать циклоны меньшего диаметра и большим количеством в группе, т.к. этот вариант обеспечивает лучшую очистку газов от пыли. Например, задан расход 20000 м<sup>3</sup>/ч. Он может быть обеспечен шестью циклонами диаметром 600 мм или четырьмя циклонами диаметром 700 мм. Выбираем шесть циклонов диаметром 600 мм.

Методика расчета группы циклонов основывается на методике расчета одного циклона (см. предыдущее практическое занятие). Отличие заключается в расчёте коэффициента гидравлического сопротивления циклона.

Например, коэффициент гидравлического сопротивления одного циклона в группе циклонов находится по формуле

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} + K_3,$$

где  $K_1$  – поправочный коэффициент на влияние диаметра циклона;  $K_2$  – поправочный коэффициент на влияние запыленности газа;  $\xi_{500}$  – коэффициент гидравлического сопротивления циклона диаметром 500 мм;  $K_3$  – поправочный коэффициент, учитывающий групповую компоновку циклона (его принимают равным 35 при прямоугольной компоновке и равным 60 при круговой компоновке).

В данной формуле  $K_1$ ,  $K_2$  и  $\xi_{500}$  определяются по тем же формулам как и для одного одиночного циклона. При групповой компоновке добавляется коэффициент  $K_3$ .

## 15.2 Примеры расчетов

### 15.2.1 Пример 1 – Расчет группового циклона

#### Исходные данные:

В системе вентиляции цеха планируется разместить групповой циклон для очистки воздуха, состоящий из однотипных циклонов типа ЦН-15 с прямоугольной компоновкой. Действительный расход воздуха  $V_0 = 20000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Плотность воздуха  $\rho_{г,0} = 1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; влагосодержание воздуха  $f = 6 \text{ г}/\text{м}^3$ ; температура воздуха  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; динамическая вязкость воздуха  $\mu = 21,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; атмосферное давление  $p_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$ ; разрежение в циклоне  $p_r = 196 \text{ Па}$ ; начальная концентрация пыли в газе  $z_{\text{нач}} = 2 \text{ г}/\text{м}^3$ ; плотность частиц пыли  $\rho_{\text{ч}} = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм  $\xi_{500} = 155$ . Выхлоп циклона соединен с сетью (воздухопроводом) через раскручиватель потока воздуха.

#### Задание:

В среде MathCAD выбрать диаметр циклона типа ЦН-15 и их количество, а также определить гидравлическое сопротивление циклона и степень очистки воздуха.

#### Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рис. 15.1а-15.1в.

#### Ответ:

Число циклонов в группе – 6 штук. Диаметр одиночного циклона составляет 0,6 м. Гидравлическое сопротивление группового циклона 753 Па. Степень очистки газа составляет 89,3%. Концентрация пыли на выходе циклона  $0,21 \text{ г}/\text{м}^3$ .

## 15.3 Задания для самостоятельной работы

### Задача 15.1

Определить плотность воздуха при влажности  $10 \text{ г}/\text{м}^3$ , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

### Задача 15.2

Определить плотность воздуха при температуре  $273 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $202650 \text{ Па}$ , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

ORIGIN := 1 - задание номера первого элемента всех массивов программы

Дано:

Тип циклона в соответствие с таблицей:

ТЦ :=

	1	2	3	4	5	6
1	"ЦН-11"	"ЦН-15"	"ЦН-15У"	"ЦН-24"	"СДК-ЦН-33"	"СК-ЦН-34"
2	1	2	3	4	5	6

Тип := 2 - выбран  $(ТЦ^{Ттип})_1 = \text{"ЦН-15"}$

Расчетные параметры циклонов:

РПЦ :=

	1	2	3	4	5	6
1	"ЦН-11"	"ЦН-15"	"ЦН-15У"	"ЦН-24"	"СДК-ЦН-33"	"СК-ЦН-34"
2	41.4	41.4	41.4	46.9	35.97	34.97
3	2.47	3.06	3.48	4.71	1.428	1.297
4	0.3979	0.3979	0.3979	0.3979	0.4281	0.41555
5	3.5	3.5	3.5	4.5	2.5	2.5

Отсюда:

$$K := \left[ (РПЦ^T)^{(2)} \right]_{Ттип} = 41.4$$

- коэффициент пропорциональности

$$d_{50ц} := \left[ (РПЦ^T)^{(3)} \right]_{Ттип} = 3.06$$

- диаметр частиц, улавливаемых в условном циклоне с эффективностью 50%, мкм

$$\sigma_{ц} := \left[ (РПЦ^T)^{(4)} \right]_{Ттип} = 0.3979$$

- степень полидисперсности частиц, улавливаемых данным типом циклона

$$W_{opt} := \left[ (РПЦ^T)^{(5)} \right]_{Ттип} = 3.5$$

- оптимальная (экономичная) средняя скорость газа в цилиндрической части циклона, м/с

Поправочный коэффициент K1:

K1\_D :=

	1	2	3	4	5	6	7
1	"D, мм"	"ЦН-11"	"ЦН-15"	"ЦН-15У"	"ЦН-24"	"СДК-ЦН-33"	"СК-ЦН-34"
2	150	0.94	0.85	0.85	0.85	1	1
3	200	0.95	0.9	0.9	0.9	1	1
4	300	0.96	0.93	0.93	0.93	1	1
5	450	0.99	1	1	1	1	1
6	500	1	1	1	1	1	1
7	600	1	1	1	1	1	1

Поправочный коэффициент K2:

K2\_Z :=

	1	2	3	4	5	6	7
1	"Z, г/м3"	"ЦН-11"	"ЦН-15"	"ЦН-15У"	"ЦН-24"	"СДК-ЦН-33"	"СК-ЦН-34"
2	0	1	1	1	1	1	1
3	10	0.96	0.93	0.93	0.95	0.81	0.98
4	20	0.94	0.92	0.92	0.93	0.785	0.947
5	40	0.92	0.91	0.91	0.92	0.78	0.93
6	80	0.9	0.9	0.89	0.9	0.77	0.915
7	120	0.87	0.87	0.88	0.87	0.76	0.91
8	150	0.85	0.85	0.87	0.86	0.745	0.9

Фракционный состав пыли:

Состав :=

	1	2	3	4	5	6	7
1	"Размер, мкм"	45	33	18	14.5	7.5	4
2	"Доля, %" "	38	20	20	10	7	5

$$S := \text{submatrix}(\text{Состав}, 1, \text{rows}(\text{Состав}), 2, \text{cols}(\text{Состав})) = \begin{pmatrix} 45 & 33 & 18 & 14.5 & 7.5 & 4 \\ 38 & 20 & 20 & 10 & 7 & 5 \end{pmatrix}$$

$$\text{Размер} := (S^T)^{(1)} \quad \text{Размер}^T = (45 \ 33 \ 18 \ 14.5 \ 7.5 \ 4) \quad \text{- диаметр частиц пыли, мкм}$$

$$\text{Доля} := (S^T)^{(2)} \quad \text{Доля}^T = (38 \ 20 \ 20 \ 10 \ 7 \ 5) \quad \text{- \% доля частиц в общей массе, \%}$$

Рисунок 15.1а – Протокол выполнения примера 1 "Расчет группового циклона" (начало)

Коэффициент местного сопротивления ( $\xi$ ) на выхлопе циклона  
(при  $D = 500$  мм и при  $W = 3$  м/с):

$\xi :=$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	"Тип"	"Без дополн."	"устройств"	"С раскру-"	"чивателем"	С кольцевым	диффузором"	С "улиткой"
2	"циклонов"	"Кси_500_С"	"Кси_500_П"	"Кси_500_С"	"Кси_500_П"	"Кси_500_С"	"Кси_500_П"	"Кси_500"
3	"ЦН-11"	245	250	".."	".."	207	215	235
4	"ЦН-15"	155	163	115	121	132	140	150
5	"ЦН-15У"	165	170	148	152	140	148	158
6	"ЦН-24"	75	80	61	66	64	70	73
7	"СДК-ЦН-33"	520	600	".."	".."	".."	".."	500
8	"СК-ЦН-34"	1050	1150	".."	".."	".."	".."	".."

Здесь:  $\xi_{500}$  (Кси\_500) - коэффициент местного сопротивления при работе циклона на выхлоп в сеть (индекс "С") и на выхлоп в атмосферу (индекс "П")

Отсюда:

$\xi_{500} = 115$ . - коэффициент сопротивления на выхлопе циклона ЦН-15  
(с раскручивателем на выхлопе в сеть), б/р

Остальные исходные данные:

$V_{g\_Σ} := \frac{20000}{3600} = 5.556$  - расход газа при норм. условиях, м<sup>3</sup>/с

$f := \frac{6}{1000}$  - влагосодержание воздуха, кг/м<sup>3</sup>

$\rho_{g0} = 1.3$  - плотность воздуха при норм. условиях, кг/м<sup>3</sup>

$\mu := 21.7 \cdot 10^{-6}$  - динамическая вязкость газа, Па\*с

$T_g = 100. + 273$  - температура газа, К

$P_{bar} = 101325$ . - атмосферное давление, кПа

$P_r = 196$ . - разрежение (отрицательное избыточное давление), Па

$Z_{нач} = 2 \cdot 10^{-3}$  - начальная концентрация пыли в газе, кг/м<sup>3</sup>

$\rho_p = 2500$ . - плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>

$K3 = 35$  - прямоугольная компоновка циклонов в группе

Решение:

1. Плотность воздуха с поправкой на влажность, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{g\_w1} := \frac{\rho_{g0} + f}{1 + \frac{f}{0.804}} = 1.296$$

2. Плотность воздуха с поправкой на давление и температуру, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_g := \rho_{g\_w1} \cdot \frac{273}{T_g} \cdot \frac{P_{bar} - P_r}{P_{bar}} = 0.947$$

3. Предварительно определяем количество циклонов (КЦ) в группе по данным таблицы:

КЦ :=

	1	2	3	4	5	6
1	"Диаметр"	"Расход газа"	"при числе"	"циклонов"	"в группе,"	"м <sup>3</sup> /ч"
2	циклона D, мм"	"один циклон"	"два циклона"	"четыре цикл."	"шесть цикл."	"восемь цикл."
3	400	"1450-1691"	".."	"5800-6764"	".."	".."
4	450	"1835-2141"	".."	"7340-8564"	".."	".."
5	500	"2270-2645"	"4540-5290"	"9080-10580"	"13620-15870"	".."
6	550	"2740-3200"	"5480-6400"	"10960-12800"	"16440-19200"	".."
7	600	"3262-3810"	"6524-7620"	"13048-15240"	"19572-22860"	".."
8	650	"3825-4460"	"7650-8920"	"15300-17840"	"22950-26760"	".."
9	700	"4400-5180"	"8800-10360"	"17600-20720"	"26400-31080"	".."
10	750	"5100-5950"	"10200-11900"	"20400-23800"	"30600-35700"	"40800-47600"
11	800	"5800-6760"	"11600-13500"	"23200-27040"	"34800-40560"	"46400-54080"

Отсюда при расходе  $V_{g\_Σ} \cdot 3600 = 20000$  м<sup>3</sup>/ч выбираем количество циклонов:

$n := 6$

4. Расход воздуха, приходящийся на 1 циклон, м<sup>3</sup>/с

$$V_g := \frac{V_{g\_Σ}}{n} = 0.926 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{или} \quad V_g \cdot 3600 = 3333 \text{ м}^3/\text{ч}$$

5. Диаметр одного циклона, м

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot V_g}{\pi \cdot W_{opt}}} = 0.58$$

Рисунок 15.16 – Протокол выполнения примера 1 "Расчет группового циклона"  
(продолжение)

6. Ближайший стандартный диаметр циклона, м

$$D_{st} := \frac{\text{round}(D \cdot 10, 0)}{10} = 0.600$$

7. Действительная скорость газа при стандартном диаметре циклона, м/с

$$W_g := \frac{4 \cdot V_g}{\pi \cdot D_{st}^2} = 3.27$$

8. Поправочный коэффициент (K1), учитывающий влияние диаметра циклона ЦН-15, определяется из таблицы K1\_D1:

$D_{K1} := \text{submatrix}(K1\_D, 2, \text{rows}(K1\_D), 1, 1)$  - диаметр циклона, мм

$K1\_K1 := \text{submatrix}(K1\_D, 2, \text{rows}(K1\_D), \text{Тип} + 1, \text{Тип} + 1)$  - коэффициент K1

$K1 := \text{linterp}(D_{K1} \cdot 0.001, K1\_K1, D_{st}) = 1$  - выбор K1 интерполяцией из табл. K1\_D1

9. Поправочный коэффициент (K2), учитывающий влияние запыленности газа, определяется из таблицы K2\_Z:

$Z_{K2} := \text{submatrix}(K2\_Z, 2, \text{rows}(K2\_Z), 1, 1)$  - запыленность, г/м3

$K2\_K2 := \text{submatrix}(K2\_Z, 2, \text{rows}(K2\_Z), \text{Тип} + 1, \text{Тип} + 1)$  - коэффициент K2

$K2 := \text{linterp}(Z_{K2} \cdot 0.001, K2\_K2, Z_{нач}) = 0.986$  - выбор K2 интерполяцией из табл. K2\_Z

10. Коэффициент сопротивления циклона, б/р

$$\xi := K1 \cdot K2 \cdot \xi_{500} + K3 = 148$$

11. Гидравлическое сопротивление циклона, Па

$$\Delta p := \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot W_g^2}{2} = 753$$

12. Массовое распределение пыли по размерам частиц, %

$M_i := 0 \quad i := 2.. \text{last}(\text{Доля}) \quad M_i := M_{i-1} + \text{Доля}_{i-1} \quad M^T = (0 \ 38 \ 58 \ 78 \ 88 \ 95)$

- массовая доля (%) частиц с размером меньше, чем  $\text{Размер}^T = (45 \ 33 \ 18 \ 14.5 \ 7.5 \ 4)$  мкм

13. Размер частиц пыли на входе в циклон, соответствующий 50% и 84,1% массы пыли, мкм

$D_{50} := \text{linterp}(M, \text{Размер}, 50) = 24$  - выбор  $D_{50}$  интерп. из массивов "M" и "Размер"

$D_{841} := \text{linterp}(M, \text{Размер}, 84.1) = 10.23$  - выбор  $D_{841}$  интерп. из массивов "M" и "Размер"

14. Степень полидисперсности частиц, б/р

$$\sigma_{disp} := \frac{D_{50}}{D_{841}} = 2.346$$

15. Параметр осаднения "X" по фракциям, б/р

$$X(\text{Размер}) := \frac{1}{\sigma_{ц}} \cdot \log \left( \frac{\text{Размер}}{d_{50ц} \cdot K \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{D_{st} \cdot \mu}{\rho_p \cdot W_g}}} \right)$$

$X(\text{Размер})^T = (2.387 \ 2.048 \ 1.387 \ 1.151 \ 0.431 \ -0.255)$

16. Степень очистки газа в циклоне по фракциям определяется кумулятивной функцией на основе нормального закона распределения:

$\eta(\text{Размер}) := \text{snorm}(X(\text{Размер})) \cdot 100.$

$\eta(\text{Размер})^T = (99.2 \ 98.0 \ 91.7 \ 87.5 \ 66.7 \ 39.9) \ %$

17. Параметр осаднения "X" для общей степени очистки циклона

$$X_{общ} := \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ц}^2 + \log(\sigma_{disp})^2}} \cdot \log \left( \frac{D_{50}}{d_{50ц} \cdot K \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{D_{st} \cdot \mu}{\rho_p \cdot W_g}}} \right) = 1.245$$

18. Общая степень очистки в одиночном циклоне, %

$\eta_{общ} := \text{snorm}(X_{общ}) \cdot 100. = 89.3$

19. Общая эффективность группового циклона, %

$\eta_{груп} := \eta_{общ} = 89.3$

20. Конечная запыленность очищенного воздуха

$$Z_{кон} := Z_{нач} \cdot \frac{100 - \eta_{груп}}{100} = 213.1 \times 10^{-6} \text{ кг/м}^3 \text{ или } Z_{кон} \cdot 10^3 = 0.21 \text{ г/м}^3$$

**Ответ:**  
 Число циклонов в группе при прямоугольной компоновке - 6. Диаметр каждого циклона  $D_{st} = 0.6$  м, гидравлическое сопротивление группы циклонов  $\Delta p = 753$  Па.  
 Степень очистки газа в групповом циклоне составляет  $\eta_{груп} = 89.3$  %. Концентрация пыли в газе после циклона,  $Z_{кон} \cdot 1000 = 0.21$  г/м3.  
 Степень очистки газа по фракциям  $[Размер]^T = (45 \ 33 \ 18 \ 14.5 \ 7.5 \ 4)$  мкм] составляет, соответственно,  $\eta(\text{Размер})^T = (99.2 \ 98.0 \ 91.7 \ 87.5 \ 66.7 \ 39.9) \ %$ .

Рисунок 15.1в – Протокол выполнения примера 1 "Расчет группового циклона" (окончание)

### Задача 15.3

Определить давление воздуха внутри циклона, если атмосферное давление составляет 101325 Па, а разрежение внутри циклона от действия дымососа 50 Па.

### Задача 15.4

Определить объемный расход воздуха проходящий через одиночный циклон группы из 6 циклонов, если общий расход воздуха составляет  $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

### Задача 15.5

Определить среднюю скорость воздуха в цилиндрической части циклона диаметром 0,5 м, если действительный объемный расход воздуха составляет  $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

### Задача 15.6

Определить гидравлическое сопротивление циклона, если коэффициент сопротивления равен 100, а динамическое давление воздушного потока на входе в циклон 25 Па.

### Задача 15.7

Определить концентрацию пыли на выходе из циклона, если степень очистки газа в циклоне 95 %, а начальная концентрация пыли  $50 \text{ г}/\text{м}^3$ .

## **15.4 Контрольные вопросы по практической работе**

1) Какие существуют виды компоновки циклонов в группы при параллельном соединении циклонов?

2) Как изменяется эффективность очистки газа от пыли при увеличении диаметра циклона?

3) Почему увеличивается гидравлическое сопротивление группового циклона по сравнению с одиночным циклоном?

4) Как изменяется гидравлическое сопротивление циклона при увеличении температуры газового потока, если расход газа при нормальных условиях остается неизменным?

5) Как изменяется эффективность работы циклона с увеличением числа циклонов в группе с соответствующим уменьшением диаметра циклона?

6) Как изменится пофракционная степень очистки пыли с увеличением размера частиц пыли?

7) Почему можно приравнять степень очистки одиночного циклона в группе и степень очистки группового циклона?

8) Как изменится степень очистки газа в групповом циклоне при параллельном соединении циклонов, если те же самые циклоны соединить последовательно?

## 16 Захват частиц пыли жидкостью<sup>16</sup>

### 16.1 Основные способы захвата частиц пыли жидкостью

Для улавливания пыли с использованием жидкости применяют два основных способа захвата частиц пыли:

- каплями жидкости;
- пленкой жидкости.

В соответствии со способом захвата мокрые пылеулавливающие аппараты можно разделить на две группы:

1) с промывкой газа жидкостью (форсуночные скрубберы, скрубберы Вентури, динамические газопромыватели и др.). Скруббер (англ. "scrubber", от англ. scrub – "скрести", "чистить") – аппараты для промывки жидкостями газов с целью их очистки;

2) с осаждением пыли на пленку жидкости (мокрые аппараты центробежного действия и ударно-инерционного действия, тарельчатые аппараты и др.).

#### 16.1.1 Захват частиц пыли каплями жидкости

При движении капли в пространстве, заполненном запыленным газом, осаждение пыли на ней происходит в основном вследствие кинематической коагуляции, т.е. вследствие захвата мелких частиц более крупными, движущимися с большей скоростью, и образовании конгломератов. Как показывают расчеты и подтверждает практика, захват частиц пыли плотностью  $\rho_{\text{ч}} = 2000 \text{ кг/м}^3$  распыленной водой возможен при размере частиц  $d_{\text{ч}} > 1 \text{ мкм}$ , что связано с трудностями распыления воды на капли достаточно малого диаметра.

Механизм захвата за счет инерции тем эффективнее, чем выше скорость потока и больше масса частицы пыли. При обтекании элемента очистной системы (фильтр, капля воды и т.п.) линии тока искривляются, а частица пыли, стремясь в силу инерции сохранить движение прямолинейным, смещается с линии тока и направляется к поверхности элемента, на котором и оседает.

Эффективность действия механизма осаждения определяется коэффициентом захвата. Физический смысл коэффициента захвата проще понять для одиночного элемента (фильтр, вода и т.п.), захватывающего частицы пыли: коэффициент захвата  $\eta_3$  определяется как отношение площади сечения  $F_{\text{п}}$  набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе, к площади проекции элемента  $F_1$  на плоскость, нормальную к направлению движения потока:

$$\eta_3 = \frac{F_{\text{п}}}{F_1}.$$

<sup>16</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [7]

В большинстве случаев, для конкретной геометрии очистной системы, коэффициенты захвата определяют по формулам, использующим как теоретические, так и экспериментальные данные. При определении коэффициентов захвата считают, что частица пыли, коснувшаяся элемента, удерживается на нем.

Если механизм осаждения частиц на капле можно рассматривать как чисто инерционный, то коэффициент захвата  $\eta_3$  определяется числом подобия Стокса  $St$ , которое можно трактовать, как безразмерная скорость запыленного потока вблизи водяного элемента (капли и т.п.):

$$St = \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot w_0 \cdot d_{\text{ч}}^2}{18 \cdot \mu \cdot d_{\text{к}}},$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $w_0$  – скорость потока, м/с;  $d_{\text{ч}}$  – диаметр частиц, м;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $d_{\text{к}}$  – диаметр препятствия (капли воды), м.

Например, коэффициент захвата за счет инерции для элемента в виде цилиндра (водяная нить) выражается формулой:

$$\eta_3 = \frac{St^3}{St^3 + 0,77 \cdot St^2 + 0,22}.$$

Количество захваченных частиц в единицу времени при инерционном механизме осаждения будет равно (с учетом  $F_{\text{п}} = \eta_3 \cdot F_1$  и  $F_1 = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4}$ )

$$N_t = F_{\text{п}} \cdot w_0 \cdot z_{\text{нач}} = \eta_3 \cdot F_1 \cdot w_0 \cdot z_{\text{нач}} = \eta_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \cdot w_0 \cdot z_{\text{нач}}, \left[ \frac{\text{кол. частиц}}{\text{с}} \right], \quad (16.1)$$

где  $F_{\text{п}}$  – площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе, м<sup>2</sup>;  $F_1$  – площадь проекции элемента на плоскость, нормальную к направлению движения потока, м<sup>2</sup>;  $\eta_3$  – коэффициент захвата;  $w_0$  – скорость потока, м/с;  $d_{\text{к}}$  – диаметр препятствия (капли воды), м;  $z_{\text{нач}}$  – количество частиц, содержащихся в единице объема газа (счетная концентрация), перед началом очистки, кол. частиц/м<sup>3</sup>.

Количество частиц, захваченных на единицу длины пути газового потока:

$$N_L = \frac{N_t}{w_0} = \eta_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \cdot z_{\text{нач}}, \left[ \frac{\text{кол. частиц}}{\text{м}} \right]. \quad (16.2)$$

Следовательно, количество частиц, захваченных 1 м<sup>3</sup> распыленной воды на том же участке пути, равно

$$N_V = \frac{N_L}{V_{\text{к}}} = \frac{\eta_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \cdot z_{\text{нач}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^3}{6}} = \frac{3}{2} \cdot \eta_3 \cdot \frac{z_{\text{нач}}}{d_{\text{к}}}, \left[ \frac{\text{кол. частиц}}{\text{м} \cdot \text{м}^3} \right]. \quad (16.3)$$

Здесь  $V_{\text{к}}$  – объем капли воды в виде шара, м<sup>3</sup>.

Как видно из формулы (16.3), эффективность улавливания при прочих равных условиях возрастает с уменьшением диаметра капли и может достичь высоких значений даже для мелких частиц.

### 16.1.2 Захват частиц пыли пленкой жидкости

При ударе частицы о твердую стенку возможны либо отскок частицы, либо прилипание к стенке за счет сил адгезии  $P_{ад}$ . В качестве примера действия сил адгезии – капли росы на лепестках розы.

Отскок частицы от твердой стенки (при отсутствии пленки воды) возникает, если кинетическая энергия отражающейся частицы больше энергии адгезии  $E_{ад}$ :

$$\frac{m \cdot w_{отс}^2}{2} > E_{ад}, \quad (16.4)$$

где  $m = \frac{\pi \cdot d_{ч}^3}{6} \cdot \rho_{ч}$  – масса сферической частицы диаметром  $d_{ч}$  и плотностью  $\rho_{ч}$ ;  $w_{отс}$  – скорость отскока частицы от поверхности в предположении отсутствия сил адгезии (приблизительно скорость отскока равна 0,8 от скорости при ударе:  $w_{отс} = 0,8 \cdot w_{удар}$ ).

Ориентировочно для сухой поверхности можно принять

$$P_{ад} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot d_{ч} \text{ и } E_{ад} = \int \overline{P_{ад}} dh, \quad (16.5)$$

где  $d_{ч}$  – диаметр частиц, м;  $h$  – зазор между поверхностью стенки и частицей, м.

В результате приближенного интегрирования выражения (16.5) можно найти граничное значение скорости удара, при котором еще возможно прилипание частиц ( $h = 1 \text{ мкм}$ ;  $\rho_{ч} = 3000 \text{ кг/м}^3$ ):

$$w_{удар} \leq \frac{2,490 \cdot 10^{-9}}{d_{ч}}, \text{ м/с}, \quad (16.6)$$

где  $d_{ч}$  – размер частицы, м.

При наличии на поверхности пленки жидкости условия прилипания существенно улучшаются (схема захвата дана на рис. 16.1а). В этом случае сила адгезии может быть определена по формуле

$$P_{ад} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч}}{1 + \text{tg}(\alpha/2)} \cdot \cos \varphi, \quad (16.7)$$

где  $\alpha$  – угол, определяющий смоченную часть поверхности частицы;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $d_{ч}$  – диаметр частицы;  $\varphi$  – краевой угол смачивания, зависящий от физико-химических свойств и дисперсности пыли (рис. 16.1б).

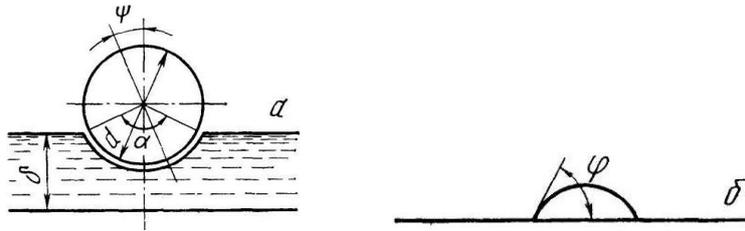


Рисунок 16.1 – Захват частиц пыли пленкой жидкости:  
а – схема захвата; б – краевой угол смачивания

Как видно из рисунка 16.1 при наличии пленки жидкости на твердой поверхности скорость отскока частиц резко уменьшается (она гасится водяной пленкой) и, соответственно, прилипание (захват) частиц улучшается.

Для хорошо смачиваемых материалов ( $\varphi \rightarrow 0$ ) при точечном контакте ( $\alpha \approx 0$ ) величина силы адгезии равна

$$P_{ад} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч}. \quad (16.8)$$

Для минеральных масел ( $\sigma \approx 25 \cdot 10^{-3}$  Н/м) при толщине пленки  $\delta = 0,5 \cdot d_{ч}$

$$P_{ад} = 0,157 \cdot d_{ч}, \text{ Н}, \quad (16.9)$$

где  $d_{ч}$  – размер частицы, м.

Сравнивая выражения (16.5) и (16.9), можно сделать вывод, что сила адгезии при поверхности, покрытой маслом, в 13000 раз больше, чем при сухой поверхности.

С теми же допущениями можно определить предельную скорость удара, м/с, обеспечивающую осаждение частиц:

$$w_{удар} \leq \frac{73,50 \cdot 10^{-6}}{d_{ч}}. \quad (16.10)$$

Таким образом, наличие водяной пленки позволяет увеличить максимальную скорость частиц возле твердой поверхности почти в 30000 раз (см. формулы 16.6 и 16.10).

При одинаковой скорости "w" смоченной поверхностью будут удерживаться значительно более крупные частицы, чем сухой поверхностью.

Вследствие того что смачиваемость материалов ухудшается с уменьшением размеров, в технике пылеулавливания часто приходится иметь дело с гидрофобными, т.е. плохосмачиваемыми частицами. Для улавливания таких частиц необходимо, чтобы их кинетическая энергия превышала работу погружения частицы в жидкость, т.е. работу преодоления сил поверхностного натяжения. Из этих условий получено, что предельная скорость удара частицы, обеспечивающая ее погружение в жидкость, равна

$$w_{удар} \leq \frac{1}{\cos \psi} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{\rho_{ч} \cdot d_{ч}}}, \quad (16.11)$$

где  $\psi$  – угол между направлением движения частицы и нормалью к поверхности жидкости в точке удара,  $\psi = 0-90^\circ$ ;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $d_{ч}$  – диаметр частицы;  $\rho_{ч}$  – плотность частицы.

При  $\psi = 0$ , т.е. при движении частицы по нормали к поверхности жидкости,

$$w_{\text{удар}} \leq \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}}}}. \quad (16.12)$$

При больших углах " $\psi$ " частицы рикошетируют от поверхности и улавливание возможно только при высоких скоростях удара. При малых скоростях потока газа частицы в момент удара погружаются в пленку жидкости не полностью и могут быть легко сорваны газовым потоком, так как поверхность жидкости после удара быстро выпрямляется, а удерживающие частицы силы адгезии (а в случае горизонтальной поверхности, то и силы тяжести) незначительны.

## 16.2 Примеры расчетов

### 16.2.1 Пример 1 – Расчет захвата частиц пыли каплями жидкости

#### Исходные данные:

Имеется воздушный пылевой поток, проходящий через водяной факел из мелких капель воды в форсуночном скруббере. Диаметр капель  $d_{\text{к}} = 90$  мкм, средний диаметр частиц пыли  $d_{\text{ч}} = 8$  мкм, плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>, скорость потока  $w_0 = 7$  м/с, динамическая вязкость воздуха  $\mu = 22 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

#### Задание:

Определить коэффициент захвата частиц пыли водяным факелом, построить график зависимости  $\eta_3 = f(d_{\text{к}})$  и определить пределы изменения коэффициента захвата в интервале от  $d_{\text{к}} = 1$  мкм до  $d_{\text{к}} = 2000$  мкм = 2 мм.

#### Решение:

1. Число Стокса

$$St = \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot w_0 \cdot d_{\text{ч}}^2}{18 \cdot \mu \cdot d_{\text{к}}} = \frac{2500 \cdot 7 \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{18 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 90 \cdot 10^{-6}} = 31,4.$$

2. Коэффициент захвата частиц пыли водяным элементом в виде цилиндра диаметром  $d_{\text{к}}$

$$\eta_3 = \frac{St^3}{St^3 + 0,77 \cdot St^2 + 0,22} = \frac{31,4^3}{31,4^3 + 0,77 \cdot 31,4^2 + 0,22}.$$

3. Для построения графика зависимости  $\eta_3 = f(d_{\text{к}})$  проводятся аналогичные вычисления в диапазоне  $d_{\text{к}} = 1-2000$  мкм.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 16.2.

**Дано:**

$d_{\text{капли}} := 90$  - диаметр водяного элемента (капли воды), мкм

$d_{\text{ч}} := 8 \cdot 10^{-6}$  - диаметр частиц пыли, м

$\rho_{\text{ч}} := 2500$  - плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>

$w_0 := 7$  - скорость воздушного потока, м/с

$\mu := 22 \cdot 10^{-6}$  - динамическая вязкость воздуха, Па·с

**Решение:**

1. Функция числа Стокса от диаметра водяного элемента

$$St(d_{\text{к}}) := \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot w_0 \cdot d_{\text{ч}}^2}{18 \cdot \mu \cdot d_{\text{к}}}$$

Например, при  $d_{\text{капли}} = 90$  мкм  $St(d_{\text{капли}} \cdot 10^{-6}) = 31.4$

2. Функция коэффициента захвата частиц пыли водяным элементом в виде цилиндра диаметром  $d_{\text{капли}}$

$$\eta_{\text{з}}(d_{\text{к}}) := \frac{St(d_{\text{к}})^3}{St(d_{\text{к}})^3 + 0.77 \cdot St(d_{\text{к}})^2 + 0.22}$$

Например, при  $d_{\text{капли}} = 90$  мкм  $\eta_{\text{з}}(d_{\text{капли}} \cdot 10^{-6}) = 0.98$

3. График зависимости коэффициента захвата от диаметра водяного элемента

$d_{\text{нач}} := 1$  - минимальный диаметр капли, мкм

$d_{\text{кон}} := 2000$  - максимальный диаметр капли, мкм

$N := 100$  - число точек на графике

$\Delta d := \frac{d_{\text{кон}} - d_{\text{нач}}}{N - 1}$  - шаг между точками, мкм

$d := d_{\text{нач}}, d_{\text{нач}} + \Delta d, \dots, d_{\text{кон}}$

**Ответ:**

1. Коэффициент захвата частиц пыли водяным элементом диаметром  $d_{\text{капли}} = 90$  мкм составляет  $\eta_{\text{з}}(d_{\text{капли}} \cdot 10^{-6}) = 0.98$

2. С увеличением диаметра капель воды от  $d_{\text{нач}} = 1$  мкм до  $d_{\text{кон}} = 2000$  мкм коэффициент захвата частиц пыли водяным элементом уменьшается с 1 до  $\eta_{\text{з}}(d_{\text{кон}} \cdot 10^{-6}) = 0.62$

Рисунок 16.2 – Протокол выполнения примера 1 "Расчет захвата частиц пыли каплями жидкости"

Ответ:

- а) Коэффициент захвата частиц пыли водяным факелом составляет 0,976;
- б) С увеличением диаметра капли от 1 мкм до 2000 мкм коэффициент захвата пыли водяным элементом уменьшается с 1 до 0,616.

### 16.2.2 Пример 2 – Расчет захвата частиц пыли пленкой жидкости

Исходные данные:

Имеется воздушный пылевой поток, набегающий на поверхность, покрытую водой в ударно-инерционном пылеуловителе. Средний диаметр частиц хорошо смачиваемой пыли  $d_{\text{ч}} = 8$  мкм, плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma \approx 73 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

Задание:

Определить силу адгезии (силу прилипания) и максимальную скорость удара потока, при которой еще возможно прилипание частиц. Результат

сравнить с силой адгезии и максимальной скоростью удара потока в случае отсутствия воды в аппарате с образованием сухой поверхности.

Решение:

1. Сила адгезии при хорошо смачиваемой поверхности

$$P_{\text{ад}} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{\text{ч}} = 2 \cdot \pi \cdot 73 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

2. Сила адгезии на сухой поверхности

$$P_{\text{ад}}^{\text{сух}} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot d_{\text{ч}} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 96 \cdot 10^{-12} \text{ Н.}$$

3. Отношение силы адгезии на водяной и сухой поверхностях

$$\frac{P_{\text{ад}}}{P_{\text{ад}}^{\text{сух}}} = \frac{3,7 \cdot 10^{-6}}{96 \cdot 10^{-12}} = 38223.$$

4. Максимальная скорость удара запыленного потока на поверхности, покрытой водой, при которой еще возможно прилипание частиц пыли

$$w_{\text{удар}} = \frac{73,50 \cdot 10^{-6}}{d_{\text{ч}}} = \frac{73,50 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-6}} = 9,2 \text{ м/с.}$$

5. Максимальная скорость удара запыленного потока на сухой поверхности, при которой еще возможно прилипание частиц пыли

$$w_{\text{удар}}^{\text{сух}} = \frac{2,49 \cdot 10^{-9}}{d_{\text{ч}}} = \frac{2,49 \cdot 10^{-9}}{8 \cdot 10^{-6}} = 0,00031 \text{ м/с.}$$

6. Отношение скорости удара на водяной и сухой поверхностях

$$\frac{w_{\text{удар}}}{w_{\text{удар}}^{\text{сух}}} = \frac{9,2}{0,00031} = 29518.$$

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 16.4.

Ответ:

1) Сила адгезии (сила прилипания) частиц пыли на водяной поверхности составляет 3,7 мкН. Эта сила в 38223 раза выше силы адгезии на сухой поверхности.

2) Максимальная скорость удара запыленного потока на поверхности, покрытой водой составляет 9,2 м/с. Эта скорость в 29518 раз выше допустимой скорости потока на сухой поверхности.

### 16.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 16.1

Определить число Стокса при набегании потока запыленного воздуха со скоростью 5 м/с на водяной элемент (капли воды) диаметром 55 мкм. Диаметр частиц пыли 9 мкм, плотность частиц 2500 кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость потока 22 · 10<sup>-6</sup> Па·с.

#### Задача 16.2

Определить площадь сечения капли воды, если диаметр капли 8 мкм.

**Дано:**

$d_{ч} = 8 \cdot 10^{-6}$  - диаметр частиц пыли, м  
 $\rho_{ч} = 2500$  - плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>  
 $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$  - коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м

**Решение:**

1. Сила адгезии (сила прилипания) при хорошо смачиваемой поверхности, Н  
 $P_{\text{adg}} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч} = 3.7 \times 10^{-6}$

2. Сила адгезии (сила прилипания) на сухой поверхности, Н  
 $P_{\text{adg\_suh}} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot d_{ч} = 96 \times 10^{-12}$

3. Отношение силы адгезии на водяной и сухой поверхностях  
 $\Delta PP = \frac{P_{\text{adg}}}{P_{\text{adg\_suh}}} = 38223$

4. Максимальная скорость удара запыленного потока на поверхности, покрытой водяной пленкой, при которой еще возможно прилипание частиц пыли, м/с  
 $w_{\text{удар}} = \frac{73.5 \cdot 10^{-6}}{d_{ч}} = 9.2$

5. Максимальная скорость удара запыленного потока на сухой поверхности, при которой еще возможно прилипание частиц пыли, м/с  
 $w_{\text{удар\_suh}} = \frac{2.49 \cdot 10^{-9}}{d_{ч}} = 0.00031$

6. Отношение скорости удара потока на водяной и сухой поверхностях  
 $\Delta ww = \frac{w_{\text{удар}}}{w_{\text{удар\_suh}}} = 29518$

**Ответ:**

1. Сила адгезии (сила прилипания) частиц пыли на водяной поверхности составляет  $P_{\text{adg}} = 3.7 \times 10^{-6}$  Н. Она в  $\Delta PP = 38223$  раз выше силы адгезии на сухой поверхности

2. Максимальная скорость удара запыленного потока на поверхности, покрытой водяной пленкой, при которой еще возможно прилипание частиц пыли, составляет  $w_{\text{удар}} = 9.2$  м/с. Она в  $\Delta ww = 29518$  раз выше допустимой скорости удара на сухой поверхности.

Рисунок 16.4 – Протокол выполнения примера 2 "Расчет захвата частиц пыли пленкой жидкости"

### Задача 16.3

Определить объем капли воды в виде шара, если диаметр капли 8 мкм.

### Задача 16.4

Определить коэффициент захвата пыли водяным элементом в виде шара, если площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе равна 45 мкм<sup>2</sup>, а площадь сечения шара составляет 50 мкм<sup>2</sup>.

### Задача 16.5

Определить площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы пыли полностью осаждаются на водяном элементе в виде шара, если площадь сечения шара составляет 50 мкм<sup>2</sup>, а коэффициент захвата пыли равен 0,95.

### Задача 16.6

Определить количество захваченных частиц в единицу времени при инерционном механизме осаждения, если площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на водяном элементе равна 45 мкм<sup>2</sup>, скорость потока 7 м/с, а количество частиц перед началом очистки равно 100 миллионов частиц/м<sup>3</sup>.

#### Задача 16.7

Определить массу сферической частицы диаметром 12 мкм и плотностью 2500 кг/м<sup>3</sup>.

#### Задача 16.8

Построить график зависимости силы адгезии (силы прилипания) на водяной поверхности от угла, определяющего смоченную часть поверхности частицы. Этот угол изменяется от 0 до 180 градусов. Краевой угол смачивания принять равным 45 градусов. Средний диаметр частиц пыли  $d_{\text{ч}} = 8$  мкм, коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma \approx 73 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

#### Задача 16.9

Построить график зависимости силы адгезии (силы прилипания) на водяной поверхности от краевого угла смачивания. Этот угол изменяется от 0 до 90 градусов. Угол, определяющий смоченную часть поверхности частицы равен 45 градусов. Средний диаметр частиц пыли  $d_{\text{ч}} = 8$  мкм, коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma \approx 73 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

#### Задача 16.10

Определить скорость удара гидрофобной (плохосмачиваемой) частицы воздушного потока по нормали к поверхности воды, обеспечивающая погружение частицы в водяную пленку. Средний диаметр частиц пыли  $d_{\text{ч}} = 8$  мкм, плотность частиц 2500 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma \approx 73 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

### 16.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Перечислите известные способы захвата частиц пыли с использованием жидкости?
- 2) Перечислите известные группы мокрых пылеулавливающих аппаратов?
- 3) Как называется механизм захвата частиц пыли каплями воды?
- 4) Как изменяется эффективность осаждения пыли с повышением скорости запыленного потока вблизи капли воды?
- 5) Как изменяется эффективность осаждения пыли с увеличением размера частиц пыли запыленного потока вблизи капли воды?
- 6) От какого числа подобия зависит коэффициент захвата пыли на водяном элементе (капле)?
- 7) За счёт каких сил возможно прилипание частиц пыли на твердой поверхности?
- 8) Сможет ли частица пыли прилипнуть к твердой поверхности, если кинетическая энергия отскока больше энергии адгезии?
- 9) По какой причине улучшаются условия прилипания частиц пыли на твердой поверхности при наличии пленки жидкости?
- 10) Как изменится эффективность захвата частиц пыли слоем жидкости на твердой поверхности при увеличении скорости удара (и, соответственно, скорости отскока) запыленного потока?

## 17 Тепло- и массообмен в мокрых пылеуловителях<sup>17</sup>

### 17.1 Общие сведения о процессах тепло- и массообмена в мокрых пылеуловителях

Мокрые пылеуловители представляют собой аппараты контактного типа, в которых газ и жидкость непосредственно соприкасаются друг с другом. Вследствие того что температуры газа и жидкости, а также парциальные давления пара в газе " $p_{\text{г}}$ " и над жидкостью " $p_{\text{ж}}$ " в мокрых пылеуловителях, как правило, не одинаковы, одновременно с пылеулавливанием идут тепло- и массообменные процессы.

Основным расчетным уравнением для определения количества теплоты  $Q_1$ , передаваемого прямым теплообменом (конвекцией, излучением и теплопроводностью), является общеизвестное уравнение теплопередачи:

$$\pm Q_1 = K_{\text{т}} \cdot F \cdot \Delta T + Q_{\text{пот}}, \text{ Вт} \quad (17.1)$$

где  $K_{\text{т}}$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхность, через которую происходит теплообмен, м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  – средняя разность температур между газом и жидкостью, К;  $Q_{\text{пот}}$  – потеря теплоты в окружающую среду.

Уравнение массообмена имеет вид

$$\pm \Delta M = \beta_{\text{м}} \cdot F \cdot (p_{\text{г}} - p_{\text{ж}}), \text{ кг/с}, \quad (17.2)$$

где  $\beta_{\text{м}}$  – коэффициент массообмена, с/м.

Процессы массообмена сопровождаются выделением (при конденсации) или поглощением (при испарении) теплоты  $Q_2$ :

$$\pm Q_2 = r \cdot \Delta M = r \cdot \beta_{\text{м}} \cdot F \cdot (p_{\text{г}} - p_{\text{ж}}), \text{ Вт}, \quad (17.3)$$

где  $r = 2260$  кДж/кг – удельная теплота парообразования.

В приведенных уравнениях (17.1) и (17.2) знак "плюс" ставится в случаях перехода теплоты и массы от газа к жидкости ( $T_{\text{г}} > T_{\text{ж}}$  и  $p_{\text{г}} > p_{\text{ж}}$ ), а знак "минус" в случаях перехода теплоты и массы от жидкости к газу ( $T_{\text{г}} < T_{\text{ж}}$  и  $p_{\text{г}} < p_{\text{ж}}$ ). Так как отходящие газы металлургических агрегатов, подлежащие очистке, как правило, имеют высокие температуры, то в мокрых пылеуловителях обычно протекают процессы охлаждения газа. Эти процессы могут проходить как с испарением воды, так и с конденсацией водяных паров, содержащихся в газе. В первом случае охлаждение называют испарительным, во втором – конденсационным.

Конденсационное охлаждение происходит, если горячий газ, насыщенный водяными парами, встречается с холодной водой ( $T_{\text{г}} > T_{\text{ж}}$ ,  $p_{\text{г}} > p_{\text{ж}}$ ). При этом конденсируется часть водяного пара в газе, в результате чего газ

---

<sup>17</sup> Практическая работа подготовлена на основе материалов [7]

подсушивается. Вода при этом нагревается, получая, теплоту в количестве " $Q_1 + Q_2$ ".

Испарительное охлаждение происходит при взаимодействии горячего не насыщенного влагой газа с подогретой водой ( $T_r \gg T_{ж}$ ,  $p_r < p_{ж}$ ). При охлаждении газа одновременно увеличивается его влагосодержание за счет испаряющейся воды, т.е. количество теплоты, передаваемое от газа к воде, составляет " $Q_1 - Q_2$ ". По мере нагревания воды возрастает давление пара над ней  $p_{ж}$  и уменьшается разность температур " $T_r - T_{ж}$ ". При этом  $Q_1$  снижается, а  $Q_2$  возрастает до тех пор, пока они не станут равными. После этого вода, достигнув так называемой температуры мокрого термометра  $T_m$ , перестает нагреваться и будет только испаряться при постоянной температуре, а вся теплота, передаваемая газом воде, будет возвращаться к нему с образовавшимся паром, подмешивающимся к газу, т.е. процесс охлаждения пойдет при постоянной энтальпии газа.

## 17.2 Примеры расчетов

### 17.2.1 Пример 1 – Расчет передачи теплоты между запыленным газом и водой при конденсационном охлаждении

#### Исходные данные:

Имеется воздушный пылевой поток непосредственно соприкасающийся с пленкой воды площадью  $F = 2,5 \text{ м}^2$  в мокром пылеуловителе. Коэффициент теплопередачи от газа к воде  $K_T = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , средняя температура газа  $t_r = 240 \text{ }^\circ\text{С}$ , средняя температура воды  $t_{\text{вода}} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ . Потери теплоты в окружающую среду равны нулю. В результате массообмена часть водяных паров газа в количестве  $\Delta M = 0,0027 \text{ кг/с}$  конденсируется и переходит в воду.

#### Задание:

Определить количество теплоты, получаемое водой в мокром пылеуловителе.

#### Решение:

1. Перепад температуры между газом и водой

$$\Delta T = t_r - t_{\text{вода}} = 240 - 20 = 220 \text{ }^\circ\text{С}.$$

2. Количество теплоты при теплопередаче

$$Q_1 = K_T \cdot F \cdot \Delta T + Q_{\text{пот}} = 35 \cdot 2,5 \cdot 220 + 0 = 19250 \text{ Вт}.$$

3. Выделение теплоты при конденсации водяных паров

$$Q_2 = r \cdot \Delta M = 2260 \cdot 10^3 \cdot 0,0027 = 6102 \text{ Вт}.$$

4. Количество теплоты, получаемое водой в мокром пылеуловителе

$$Q = Q_1 + Q_2 = 19250 + 6102 = 25352 \approx 25,3 \text{ кВт}.$$

#### Ответ:

Количество теплоты, передаваемое от газа к воде в мокром пылеуловителе составляет 25,3 кВт.

Протокол расчета приведен на рисунке 17.1.

<b>Дано:</b>	
$F := 2.5$	- площадь водяной поверхности, м <sup>2</sup>
$K_{\tau} := 35.$	- коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
$t_g := 240.$	- температура газа, град. С
$t_{вода} := 20.$	- температура воды, град. С
$Q_{пот} := 0.$	- потери теплоты в окружающую среду, Вт
$\Delta M := 0.0027$	- массовый расход сконденсировавшихся водяных паров, кг/с
$r := 2260 \cdot 10^3$	- удельная теплота конденсации водяных паров, Дж/кг
<b>Решение:</b>	
1. Перепад температур между газом и водой, град. С	
$\Delta T := t_g - t_{вода} = 220$	
2. Количество теплоты при теплопередаче, Вт	
$Q_1 := K_{\tau} \cdot F \cdot \Delta T = 19250$	
3. Выделение теплоты при конденсации водяных паров, Вт	
$Q_2 := r \cdot \Delta M = 6102$	
4. Общее количество теплоты, получаемое водой в мокром пылеуловителе, Вт	
$Q := Q_1 + Q_2 = 25352$	
<b>Ответ:</b>	
Количество теплоты, передаваемое от газа к воде в мокром пылеуловителе составляет	
$Q = 25352$ Вт	

Рисунок 17.1 – Протокол выполнения примера 1 "Расчет передачи теплоты между запыленным газом и водой при конденсационном охлаждении"

### 17.3 Задания для самостоятельной работы

#### Задача 17.1

Определить количество теплоты, передаваемое прямым теплообменом в мокром пылеуловителе от газа к воде, если площадь воды 3,5 м<sup>2</sup>, коэффициент теплопередачи от газа к воде 28 Вт/(м<sup>2</sup>·К), средняя разность температур между газом и жидкостью 160 °С. Потери теплоты в окружающую среду равны нулю.

#### Задача 17.2

Определить количество теплоты, передаваемое в мокром пылеуловителе от газа к воде при конденсации части водяных паров газа в количестве 0,0033 кг/с.

#### Задача 17.3

Определить количество теплоты, получаемое водой в мокром пылеуловителе, если в процессе прямого теплообмена в воду перешла тепловая мощность 25 кВт, а в результате конденсации водяных паров – тепловая мощность 5 кВт.

### 17.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Каким образом происходит контакт газа и жидкости в мокрых пылеуловителях?
- 2) Соприкасаются ли между собой запыленный газ и вода в пылеулавливающих аппаратах контактного типа?
- 3) Как изменится количество переданной теплоты от газа к воде в мокрых пылеуловителях при увеличении перепада температур между газом и водой?
- 4) Как изменится количество конденсата водяного пара в мокрых пылеуловителях при увеличении перепада температур между газом и водой?

5) Как изменится количество переданной теплоты от газа к воде при увеличении разности парциального давления пара в газе и над жидкостью в мокрых пылеуловителях?

6) Как изменится количество конденсата водяного пара при увеличении разности парциального давления пара в газе и над жидкостью в мокрых пылеуловителях?

7) Какую размерность имеет коэффициент теплопередачи?

8) Какие виды прямого теплообмена возможны при контакте газа с жидкостью в мокрых пылеуловителях?

9) Откуда и куда передается теплота конденсации водяных паров в мокрых пылеуловителях?

10) Откуда и куда передается теплота испарения воды в мокрых пылеуловителях?

11) Как называется температура в мокрых пылеуловителях, при которой вода перестает нагреваться от горячего газа и будет только испаряться, а вся теплота, передаваемая газом воде, будет возвращаться к газу в виде пара?

## Литература

1. Бровкин В.Л. Методические указания к выполнению лабораторного практикума "Решение теплотехнических и математических задач с помощью пакета MathCAD" для студентов специальностей: 6.090510, 6.090511, 6.090406 / В.Л. Бровкин, В.А. Вехник. – Днепропетровск: НМетАУ, 2001. – 71 с.
2. Вышегородцева Г.И. Практикум по основам надежности технических систем. Методические указания к выполнению практических работ и самостоятельной работы для студентов факультета инженерной механики / Вышегородцева Г.И., Агеева В.Н. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2018 – 65 с.
3. Острейковский В.А. Теория надежности: Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. / Острейковский В.А. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
4. Иванов І.І. Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни "Основи конструювання екологічного обладнання" для студентів спеціальності 101 – екологія (бакалаврський рівень) / Укл.: І.І. Иванов, О.М. Прокопенко. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 41 с.
5. Топтуненко Е.Т. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Учебн. пос. / Топтуненко Е.Т. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1968. – 276 с.
6. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии: Учебник для техникумов; изд. 2-е, перераб. и доп. / Юдашкин М.Я. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
7. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учебник для вузов; изд. 2-е, перераб. и доп. / Старк С.Б. – М.: Металлургия, 1990. – 400 с.

Навчальне видання

Бровкін Володимир Леонідович

Основи конструювання екологічного обладнання

Навчальний посібник

Тем. план 2021, поз. 258

Підписано до друку 24.09 .2021. Формат 60×84 1/16. Папір друк. Друк плоский.  
Облік. вид. арк. 8,0. Умов. друк. арк. 7,91. Замовлення №128.

Національна металургійна академія України  
49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно – видавничий відділ НМетАУ