

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

В.Л. Бровкін

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИКЛАДНОГО
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ
ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ІЗ ЗАХИСТУ
ДОВКІЛЛЯ

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

Дніпро НМетАУ 2021

Бровкін В.Л. Застосування прикладного програмного забезпечення для вирішення завдань із захисту довкілля: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 129 с. (російською мовою)

У навчальному посібнику представлені матеріали практичних занять для допомоги студенту бакалаврату в вивченні навчальної дисципліни "Застосування прикладного програмного забезпечення для вирішення завдань із захисту довкілля". Навчальна дисципліна є нормативною і входить до циклу дисциплін вільного вибору студента.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та придбання навичок з питань комп'ютерного моделювання процесів властивих газоочисному устаткуванню.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен вміти виконати основні розрахунки процесів руху запилених газів, процесів тепломасообміну в запилених середовищах, теплових процесів в теплообмінних пристроях, гравітаційних процесів осадження пилу в інерційних пиловловлювачах та процесів осадження пилу в мокрих пиловловлювачах.

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

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища.

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.

Содержание

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 Конструкции и элементы газоходов. Тепловые расчеты	22
3.1 Конструкции и элементы газоходов.....	22
3.2 Общие сведения о тепловых расчетах газоходов.....	22
3.3 Примеры расчетов.....	24
3.3.1 Пример 1 – Определение температурного удлинения газохода	24
3.3.2 Пример 2 – Определение плотности газа	25
3.3.3 Пример 3 – Перевод параметров в другую шкалу измерения.....	26
3.3.4 Пример 4 – Давление столба газа (жидкости)	26
3.4 Задания для самостоятельной работы	27
3.5 Контрольные вопросы по практической работе.....	28
4 Основы аэродинамического расчета газоотводного тракта. Гидравлические расчеты	29
4.1 Основы аэродинамического расчета газоотводящего тракта	29
4.2 Примеры расчетов.....	30
4.2.1 Пример 1 – Потери давления на местном сопротивлении	30
4.2.2 Пример 2 – Коэффициент местного сопротивления	30
4.2.3 Пример 3 – Избыточное геометрическое давление.....	31
4.2.4 Пример 4 – Потери давления на трение	32
4.3 Задания для самостоятельной работы	33
4.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	34
5 Выбор дымососов и вентиляторов. Тепловые и гидравлические расчеты.....	35
5.1 Основы выбора дымососов и вентиляторов	35
5.2 Примеры расчетов.....	36
5.2.1 Пример 1 – Производительность вентилятора	36
5.2.2 Пример 2 – Давление вентилятора.....	37
5.2.3 Пример 3 – Мощность вентилятора.....	37
5.2.4 Пример 4 – Мощность вентилятора.....	38
5.3 Задания для самостоятельной работы	39
5.4 Контрольные вопросы по практической работе.....	40
6 Дымовые трубы. Тепловые и гидравлические расчеты	41
6.1 Основные сведения о дымовых трубах.....	41
6.2 Основы расчета дымовых труб	41
6.3 Примеры расчетов.....	42

6.3.1	Пример 1 – Потери давления от печи до выхлопа дымовой трубы.....	42
6.3.2	Пример 2 – Высота дымовой трубы	42
6.3.3	Пример 3 – Диаметр дымовой трубы	43
6.4	Задания для самостоятельной работы	44
6.5	Контрольные вопросы по практической работе.....	45
7	Охлаждение газа атмосферным воздухом. Тепловые расчеты	46
7.1	Основы расчетов охлаждения газа атмосферным воздухом.....	46
7.2	Примеры расчетов.....	47
7.2.1	Пример 1 – Энтальпия газа.....	47
7.2.2	Пример 2 – Температура смеси газов	48
7.3	Задания для самостоятельной работы	49
7.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	49
8	Охлаждение газа в поверхностных холодильниках. Тепловые расчеты.....	50
8.1	Основы расчетов охлаждения газа в поверхностных холодильниках	50
8.2	Примеры расчетов.....	51
8.2.1	Пример 1 – Охлаждение газа в поверхностном холодильнике.....	51
8.2.2	Пример 2 – Площадь поверхности холодильника.....	52
8.2.3	Пример 3 – Средняя разность температур газа и охлаждающей среды в поверхностном холодильнике.....	52
8.3	Задания для самостоятельной работы	53
8.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	54
9	Охлаждение газа при непосредственном контакте его с водой	55
9.1	Основы расчетов охлаждения газа при непосредственном контакте с водой	55
9.2	Примеры расчетов.....	56
9.2.1	Пример 1 – Теплота, поглощаемая водой при отсутствии испарения	56
9.2.2	Пример 2 – Теплота, поглощаемая водой при полном испарении воды.....	57
9.2.3	Пример 3 – Теплота, поглощаемая водой при частичном испарении воды	58
9.3	Задания для самостоятельной работы	59
9.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	59
10	Возвращение теплоты в технологический процесс. Тепловые расчеты	61
10.1	Основы расчетов по утилизации теплоты уходящих газов металлургических печей .	61
10.1.1	Тепловой баланс печи непрерывного действия.....	62
10.2	Примеры расчетов.....	63
10.2.1	Пример 1 – Физическая теплота дымовых газов.....	63
10.2.2	Пример 2 – Физическая теплота воздуха	64
10.2.3	Пример 3 – Теплота, усвоенная материалом	65
10.3	Задания для самостоятельной работы	65
10.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	66
11	Движение частицы пыли в неподвижной среде. Гидравлические расчеты	67
11.1	Основы расчетов движения частичек пыли в неподвижной среде	67
11.2	Примеры расчетов.....	69
11.2.1	Пример 1 – Аэродинамический коэффициент.....	69
11.2.2	Пример 2 – Скорость витания	70
11.3	Задания для самостоятельной работы	70
11.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	72
12	Осаждение частиц пыли в камерах и газоходах. Гидравлические расчеты.....	73
12.1	Основы расчетов осаждения частиц пыли в камерах и газоходах	73
12.2	Примеры расчетов.....	75
12.2.1	Пример 1 – Динамическая вязкость газа.....	75
12.2.2	Пример 2 – Расчет шлаковика мартеновской печи	77
12.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	79
13	Расчет улавливания пыли в циклонах.....	80

13.1	Основы расчетов процессов в центробежном пылеуловителе	80
13.2	Примеры расчетов	84
13.2.1	Пример 1 – Расчет циклона	84
13.3	Задания для самостоятельной работы	84
13.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	86
14	Определение гидравлического сопротивления и размеров циклона. Гидравлические расчеты	88
14.1	Основы расчетов процессов в групповом центробежном пылеуловителе.....	88
14.2	Примеры расчетов	90
14.2.1	Пример 1 – Расчет группового циклона	90
14.3	Задания для самостоятельной работы	90
14.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	94
15	Захват частиц пыли жидкостью.....	95
15.1	Основные способы захвата частиц пыли жидкостью	95
15.1.1	Захват частиц пыли каплями жидкости.....	95
15.1.2	Захват частиц пыли пленкой жидкости.....	97
15.2	Примеры расчетов	99
15.2.1	Пример 1 – Расчет захвата частиц пыли каплями жидкости.....	99
15.2.2	Пример 2 – Расчет захвата частиц пыли пленкой жидкости.....	100
15.3	Задания для самостоятельной работы	101
15.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	103
16	Тепло- и массообмен в мокрых пылеуловителях	104
16.1	Общие сведения о процессах тепло- и массообмена в мокрых пылеуловителях.....	104
16.2	Примеры расчетов	105
16.2.1	Пример 1 – Расчет передачи теплоты между запыленным газом и водой при конденсационном охлаждении	105
16.3	Задания для самостоятельной работы	106
16.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	106
17	Процессы тепло- и массообмена в скруббере	108
17.1	Общие сведения о расчетах аппаратов с промывкой газа жидкостью	108
17.1.1	Форсуночные скрубберы	108
17.2	Примеры расчетов	114
17.2.1	Пример 1 – Расчет полого форсуночного скруббера	114
17.3	Задания для самостоятельной работы	117
17.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	120
18	Теплообмен в трубе Вентури.....	121
18.1	Скрубберы Вентури. Устройство и работа.....	121
18.2	Примеры расчетов	125
18.2.1	Пример 1 – Расчет скоростного газопромывателя (скруббера Вентури).....	125
18.3	Задания для самостоятельной работы	129
18.4	Контрольные вопросы по практической работе.....	130
	Литература.....	131

1 Простейшие вычисления и операции. Графики функций, текстовые блоки и массивы в среде MathCAD¹

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.

Если какая-либо позиция главного меню делается активной, она выводит

¹ Практическая работа подготовлена на основе материалов [1]

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 функций, 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 слеша "\", 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).

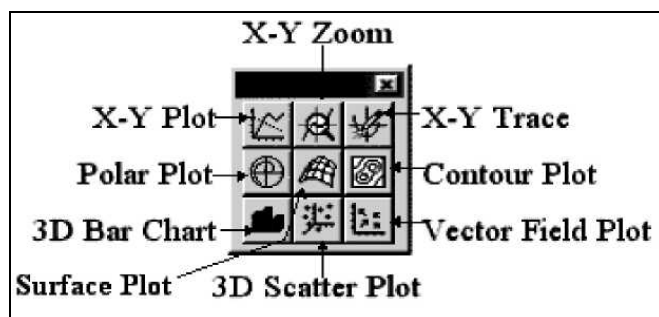


Рисунок 1.2 – Палитра графиков:

- | | |
|---------------------|---|
| "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 двухмерными 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 двухмерными 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 "x₀", а затем через запятую значение "x₀ + 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.

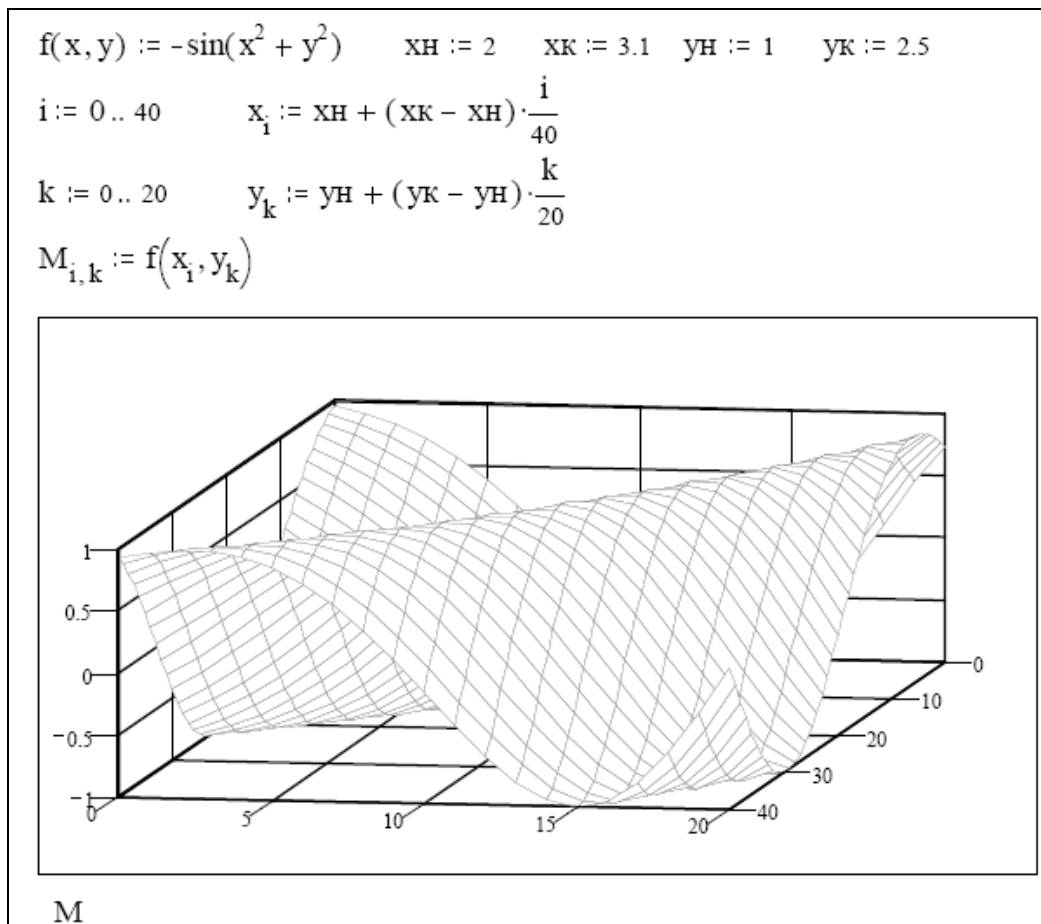


Рисунок 1.3 – График поверхности

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(x²<клавиша Space>+y²)".
- 2) Задать пределы изменения аргументов – "xн:2<клавиша Enter>xк:3.1<клавиша Enter>ун:1<клавиша Enter>ук: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, Δx , то число узлов равно

$$i = \frac{x_k - x_n}{\Delta x} + 1.$$

- 4) Сформировать вектор первого аргумента – "x[i:xн+(xк-xн)·i/40".
- 5) Задать нумерацию узлов сетки поверхности по второму аргументу – "k:0;20".
- 6) Сформировать вектор второго аргумента – "y[k:ун+(ук-ун)·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	$f(x, y) = \text{tg}(x \cdot y)$	$x \in [-1; 1]$ $y \in [-2; 2]$	$\Delta x = 0,1$ $\Delta y = 0,2$	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 MathCAD²

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.

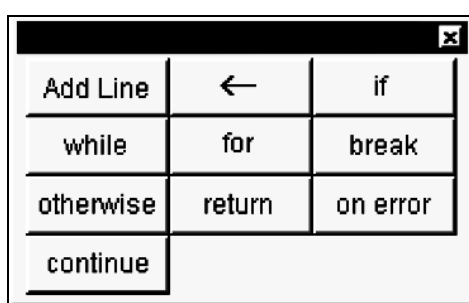


Рисунок 2.1 – Панель программных элементов

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.

² 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 if $x > 0$	возвращает 1, если $x > 0$
	-1 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.

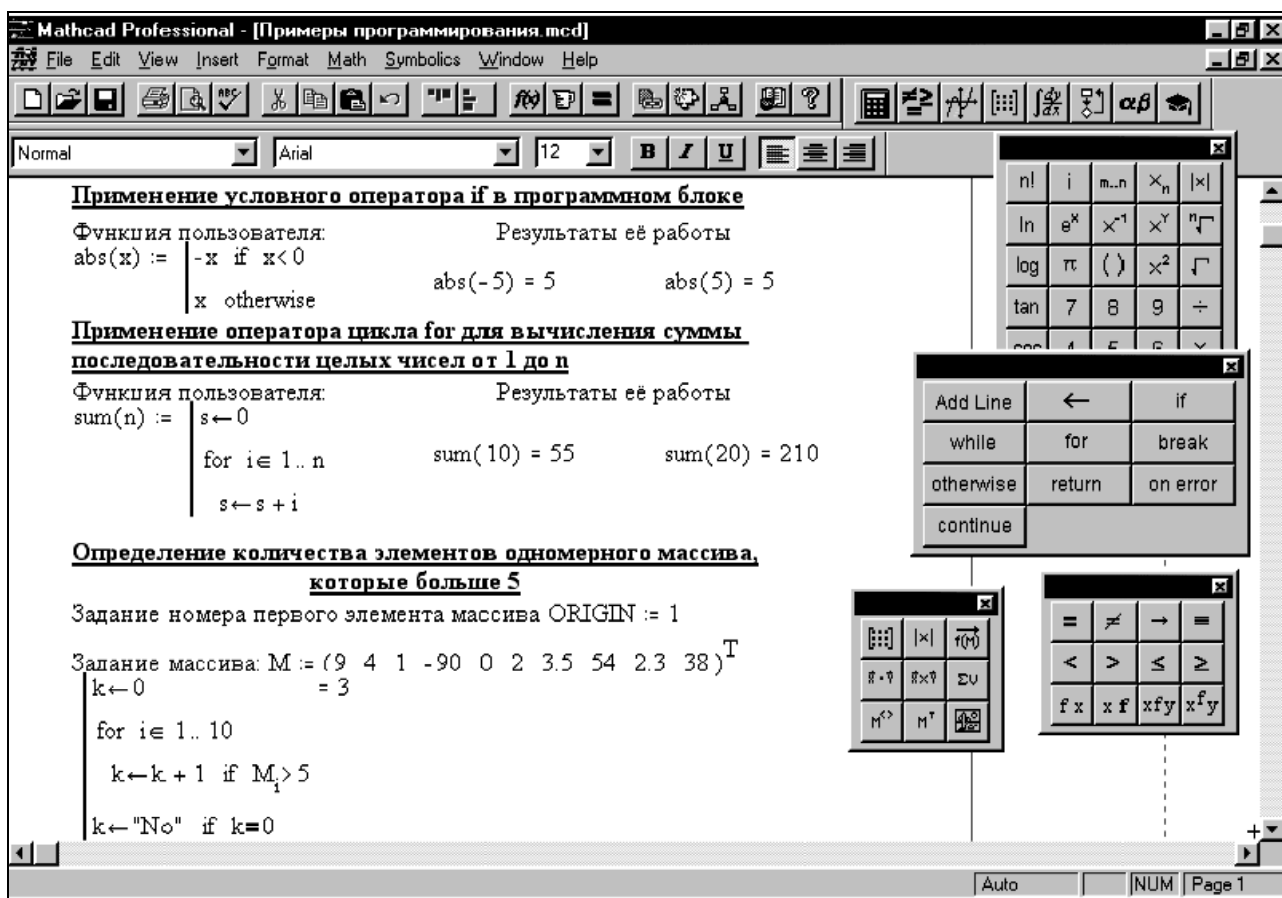


Рисунок 2.2 – Примеры программирования в среде MathCAD

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 Конструкции и элементы газоходов. Тепловые расчеты³

3.1 Конструкции и элементы газоходов

Основное назначение газоходов – подвод запыленного газа от металлургического агрегата к газоочистному аппарату и отвод газов от последнего в дымовую трубу. Газоходы бывают металлические и кирпичные. В большинстве случаев первые имеют круглое, а вторые – прямоугольное сечение и прокладываются в земле. Металлические газоходы делают сварными с разъемами в местах расположения арматуры и иногда фасонных частей. В необходимых случаях металлические газоходы снабжают ребрами жесткости.

3.2 Общие сведения о тепловых расчетах газоходов

Простейшие расчеты элементов газоходов включают в себя, в частности:

- расчеты температурного удлинения газопровода;
- расчеты плотности газа в зависимости от температуры и давления;
- расчеты давления по высоте столба газа (жидкости);
- переводы тепловых параметров из одних единиц измерения в другие.

1) Температурное удлинение газопровода

С повышением температуры газопроводы увеличиваются в своей длине. Это может привести к значительным искривлениям газопровода и, как следствие, к его разрушению.

Температурное удлинение газопровода определяют по формуле

$$\Delta L_T = 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot t_{CT} \cdot L, \quad (3.1)$$

где t_{CT} – температура стенки газопровода, °С; L – длина газопровода, м.

2) Плотность газа в зависимости от температуры и давления

Плотность газа в общем случае может быть определена из уравнения состояния идеального газа – уравнения Клапейрона

$$P = \rho \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T,$$

где P – давление газа, Па; ρ – плотность газа, кг/м³; $R = 8314$ Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса, кг/кмоль (определяется с помощью периодической таблицы Д. Менделеева); T – температура газа, К.

Из этого уравнения можно выразить плотность газа:

$$\rho = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T}.$$

³ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

На практике часто известна плотность газа при нормальных условиях ($P_0 = 760$ мм рт. ст. = 101325 Па; $T_0 = 0$ °С = 273 К) – ρ_0 , т.к. она легко находится по формуле:

$$\rho_0 = \frac{\mu}{V_\mu} = \frac{\mu}{22,4}, \text{ кг/м}^3$$

где $V_\mu = 22,4$ м³ / кмоль – молярный объем.

Зная плотность газа при нормальных условиях легко определяется плотность газа при любой температуре и при любом давлении по формуле

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0}, \text{ Па} \quad (3.2)$$

где $T_0 = 273$ К; $P_0 = 101325$ Па; T – температура газа, К; P – давление газа, Па.

3) Давление по высоте столба газа (жидкости)

Давление по высоте столба любого газа (жидкости), в общем случае, носит название гидростатического давления. Это давление, создаваемое весом вышележащих слоев газа (жидкости). Хотя в зависимости от среды его называют и газостатическим (для газа), и ферростатическим (для жидкого железа) и гидростатическим (вода) и т.п.

Простейшим примером столба газа является столб воздуха в атмосфере Земли. На верхушке этого столба, т.е. в космосе, давление равно нулю, а в основании столба, т.е. на поверхности Земли, давление максимальное, равное 760 мм рт. ст. Точно также если взять столб жидкости (вода), то на поверхности столба давление воды равно нулю, а в основании столба жидкости создается максимальное давление, обязанное весу вышележащих слоев жидкости.

Давление по высоте столба газа (жидкости) рассчитывается по формуле, вытекающей из закона сохранения потенциальной энергии – E

$$E = m \cdot g \cdot h, \text{ Дж},$$

где m – масса газа, кг; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; h – высота, на которой располагается газ относительно выбранного основания, м.

Если разделить левую и правую часть уравнения на объем " V ", занимаемый массой " m ", то получим уравнение для расчета давления " P " по высоте столба газа в виде

$$P = \rho \cdot g \cdot h, \text{ Па} \quad (3.3)$$

В этом уравнении участвует плотность, которая обычно берется из справочников (для жидкостей) или рассчитывается по формулам идеального газа (для газов). Полезно знать на память 4 основные величины плотности:

- воздух 1,293 кг/м³;
- вода 1000 кг/м³;
- жидкое железо 7000 кг/м³;
- твердое железо 7800 кг/м³.

4) Переводы единиц измерения

На практике часто приходится сталкиваться с несистемными единицами

измерения тепловых параметров, т.к. очень часто измерительные приборы настроены на несистемные параметры. Чаще всего это связано с измерением температуры и давления.

Температуру измеряют в градусах Цельсия [$^{\circ}\text{C}$] или Фаренгейта [$^{\circ}\text{F}$], а в расчетах используется температура в градусах Кельвина [K], если другое не оговаривается особо. Перевод температуры производится по формулам:

$$t[^{\circ}\text{C}] = (t[^{\circ}\text{F}] - 32) \cdot 5/9; \quad (3.4a)$$

$$T[\text{K}] = t[^{\circ}\text{C}] + 273; \quad (3.4б)$$

$$T[\text{K}] = (t[^{\circ}\text{F}] - 32) \cdot 5/9 + 273. \quad (3.4в)$$

Например:

- температуре 0 К соответствует -273°C и -460°F ;
- температуре 0 $^{\circ}\text{F}$ соответствует -18°C и 255 К;
- температуре 0 $^{\circ}\text{C}$ соответствует 32 $^{\circ}\text{F}$ и 273 К;
- температуре 100 $^{\circ}\text{C}$ соответствует 212 $^{\circ}\text{F}$ и 373 К.

Приставки для дольных (милли-; микро-; нано- и т.п.) и кратных (кило-; Мега-; Гига- и т.п.) единиц при измерении температуры не используются.

Давление измеряется в "мм вод. ст." – миллиметрах водяного столба (U-образниками), в "мм рт. ст." – миллиметрах ртутного столба (приборы для измерения кровяного давления), в "ат" – технических атмосферах (на промышленных газопроводах), в "атм" – физических атмосферах (сосуды для хранения газа), в "бар" – барах (на теплоэнергетических предприятиях) и т.п., а в расчетах используется давление в "Па" – Паскалях. Перевод давления производится по формулам:

$$P = P[\text{мм вод. ст.}] \cdot 9,81;$$

$$P = P[\text{мм рт. ст.}] \cdot 133,3;$$

$$P = P[\text{ат}] \cdot 98100;$$

$$P = P[\text{атм}] \cdot 101325;$$

$$P = P[\text{бар}] \cdot 100000.$$

Приставки для дольных (милли-; микро-; нано- и т.п.) и кратных (кило-; Мега-; Гига- и т.п.) единиц давления используются очень широко. Например:

$$1 \text{ нанопаскаль: } 1 \text{ нПа} = 10^{-9} \text{ Па};$$

$$1 \text{ микропаскаль: } 1 \text{ мкПа} = 10^{-6} \text{ Па};$$

$$1 \text{ миллипаскаль: } 1 \text{ мПа} = 10^{-3} \text{ Па};$$

$$1 \text{ килопаскаль: } 1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мегапаскаль: } 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па};$$

$$1 \text{ гигапаскаль: } 1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}.$$

3.3 Примеры расчетов

3.3.1 Пример 1 – Определение температурного удлинения газохода

Исходные данные:

Имеется металлический газопровод длиной $L = 10$ метров. Температура

стенки газопровода примерно равна температуре газа.

Задание:

Определить относительное температурное удлинение газопровода при температуре газа $t_r = 130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

а) Температура стенки газопровода

$$t_{\text{ст}} = t_r = 130 \text{ }^\circ\text{C}.$$

б) Температурное удлинение определяется по формуле (3.1)

$$\Delta L_T = 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\text{ст}} \cdot L = 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 130 \cdot 10 = 0,016 \text{ м}.$$

в) Относительное удлинение, выраженное в процентах, равно

$$\Delta L\% = \frac{\Delta L_T}{L} \cdot 100 = \frac{0,016}{10} \cdot 100 = 0,16 \text{ } \%$$

Ответ:

Относительное температурное удлинение газопровода при температуре газа $130 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $0,16 \text{ } \%$.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.1.

<p>Дано: $L := 10.$ - длина газопровода, м $t_g := 130.$ - температура газа, C</p> <p>Решение: $\Delta L := 12.5 \cdot 10^{-6} \cdot t_g \cdot L = 0.016$ - удлинение газопровода, м $\Delta L\% := \frac{\Delta L}{L} \cdot 100 = 0.16$ - относительное удлинение, %</p> <p>Ответ: Относительное удлинение газопровода при температуре газа $t_g = 130$ град.C составляет $\Delta L\% = 0.163 \text{ } \%$.</p>

Рисунок 3.1 – Протокол выполнения примера 1 "Определение температурного удлинения газопровода"

3.3.2 Пример 2 – Определение плотности газа

Исходные данные:

Среда – нагретый воздух. Плотность воздуха при нормальных условиях составляет $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$. Давление среды постоянное и соответствует нормальным условиям.

Задание:

Определить плотность воздуха при температуре $t = 130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

а) Плотность воздуха определяется по формуле (3.2)

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + 130} \cdot \frac{101325}{101325} = 0,876 \text{ кг/м}^3.$$

Ответ:

Плотность воздуха при температуре газа $130 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $0,876 \text{ кг/м}^3$.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.2.

Дано:	
$\rho_0 := 1.293$	- плотность воздуха при н.у., кг/м ³
$t_v := 130.$	- температура воздуха, С
$P_v := 101325.$	- давление воздуха, Па
Решение:	
$\rho := \rho_0 \cdot \frac{273}{t_v + 273} \cdot \frac{P_v}{101325} = 0.876$	- плотность воздуха, кг/м ³
Ответ:	
Плотность воздуха при температуре $t_v = 130$ С составляет $\rho = 0.876$ кг/м ³ .	

Рисунок 3.2 – Протокол выполнения примера 2 "Определение плотности газа"

3.3.3 Пример 3 – Перевод параметров в другую шкалу измерения

Исходные данные:

Температура измеренная термометром со шкалой Цельсия равна $t[^\circ\text{C}] = 130$ °С.

Задание:

Определить температуру по шкале Фаренгейта и по абсолютной шкале Кельвина.

Решение:

а) Из формулы (3.4а) можно выразить температуру в градусах Фаренгейта $t[^\circ\text{F}] = 9/5 \cdot t[^\circ\text{C}] + 32 = 9/5 \cdot 130 + 32 = 266$ °F.

б) Температура в градусах Кельвина по формуле (3.4б)

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273 = 130 + 273 = 403 \text{ K.}$$

Ответ:

Температуре газа 130 °С соответствуют 266 °F и 403 К.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.3.

Дано:	
$t_C := 130.$	- температура по шкале Цельсия
Решение:	
$t_F := \frac{9}{5} \cdot t_C + 32 = 266$	- температура по шкале Фаренгейта
$T_K := t_C + 273. = 403$	- температура по шкале Кельвина
Ответ:	
Температуре $t_C = 130$ С соответствуют $t_F = 266$ F и $T_K = 403$ K	

Рисунок 3.3 – Протокол выполнения примера 3 "Перевод параметров в другую шкалу измерения"

3.3.4 Пример 4 – Давление столба газа (жидкости)

Исходные данные:

Среда – вода. Высота столба воды $h_{\text{мм}} = 1$ мм.

Задание:

Определить давление на основании столба воды.

Решение:

а) Переводим мм в метры

$$h = h_{\text{мм}} / 1000 = 1 / 1000 = 0,001 \text{ м}$$

б) Давление определяется по формуле (3.3)

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = 9,81 \text{ Па},$$

где $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды при нормальных условиях (справочная величина).

Ответ:

Давление столба воды 1 мм на свое основание равно 9,81 Па.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 3.4.

Дано:	
$g := 9.81$	- ускорение свободного падения, кг/с ²
$\rho_{\text{вода}} := 1000.$	- плотность воды, кг/м ³
$h_{\text{мм}} := 1.$	- высота водяного столба, мм
Решение:	
$h_{\text{м}} := \frac{h_{\text{мм}}}{1000}$	- перевод из мм в метры
$P := \rho_{\text{вода}} \cdot g \cdot h_{\text{м}} = 9.81$	- давление у основания столба воды, Па
Ответ:	
Давление столба воды высотой $h_{\text{мм}} = 1$ мм на свое основание равно $P = 9.81$ Па	

Рисунок 3.4 – Протокол выполнения примера 4 "Давление столба газа (жидкости)"

3.4 Задания для самостоятельной работы

Задача 3.1

Определить относительное температурное удлинение газопровода длиной 10 м при температуре газа $t_r = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 3.2

Определить относительное температурное удлинение газопровода длиной 10 м при температуре газа $t_r = -130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 3.3

Определить плотность воздуха при температуре $t = -130 \text{ }^\circ\text{C}$ и нормальном давлении. Плотность воздуха при н.у. принять $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3.4

Определить плотность воздуха при давлении $P = 202650 \text{ Па}$ и нормальной температуре.

Задача 3.5

Определить плотность воздуха при давлении $P = 50662,5 \text{ Па}$ и нормальной температуре. Плотность воздуха при н.у. принять $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3.6

Определить плотность воздуха при давлении $P = 202650 \text{ Па}$ и температуре $273 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность воздуха при н.у. принять $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3.7

Определить температуру по шкале Фаренгейта и по абсолютной шкале Кельвина, соответствующую температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Задача 3.8

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 100 мм вод. ст.

Задача 3.9

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 120 мм рт. ст.

Задача 3.10

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 1,75 технических атмосфер.

Задача 3.11

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 2,5 физических атмосфер.

Задача 3.12

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 25 бар.

Задача 3.13

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 25 бар.

Задача 3.14

Определить давление в основании столба воды высотой 10 м.

Задача 3.15

Определить гидростатическое давление в основании столба газа высотой 5 м. Плотность газа принять равной $1,293\text{ кг/м}^3$.

Задача 3.16

Определить давление в паскалях, соответствующее 102 МПа.

3.5 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Для чего предназначены газоходы и газопроводы?
- 2) Из какого материала чаще всего изготавливают газоходы?
- 3) Что происходит с длиной газопровода при уменьшении температуры газа?
- 4) Чему равны температура и давление, соответствующие нормальным условиям газа?
- 5) Чему равен молярный объем газа?
- 6) Как записывается формула для определения плотности газа при нормальных условиях?
- 7) Что происходит с плотностью газа при увеличении температуры газа?
- 8) Что происходит с плотностью газа при увеличении давления газа?
- 9) Какое вещество имеет выше плотность: воздух или вода? Чему они равны?
- 10) Как перевести температуру из градусов Цельсия в градусы Кельвина?

4 Основы аэродинамического расчета газоотводного тракта. Гидравлические расчеты⁴

4.1 Основы аэродинамического расчета газоотводящего тракта

Полное расчетное сопротивление газоотводящего тракта Δp_p определяют как сумму сопротивлений размещенного в нем оборудования $\Delta p_{\text{обор}}$ (местные сопротивления) и сопротивлений соединительных газопроводов $\Delta p_{\text{сопр}}$ (сопротивление трения о стенки трубопровода), включая сопротивление дымовой трубы и теряемый при выходе динамический напор $\Delta p_{\text{дин}}$, а также разрежение на выходе из технологического агрегата Δp_T :

$$\Delta p_p = \Delta p_{\text{обор}} + \Delta p_{\text{сопр}} + \Delta p_{\text{дин}} + \Delta p_T, \text{ Па.} \quad (4.1)$$

Потери в местных сопротивлениях $\Delta p_{\text{мест}}$ подсчитывают пропорционально динамическому давлению по формуле

$$\Delta p_{\text{мест}} = \zeta \cdot p_{\text{дин}} = \zeta \cdot \frac{\rho_g \cdot w^2}{2}, \text{ Па} \quad (4.2)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления; $p_{\text{дин}}$ – динамическое давление ($p_{\text{дин}} = \frac{\rho_g \cdot w^2}{2}$), Па; w – скорость газа в самом узком месте (до или после) местного сопротивления, м/с; ρ_g – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

Например, при внезапном расширении сечения газохода с F_1 до F_2 коэффициент местного сопротивления определяется по формуле Борда-Карно:

$$\zeta_{\text{рас}} \approx \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2; \quad (4.3)$$

При движении нагретых газов учитывают величину самотяги (избыточного геометрического давления), Па:

$$\Delta p_{\text{геом}} = g \cdot H \cdot (\rho_v - \rho_g), \quad (4.4)$$

где H – расстояние по вертикали между центрами рассматриваемых сечений, м; $g = 9,81$ – ускорение силы тяжести, Н/кг; ρ_v и ρ_g – плотности, соответственно, окружающего воздуха и газа, кг/м³.

Потери на трение по длине газопровода обычно учитывают при длинных участках (более 10 м) по формуле

⁴ Практическая работа подготовлена на основе материалов [1]

$$\Delta p_{\text{трени}} = \lambda \cdot \frac{\ell}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} \cdot w^2}{2}, \quad (4.5)$$

где $\lambda \approx 0,02-0,03$ – гидравлический коэффициент трения (может значительно снижаться при увеличении скорости потока); $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр газопровода (для трубы круглого сечения диаметром "d" соблюдается равенство $d_{\text{экв}} = d$), м; ℓ – длина участка, м.

4.2 Примеры расчетов

4.2.1 Пример 1 – Потери давления на местном сопротивлении

Исходные данные:

Газопровод постоянного сечения имеет резкий поворот на 90 градусов. Коэффициент потерь на местном сопротивлении равен $\xi = 1,5$. Скорость газа $w = 12$ м/с, плотность газа $\rho = 0,8$ кг/м³.

Задание:

Определить потери давления.

Решение:

а) Динамическое давление

$$p_{\text{дин}} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{0,8 \cdot 12^2}{2} = 57,6 \text{ Па};$$

б) Потери давления по формуле (4.2)

$$\Delta p_{\text{мест}} = \xi \cdot p_{\text{дин}} = 1,5 \cdot 57,6 = 86,4 \text{ Па}.$$

Ответ:

Потери давления на местном сопротивлении (поворот газопровода на 90°) равны 86,4 Па.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 4.1.

Дано:	
$\xi = 1.5$	- коэффициент потерь на местном сопротивлении, б/р
$\rho = 0.8$	- плотность газа, кг/м ³
$w = 12.$	- скорость газа, м/с
Решение:	
$P_{\text{дин}} := \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 57.6$	- динамическое давление, Па
$\Delta P := \xi \cdot P_{\text{дин}} = 86.4$	- потери давление, Па
Ответ:	
Потери давления при резком повороте газопровода равны $\Delta P = 86.4$ Па	

Рисунок 4.1 – Протокол выполнения примера 1 "Потери давления на местном сопротивлении"

4.2.2 Пример 2 – Коэффициент местного сопротивления

Исходные данные:

Трубопровод имеет участок с внезапным расширением сечения с

площади $F_1 = 0,035 \text{ м}^2$ до площади $F_2 = 0,085 \text{ м}^2$.

Задание:

Определить коэффициент местного сопротивления.

Решение:

а) Коэффициент местного сопротивления – по формуле (4.3)

$$\zeta_{\text{рас}} \approx \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,035}{0,085}\right)^2 = 0,346.$$

Ответ:

Коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении трубопровода равен 0,346.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 4.2.

Дано:	
$F1 = 0.035$	- площадь сечения до расширения, м2
$F2 = 0.085$	- площадь сечения после расширения, м2
Решение:	
$\zeta := \left(1 - \frac{F1}{F2}\right)^2 = 0.346$	- коэффициент потерь на местном сопротивлении, б/р
Ответ:	
Коэффициент потерь на местном сопротивлении равен $\zeta = 0.346$	

Рисунок 4.2 – Протокол выполнения примера 2 "Коэффициент местного сопротивления"

4.2.3 Пример 3 – Избыточное геометрическое давление

Исходные данные:

Вертикальный трубопровод длиной $H = 1,5$ метра с движением газа снизу вверх. Плотность газа $\rho_r = 0,85 \text{ кг/м}^3$, плотность окружающего воздуха $\rho_v = 1,3 \text{ кг/м}^3$.

Задание:

Определить избыточное геометрическое давление (самотягу) в конце вертикального трубопровода относительно начала трубопровода.

Решение:

а) Избыточное геометрическое давление – по формуле (4.4)

$$\Delta p_{\text{геом}} = g \cdot H \cdot (\rho_v - \rho_r) = 9,81 \cdot 1,5 \cdot (1,3 - 0,85) = 6,6 \text{ Па.}$$

Ответ:

Избыточное геометрическое давление равно 6,6 Па.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 4.3.

Дано:	
$\rho_g := 0.85$	- плотность газа, кг/м ³
$\rho_v := 1.3$	- плотность воздуха, кг/м ³
$H := 1.5$	- длина вертикального трубопровода, м
$g := 9.81$	- ускорение свободного падения, м/с ²
Решение:	
$\Delta P_{geom} := g \cdot H \cdot (\rho_v - \rho_g) = 6.6$	- избыточное геометрическое давление, Па
Ответ:	
Избыточное геометрическое давление в конце вертикального трубопровода равно $\Delta P_{geom} = 6.6$ Па	

Рисунок 4.3 – Протокол выполнения примера 3 "Избыточное геометрическое давление"

4.2.4 Пример 4 – Потери давления на трение

Исходные данные:

Движение газа по прямому трубопроводу длиной $\ell = 20$ метров и диаметром $d = 0,25$ метра. Плотность газа $\rho_g = 1,3$ кг/м³, скорость газа $w = 15$ м/с. Гидравлический коэффициент трения $\lambda = 0,02$.

Задание:

Определить потери давления на трение при движении газа по трубопроводу.

Решение:

а) Потери давления на трение – по формуле (4.5)

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{\ell}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_g \cdot w^2}{2} = 0,02 \cdot \frac{20}{0,25} \cdot \frac{1,3 \cdot 15^2}{2} = 234 \text{ Па,}$$

где эквивалентный диаметр равен диаметру трубы: $d_{\text{экв}} = d = 0,25$ м.

Ответ:

Потери давления на трение при движении газа по трубопроводу равны 234 Па.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 4.4.

Дано:	
$L := 20.$	- длина трубопровода, м
$d := 0.25$	- диаметр трубопровода, м
$\rho := 1.3$	- плотность газа, кг/м ³
$w := 15.$	- скорость газа, м/с
$\lambda := 0.02$	- коэффициент трения, б/р
Решение:	
$\Delta P_{\text{tren}} := \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 234$	- потери давления, Па
Ответ:	
Потери давления на трение в трубопроводе равны $\Delta P_{\text{tren}} = 234$ Па	

Рисунок 4.4 – Протокол выполнения примера 4 "Потери давления на трение"

4.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 4.1

Определить потери давления на местном сопротивлении, если скорость газа $w = 12$ м/с, а коэффициент потерь равен $\xi = 0,6$. Плотность газа $\rho = 1,3$ кг/м³.

Задача 4.2

Определить динамическое давление, создаваемое потоком газа, имеющим скорость 10 м/с, если плотность газа 1,0 кг/м³.

Задача 4.3

Датчик давления, помещенный навстречу потоку воздуха показал динамическое давление 120 Па. Плотность воздуха равна 1,293 кг/м³. Определить скорость газа.

Задача 4.4

Динамическое давление потока газа равно 120 Па. Потери давления на местном сопротивлении составляют 15 Па. Определить коэффициент потерь на местном сопротивлении.

Задача 4.5

Определить коэффициент местного сопротивления на трубопроводе при внезапном расширении сечения с площади $F_1 = 0,05$ м² до площади $F_2 = 0,1$ м².

Задача 4.6

Определить площадь сечения трубы круглого сечения, если ее диаметр составляет 0,2 м.

Задача 4.7

Определить как изменится площадь сечения трубопровода при внезапном расширении с диаметра 0,1 м до диаметра 0,2 м.

Задача 4.8

Определить коэффициент местного сопротивления движению газа при внезапном расширении трубопровода с диаметра 0,1 м до диаметра 0,2 м. При расчете использовать формулу Борда-Карно.

Задача 4.9

Определить избыточное геометрическое давление в вертикальном трубопроводе длиной $H = 1,0$ м с движением газа снизу вверх. Плотность газа $\rho_r = 1,4$ кг/м³, плотность окружающего воздуха $\rho_v = 1,3$ кг/м³.

Задача 4.10

Определить избыточное геометрическое давление по длине трубопровода, если перепад высот между началом и концом трубы 1,25 м, а разница плотностей газа внутри трубы и окружающего воздуха составляет 0,4 кг/м³.

Задача 4.11

Определить потери давления на трение при движении газа по трубопроводу диаметром 0,5 м и длиной 10 м, если гидравлический коэффициент трения составляет 0,03. Плотность газа $\rho_{\text{г}} = 1,293 \text{ кг/м}^3$, скорость газа $w = 7 \text{ м/с}$.

Задача 4.12

Определить гидравлический коэффициент трения, если потери давления на трение при движении газа по трубопроводу диаметром 0,5 м и длиной 10 м составляют 150 Па. Плотность газа $\rho_{\text{г}} = 1,293 \text{ кг/м}^3$, скорость газа $w = 70 \text{ м/с}$.

Задача 4.13

Определить давление в паскалях, соответствующее давлению 150 мм вод. ст.

4.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Как расчетом определить полное сопротивление газоотводящего тракта?
- 2) Что включают в себя потери давления на местных сопротивлениях?
- 3) От чего зависят потери давления на местных сопротивлениях?
- 4) Как изменяются потери давления на местных сопротивлениях при увеличении скорости газа?
- 5) Как записывается формула для определения потерь давления на местных сопротивлениях?
- 6) От чего зависит коэффициент потерь на местном сопротивлении при внезапном расширении трубопровода?
- 7) Как записывается формула для определения динамического давления?
- 8) Воздух в трубопроводе имеет высокую температуру относительно окружающего воздуха. Где выше плотность воздуха: в трубе или снаружи?
- 9) От каких параметров зависят потери давления на трение? Как называются эти параметры?
- 10) Как перевести давление в физических атмосферах в паскали?

5 Выбор дымососов и вентиляторов. Тепловые и гидравлические расчеты⁵

5.1 Основы выбора дымососов и вентиляторов

Дымосос выбирают на основе аэродинамического расчета газоотводящего тракта. Производительность дымососа V_d принимают с запасом 10 % по отношению к расчетному количеству газов у дымососа V_p с учетом присоса воздуха по газоотводящему тракту независимо от температуры газов, но с поправкой на барометрическое давление $p_{бар}$:

$$V_d = 1,1 \cdot V_p \cdot \frac{p_o}{p_{бар}}, \quad (5.1)$$

где 1,1 – коэффициент запаса; $p_o = 101325$ Па – давление при нормальных условиях.

Создаваемое дымососом давление (разрежение), приведенное к условиям каталога, по которому выбирается дымосос $\Delta p_{кат}$, принимается равным

$$\Delta p_{кат} = 1,2 \cdot \Delta p_p \cdot K, \quad (5.2)$$

где 1,2 – коэффициент запаса; Δp_p – суммарное сопротивление газоотводящего тракта, полученное в результате аэродинамического расчета; K – коэффициент пересчета, равный

$$K = \frac{t_r + 273}{t_{кат} + 273} \cdot \frac{p_o}{p_{бар}} \cdot \frac{\rho_{ог}}{\rho_{ов}}, \quad (5.3)$$

где t_r – температура газа у дымососа, °С; $t_{кат}$ – температура, к которой отнесены каталожные данные, °С; $\rho_{ог}$ и $\rho_{ов}$ – плотность соответственно газа и воздуха при нормальных условиях, кг/м³.

Потребляемую дымососом мощность N определяют по формуле

$$N = \frac{V_{кат} \cdot \Delta p_{кат}}{\eta_{кат} \cdot K} = \frac{N_{кат}}{K}, \quad (5.4)$$

где $\eta_{кат}$ и $N_{кат}$ – каталожные значения соответственно КПД и мощности.

⁵ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

При изменении числа оборотов с "n" на "n₁" производительность, создаваемое давление и потребляемая мощность приближенно могут быть определены из следующих соотношений:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{n_1}{n}; \quad \frac{\Delta p_1}{\Delta p} = \frac{n_1^2}{n^2}; \quad \frac{N_1}{N} = \frac{n_1^3}{n^3}. \quad (5.5)$$

Аналогично выбирают вентиляторы, предназначенные для приточной и вытяжной вентиляции или иных целей.

5.2 Примеры расчетов

5.2.1 Пример 1 – Производительность вентилятора

Исходные данные:

Производительность вентилятора составляет $V_{\text{база}} = 360 \text{ м}^3/\text{ч}$ при некотором базовом числе оборотов $n_{\text{база}}$. После установки нового электродвигателя число оборотов "n" колеса вентилятора увеличилось в 2 раза, т.е. $\Delta n = \frac{n}{n_{\text{база}}} = 2$.

Задание:

Определить производительность вентилятора после увеличения числа оборотов.

Решение:

а) Исходя из формулы (5.5) производительность вентилятора пропорциональна числу оборотов. Следовательно

$$V = V_{\text{база}} \cdot \frac{n}{n_{\text{база}}} = 360 \cdot 2 = 720 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Ответ:

Производительность вентилятора после увеличения числа оборотов составляет $720 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.1.

Дано:	
$V_{\text{база}} := 360.$	- базовая производительность вентилятора, м3/ч
$n_{\text{на_nбаза}} := 2.$	- отношение числа оборотов электродвигателя к базовому значению
Решение:	
$V := V_{\text{база}} \cdot n_{\text{на_nбаза}}^1 = 720$	- производительность вентилятора, м3/ч
Ответ:	
Производительность вентилятора после увеличения числа оборотов будет равна	
$V = 720 \text{ м3/ч}$	

Рисунок 5.1 – Протокол выполнения примера 1 "Производительность вентилятора"

5.2.2 Пример 2 – Давление вентилятора

Исходные данные:

Давление, создаваемое вентилятором составляет $P_{\text{база}} = 1500$ Па при некотором базовом числе оборотов " $n_{\text{база}}$ ". После установки нового электродвигателя число оборотов " n " колеса вентилятора увеличилось в 2 раза, т.е. $\Delta n = \frac{n}{n_{\text{база}}} = 2$.

Задание:

Определить давление, создаваемое вентилятором после увеличения числа оборотов.

Решение:

а) Исходя из формулы (5.5) давление, создаваемое вентилятором пропорционально числу оборотов в квадрате. Следовательно

$$P = P_{\text{база}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{база}}} \right)^2 = 1500 \cdot 2^2 = 6000 \text{ Па.}$$

Ответ:

Давление, создаваемое вентилятором после увеличения числа оборотов составляет 6000 Па.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.2.

Дано: $P_{\text{база}} := 1500$. - базовое давление вентилятора, Па $n_{\text{на_nбаза}} := 2$. - отношение числа оборотов электродвигателя к базовому значению
Решение: $P := P_{\text{база}} \cdot n_{\text{на_nбаза}}^2 = 6000$ - давление вентилятора, Па
Ответ: Давление вентилятора после увеличения числа оборотов будет равно $P = 6000$ Па

Рисунок 5.2 – Протокол выполнения примера 2 "Давление вентилятора"

5.2.3 Пример 3 – Мощность вентилятора

Исходные данные:

Мощность, потребляемая вентилятором составляет $N_{\text{база}} = 2500$ Вт при некотором базовом числе оборотов " $n_{\text{база}}$ ". После установки нового электродвигателя число оборотов " n " колеса вентилятора увеличилось в 2 раза, т.е. $\Delta n = \frac{n}{n_{\text{база}}} = 2$.

Задание:

Определить мощность, потребляемую вентилятором после увеличения числа оборотов.

Решение:

а) Исходя из формулы (5.5) мощность, потребляемая вентилятором пропорционально числу оборотов в 3-й степени. Следовательно

$$N = N_{\text{база}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{база}}} \right)^3 = 2500 \cdot 2^3 = 20000 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Мощность, потребляемая вентилятором после увеличения числа оборотов составляет 20000 Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.3.

Дано: N _{база} := 2500. - базовая мощность вентилятора, Вт n _{на_nбаза} := 2. - отношение числа оборотов электродвигателя к базовому значению
Решение: N := N _{база} · n _{на_nбаза} ³ = 20000 - мощность вентилятора, Вт
Ответ: Мощность вентилятора после увеличения числа оборотов будет равна N = 20000 Вт

Рисунок 5.3 – Протокол выполнения примера 3 "Мощность вентилятора"

5.2.4 Пример 4 – Мощность вентилятора

Исходные данные:

Производительность вентилятора составляет $V = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$, а создаваемое давление – $P = 2000 \text{ Па}$. КПД вентилятора $\eta = 0,8$. Вентилятор планируется использовать при нормальных параметрах, заданных в каталогах.

Задание:

Определить мощность, потребляемую вентилятором.

Решение:

а) Мощность, потребляемая вентилятором определяется по формуле (5.4)

$$N = \frac{V \cdot P}{\eta_{\text{кат}} \cdot K} = \frac{0,05 \cdot 2000}{0,8 \cdot 1} = 125 \text{ Вт,}$$

где K – коэффициент пересчета из нормальных условий (указанных в каталогах вентиляторов) на реальные условия. Так как каталожные и реальные условия совпадают, то $K = 1$.

Ответ:

Мощность, потребляемая вентилятором составляет 125 Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 5.4.

Дано:		
$V = 0.05$	- производительность вентилятора, м ³ /с	
$P = 2000$	- давление, создаваемое вентилятором, Па	
$\eta = 0.8$	- КПД вентилятора, б/р	
Решение:		
$N = \frac{V \cdot P}{\eta} = 125$	- мощность вентилятора, Вт	
Ответ:		
Мощность вентилятора составляет $N = 125$ Вт		

Рисунок 5.4 – Протокол выполнения примера 4 "Мощность вентилятора"

5.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 5.1

Определить производительность вентилятора после увеличения числа оборотов электродвигателя в 1,5 раза, если базовая производительность составляла 150 м³ / ч.

Задача 5.2

Определить во сколько раз изменится производительность вентилятора после увеличения числа оборотов электродвигателя в 3 раза.

Задача 5.3

Определить производительность вентилятора после уменьшения числа оборотов электродвигателя в 1,5 раза, если базовая производительность составляла 150 м³ / ч.

Задача 5.4

Определить во сколько раз изменится производительность вентилятора после уменьшения числа оборотов электродвигателя в 3 раза.

Задача 5.5

Определить давление, создаваемое вентилятором после увеличения числа оборотов электродвигателя в 1,5 раза, если базовое давление составляло 1500 Па.

Задача 5.6

Определить во сколько раз изменится давление, создаваемое вентилятором после увеличения числа оборотов электродвигателя в 3 раза.

Задача 5.7

Определить давление, создаваемое вентилятором после уменьшения числа оборотов электродвигателя в 1,5 раза, если базовое давление составляло 1500 Па.

Задача 5.8

Определить во сколько раз изменится давление, создаваемое вентилятором после уменьшения числа оборотов электродвигателя в 3 раза.

Задача 5.9

Определить мощность, потребляемую вентилятором после увеличения числа оборотов электродвигателя в 1,5 раза, если базовая мощность составляла 1500 Па.

Задача 5.10

Определить во сколько раз изменится мощность, потребляемая вентилятором после увеличения числа оборотов электродвигателя в 3 раза.

Задача 5.11

Определить мощность, потребляемую вентилятором, если производительность вентилятора составляет $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$, а создаваемое давление 20000 Па. КПД вентилятора $\eta = 0,9$.

5.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Какие расчеты должны предшествовать выбору дымососа?
- 2) В чем измеряется производительность дымососа?
- 3) На какие температурные условия рассчитаны вентиляторы, приводимые в каталогах вентиляторов?
- 4) Как изменяется производительность вентилятора с уменьшением числа оборотов электродвигателя?
- 5) Как изменяется давление, создаваемое вентилятором с уменьшением числа оборотов электродвигателя?
- 6) Как изменяется мощность, потребляемая вентилятором из электросети с уменьшением числа оборотов электродвигателя?
- 7) Если перемножить производительность вентилятора (V) на давление, создаваемое вентилятором (P), то получится параметр, характеризующий внутренние энергетические свойства вентилятора. Как его назвать и какая его размерность?

6 Дымовые трубы. Тепловые и гидравлические расчеты⁶

6.1 Основные сведения о дымовых трубах

Первоначальным назначением дымовых труб являлось естественное удаление дымовых газов тепловых установок за счет разности плотностей холодного воздуха и горячих дымовых газов. В металлургии это назначение дымовых труб сохраняется и сейчас для печей с малым сопротивлением газового тракта и достаточно высокой температурой отходящих газов, содержащих незначительное количество вредных компонентов.

Однако в большинстве случаев дымовые газы металлургических агрегатов загрязнены пылью и токсичными газообразными компонентами. Это привело к необходимости использования дымовых труб для рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе с целью снижения их приземных концентраций до допустимого уровня. В связи с этим потребовались дымовые трубы большой высоты: 100 м, 200 м, 300 м. Появление в газоотводящих трактах теплоутилизационных и пылегазоулавливающих установок резко увеличило их сопротивление и заставило перейти на дымососную тягу.

6.2 Основы расчета дымовых труб

Скорость газа в трубе при естественной тяге принимают в пределах 4-5 м/с, так как при больших скоростях увеличивается аэродинамическое сопротивление трубы, а при меньших возможно задувание наружного воздуха в трубу, что резко ухудшает тягу. Эту скорость часто называют экономичной или экономически выгодной.

При использовании дымососов режимы работы дымовых труб резко изменились. Экономически выгодными являются скорости газов: в трубах высотой до 150 м – 15-20 м/с, а высотой 150-300 м – 35-40 м/с.

Расчеты высоты и диаметра дымовых труб выполняются на основе аэродинамических расчетов. Толщина стенки труб определяется на основе тепловых расчетов и расчетов прочности.

Например, внутренний диаметр ("диаметр в свету") дымовой трубы может быть определен по заданному расходу дымовых газов, которые удаляются посредством дымовой трубы. Из выражения для объемного расхода газа

$$V = w \cdot S = w \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ [м}^3/\text{с]}, \quad (6.1)$$

где w – действительная скорость потока газа, принимаемая равной экономической скорости газа при естественной тяге (4-5 м/с); S – площадь сечения для прохода газа, м²; d – диаметр сечения, м,

⁶ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

выражается внутренний диаметр сечения дымовой трубы

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}}, \text{ м.} \quad (6.2)$$

Точно также определяется внутренний диаметр трубы при использовании дымососа, но только в этом случае экономически выгодная скорость будет не 4-5 м/с, а 15-40 м/с.

6.3 Примеры расчетов

6.3.1 Пример 1 – Потери давления от печи до выхлопа дымовой трубы

Исходные данные:

Газоотводящий тракт от печи до выхлопа дымовой трубы имеет следующие параметры: потери давления на очистном оборудовании $\Delta p_{\text{обор}} = 350$ Па, потери соединительных газопроводов $\Delta p_{\text{сопр}} = 230$ Па, динамическое давление на выхлопе дымовой трубы $\Delta p_{\text{дин}} = 60$ Па, разрежение в печи $\Delta p_{\text{т}} = 10$ Па.

Задание:

Определить полные потери давления газоотводящего тракта от печи до выхлопа дымовой трубы.

Решение:

а) Полные потери давления определяются по формуле (4.1)

$$\Delta p = \Delta p_{\text{обор}} + \Delta p_{\text{сопр}} + \Delta p_{\text{дин}} + \Delta p_{\text{т}} = 350 + 230 + 60 + 10 = 650 \text{ Па.}$$

Ответ:

Полные потери давления газоотводящего тракта от печи до выхлопа дымовой трубы составляют 650 Па.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 6.1

Дано:	
$\Delta P_{\text{обор}} := 350.$	- потери давления на очистном оборудовании, Па
$\Delta P_{\text{сопр}} := 230.$	- потери соединительных газопроводов, Па
$\Delta P_{\text{дин}} := 60.$	- динамическое давление на выхлопе дымовой трубы, Па
$\Delta P_{\text{т}} := 10.$	- разрежение в печи, создаваемое дымовой трубой, Па
Решение:	
$\Delta P := \Delta P_{\text{обор}} + \Delta P_{\text{сопр}} + \Delta P_{\text{дин}} + \Delta P_{\text{т}} = 650$	- полные потери, Па
Ответ:	
Полные потери от печи до выхлопа дымовой трубы составляют $\Delta P = 650$ Па	

Рисунок 6.1 – Протокол выполнения примера 1 "Потери давления от печи до выхлопа дымовой трубы"

6.3.2 Пример 2 – Высота дымовой трубы

Исходные данные:

Потери давления от теплового агрегата до выхлопа дымовой трубы

должны компенсироваться (при естественной тяге) избыточным геометрическим давлением, создаваемым дымовой трубой. Это давление равно 60 Па. Плотность газа $0,85 \text{ кг/м}^3$, а плотность окружающего воздуха $1,3 \text{ кг/м}^3$.

Задание:

Определить высоту дымовой трубы.

Решение:

а) Из выражения (4.4) для избыточного геометрического давления

$$\Delta p_{\text{геом}} = g \cdot H \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}}),$$

выражается высота H в виде:

$$H = \frac{\Delta p_{\text{геом}}}{g \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})} = \frac{60}{9,81 \cdot (1,3 - 0,85)} = 13,6 \text{ м.}$$

Ответ:

Высота дымовой трубы составляет 13,6 м.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 6.2.

Дано:	
$\rho_{\text{г}} := 0.85$	- плотность газа, кг/м3
$\rho_{\text{в}} := 1.3$	- плотность окружающего воздуха, кг/м3
$\Delta P_{\text{геом}} := 60.$	- избыточное геометрическое давление (самотяга дымовой трубы), Па
$g := 9.81$	- ускорение свободного падения, м/с2
Решение:	
Из выражения (4.4) для избыточного геометрического давления выражается	
$H := \frac{\Delta P_{\text{геом}}}{g \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})} = 13.6$	- высота дымовой трубы, м
Ответ:	
Высота дымовой трубы составляет $H = 13.6 \text{ м}$	

Рисунок 6.2 – Протокол выполнения примера 2 "Высота дымовой трубы"

6.3.3 Пример 3 – Диаметр дымовой трубы

Исходные данные:

Имеется дымовая труба для отвода дыма от печи самотягой (естественная тяга). Расход дыма на выхлопе из трубы $V_{\text{ч}} = 1000 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

Задание:

Определить диаметр выхлопа дымовой трубы.

Решение:

а) Перевод единиц измерения расхода дыма из $\text{м}^3 / \text{ч}$ в $\text{м}^3 / \text{с}$

$$V = V_{\text{ч}} / 3600 = 1000 / 3600 = 0,278 \text{ м}^3 / \text{с}$$

б) Из формулы (6.1)

$$V = w \cdot S$$

выражается площадь сечения трубы в виде

$$S = \frac{V}{w} = \frac{0,278}{4} = 0,06944 \text{ м}^2,$$

где $w = 4$ м/с – принятая экономичная скорость движения дыма при естественной тяге;

в) диаметр трубы

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,06944}{\pi}} = 0,297 \text{ м или } 297 \text{ мм.}$$

Ответ:

Диаметр дымовой трубы составляет 297 мм.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 6.3.

Дано:	
$w := 4$	- экономичная скорость газа, м/с
$V := 1000$	- расход газа, м ³ /ч
Решение:	
$V_s := \frac{V}{3600} = 0.278$	- перевод единиц расхода из м ³ /ч в м ³ /с
Из выражения (6.1) выражается площадь сечения трубы	
$S := \frac{V_s}{w} = 0.06944$	- площадь сечения дымовой трубы, м ²
$d := \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 0.297$	- диаметр трубы, м
$d_{\text{мм}} := d \cdot 1000 = 297$	- диаметр трубы, мм
Ответ:	
Диаметр выхлопа дымовой трубы составляет $d_{\text{мм}} = 297$ мм	

Рисунок 6.3 – Протокол выполнения примера 3 "Диаметр дымовой трубы"

6.4 Задания для самостоятельной работы

Задача 6.1

Определить полные потери давления газоотводящего тракта от печи до выхлопа дымовой трубы, если потери давления на очистном оборудовании 100 Па, потери соединительных газопроводов 200 Па, динамическое давление на выхлопе дымовой трубы 100 Па, разрежение в печи 5 Па.

Задача 6.2

Определить высоту дымовой трубы, если избыточное геометрическое давление (самотяга) в конце трубы 600 Па. Плотность газа 0,7 кг/м³, а плотность окружающего воздуха 1,2 кг/м³.

Задача 6.3

Определить высоту дымовой трубы, если избыточное геометрическое давление (самотяга) в конце трубы 100 Па. Плотность газа 0,9 кг/м³, а плотность окружающего воздуха 1,3 кг/м³.

Задача 6.4

Определить внутренний диаметр на выхлопе дымовой трубы при естественной тяге, если расход дыма 2500 м³/ч.

Задача 6.5

Определить площадь внутреннего сечения выхлопа дымовой трубы при естественной тяге, если расход газа $10000 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

Задача 6.6

Определить внутренний диаметр на выхлопе дымовой трубы при наличии дымососа, если расход дыма $2500 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

Задача 6.7

Определить площадь внутреннего сечения выхлопа дымовой трубы при наличии дымососа, если расход газа $10000 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

6.5 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Для каких двух главных целей используются дымовые трубы?
- 2) В чем измеряется расход дыма?
- 3) Исторически первые дымовые трубы работали на естественной тяге. Современные трубы – на дымососной тяге. Какая цель использования дымососов?
- 4) Почему не выгодно поддерживать скорость дыма на выхлопе дымовой трубы выше экономической скорости?
- 5) Почему не выгодно поддерживать скорость дыма на выхлопе дымовой трубы ниже экономической скорости?
- 6) Чему равна экономичная скорость дыма на выхлопе дымовой трубы при естественной тяге?
- 7) Чему равна экономичная скорость дыма на выхлопе дымовой трубы при дымососной тяге?
- 8) Какая примерно максимальная высота современных дымовых труб?

7 Охлаждение газа атмосферным воздухом. Тепловые расчеты⁷

7.1 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/м³, Дж/моль.

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

$$I = V \cdot c \cdot t \text{ [Вт]}, \quad (7.1)$$

а также удельную энтальпию в размерности Дж/м³, которую определяют по формуле:

$$i = c \cdot t \text{ [Дж/м}^3\text{]}. \quad (7.2)$$

Здесь: V – расход газа, м³/с; c – удельная теплоемкость газа, Дж/(м³·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:

$$(V_{\Gamma} + V_{\text{В}}) \cdot c_{\text{см}} \cdot t_{\text{см}} = V_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} + V_{\text{В}} \cdot c_{\text{В}} \cdot t_{\text{В}} \text{ [Вт]}, \quad (7.3)$$

где V_{Γ} – расход горячего газа, поступающего на охлаждение при нормальных условиях, м³/с; $V_{\text{В}}$ – расход атмосферного воздуха, вводимого в горячий газ при нормальных условиях, м³/с; $c_{\text{см}}$, c_{Γ} , $c_{\text{В}}$ – удельная объемная теплоемкость соответственно смеси газа с воздухом, газа и воздуха, Дж/(м³·К); $t_{\text{см}}$, t_{Γ} , $t_{\text{В}}$ – 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/(м³·К). Тогда уравнение (7.3) теплового баланса примет вид

$$(V_{\Gamma} + V_{\text{В}}) \cdot t_{\text{см}} = V_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} + V_{\text{В}} \cdot t_{\text{В}}. \quad (7.4)$$

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

⁷ Практическая работа подготовлена на основе материалов [3]

$$t_{\text{см}} = \frac{V_{\text{Г}} \cdot t_{\text{Г}} + V_{\text{В}} \cdot t_{\text{В}}}{V_{\text{Г}} + V_{\text{В}}}. \quad (7.5)$$

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

$$V_{\text{В}} = \frac{V_{\text{Г}} \cdot (t_{\text{Г}} - t_{\text{см}})}{t_{\text{см}} - t_{\text{В}}}. \quad (7.6)$$

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.

7.2 Примеры расчетов

7.2.1 Пример 1 – Энтальпия газа

Исходные данные:

Имеется газ с температурой $t = 140$ °С. Его удельная теплоемкость $c = 1,4$ кДж/(м³ · К).

Задание:

Определить удельную энтальпию газа.

Решение:

а) Удельная энтальпия газа определяется по формуле (7.2)

$$i = c \cdot t = 1400 \cdot 140 = 196000 \text{ Дж/м}^3.$$

Ответ:

Удельная энтальпия газа составляет 196000 Дж/м³.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 7.1.

Дано:	
$c := 1.4 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость газа, Дж/(м ³ *К)
$t := 140.$	- температура газа, С
Решение:	
$i := c \cdot t = 196000$	- удельная энтальпия, Дж/м ³
Ответ:	
Удельная энтальпия газа составляет $i = 196000$ Дж/м ³	

Рисунок 7.1 – Протокол выполнения примера 1 "Энтальпия газа"

7.2.2 Пример 2 – Температура смеси газов

Исходные данные:

Технологический газ перед очисткой охлаждается воздухом. Температура газа $t_g = 1000$ °С, расход газа $V_g = 0,01$ м³/с. Температура атмосферного воздуха $t_v = 20$ °С, расход воздуха $V_v = 0,02$ м³/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 (7.3)

$$(V_g + V_v) \cdot c_{см} \cdot t_{см} = V_g \cdot c_g \cdot t_g + V_v \cdot c_v \cdot t_v,$$

при условии $c_g = c_v = c_{см}$, определяется температура смеси газа с воздухом в виде (7.5):

$$t_{см} = \frac{V_g \cdot t_g + V_v \cdot t_v}{V_g + V_v} = \frac{0,01 \cdot 1000 + 0,02 \cdot 20}{0,01 + 0,02} = 347 \text{ °С.}$$

Ответ:

Температура смеси газа с воздухом после охлаждения газа перед его очисткой составляет 347 °С.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 7.2.

Дано:	
$t_g := 1000.$	- температура газа, С
$V_g := 0.01$	- расход газа, м ³ /с
$t_v := 20.$	- температура воздуха, С
$V_v := 0.02$	- расход воздуха, м ³ /с
Решение:	
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
Ответ:	
Температура смеси газов составляет $t_{см} = 347$ град. С	

Рисунок 7.2 – Протокол выполнения примера 2 "Температура смеси газов"

7.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 7.1

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 7.2

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 7.3

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 7.4

Определить количество физической теплоты смеси газа и воздуха, если перед смешением поток газ имел теплоту 20 кВт , а поток воздуха – $0,5 \text{ кВт}$.

7.4 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?

8 Охлаждение газа в поверхностных холодильниках. Тепловые расчеты⁸

8.1 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

$$Q = V \cdot (i_1 - i_2) = V \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \text{Вт}, \quad (8.1)$$

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

$$S = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}, \text{м}^2, \quad (8.2)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; Δt – 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:

⁸ Практическая работа подготовлена на основе материалов[3]

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)}, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (8.3)$$

где Δt_{δ} и $\Delta t_{\text{м}}$ – соответственно большая и меньшая разность температур газа и охлаждающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

8.2 Примеры расчетов

8.2.1 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 (8.1)

$$Q = V \cdot c \cdot (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 0,01 \cdot 1,4 \cdot 10^3 \cdot (1000 - 200) = 11200 \text{ Вт}.$$

Ответ:

Количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике составляет 11200 Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 8.1.

Дано:	
$t_{\text{нач}} := 1000.$	- 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)
Решение:	
$\Delta Q := V_{\text{г}} \cdot c \cdot (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 11.2 \times 10^3$	- количество теплоты, Вт
Ответ:	
Количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике составляет	
$\Delta Q = 11200 \text{ Вт}$	

Рисунок 8.1 – Протокол выполнения примера 1 "Охлаждение газа в поверхностном холодильнике"

8.2.2 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/(м² · 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 (8.2)

$$S = \frac{\Delta Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{20 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 350} = 22,9 \text{ м}^2.$$

Ответ:

Необходимая площадь поверхности холодильника для охлаждения газа составляет 22,9 м².

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 8.2.

Дано:	
$\Delta Q := 20 \cdot 10^3$	- количество теплоты, Вт
$k := 2.5$	- коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)
$\Delta t_{sr} := 350.$	- средняя разность температур между газом и воздухом, С
Решение:	
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 ²
Ответ:	
Площадь поверхности холодильника для охлаждения газа составляет $S = 23$ м ²	

Рисунок 8.2 – Протокол выполнения примера 2 "Площадь поверхности холодильника"

8.2.3 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 $\Delta t_6 = 980$ °С, а в конце – $\Delta t_m = 180$ °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 (8.3) 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 8.3.

Дано:	
$\Delta t_{\text{нач}} = 980.$	- начальная разность температур между газом и воздухом, С
$\Delta t_{\text{кон}} = 180.$	- конечная разность температур между газом и воздухом, С
Решение:	
$\Delta t_{\text{sr}} = \frac{\Delta t_{\text{нач}} - \Delta t_{\text{кон}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{нач}}}{\Delta t_{\text{кон}}}\right)} = 472$	- средняя разность температур между газом и воздухом, С
Ответ:	
Средняя разность температур между газом и воздухом составляет $\Delta t_{\text{sr}} = 472$ град.С	

Рисунок 8.3 – Протокол выполнения примера 3 "Средняя разность температур газа и охлаждающей среды в поверхностном холодильнике"

8.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 8.1

Определить количество теплоты, которое отдал газ в поверхностном холодильнике, если расход газа 0,02 м³/с, его удельная теплоемкость 1,3 кДж/(м³·К), а температура газа в начале и в конце холодильника 1200 °С и 100 °С, соответственно.

Задача 8.2

Определить температуру газа на выходе из поверхностного холодильника, если расход газа 0,02 м³/с, его удельная теплоемкость 1,3 кДж/(м³·К), а температура газа в начале холодильника 1200 °С. В процессе теплообмена газ отдал 20 кВт теплоты.

Задача 8.3

Определить температуру газа на входе в поверхностный холодильник, если расход газа 0,02 м³/с, его удельная теплоемкость 1,3 кДж/(м³·К), а температура газа в конце холодильника 100 °С. В процессе теплообмена газ отдал 20 кВт теплоты.

Задача 8.4

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 8.5

Определить площадь поверхности холодильника, через которую необходимо передавать количество теплоты 35 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 8.6

Определить количество теплоты, которое возможно передавать через площадь поверхности холодильника 35 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 8.7

Определить среднюю разность температур газа и охлаждающей среды в холодильнике, если в начале холодильника разность температур $1000 \text{ }^\circ\text{С}$, а в конце – $500 \text{ }^\circ\text{С}$.

8.4 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?

9 Охлаждение газа при непосредственном контакте его с водой⁹

9.1 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 $\sim 25^\circ\text{C}$, артезианской $\sim 15^\circ\text{C}$ и оборотной $30\text{--}35^\circ\text{C}$.

В дальнейших расчетах расход воды будет иметь размерность "кг/с", а расход газа – "м³/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/(м³·К)".

Расход воды на охлаждение газа (V) определяют из уравнения теплового баланса для воды:

$$\begin{aligned} Q &= V \cdot (1 - \psi) \cdot (i_{\text{в.к}} - i_{\text{в.н}}) + V \cdot \psi \cdot [(i_{\text{в.100}} - i_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + (i_{\text{пар}} - i_{\text{пар.100}})] = \\ &= V \cdot (1 - \psi) \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в.к}} - t_{\text{в.н}}) + V \cdot \psi \cdot [c_{\text{в}} \cdot (100 - t_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{пар}} \cdot (t_{\text{г.к}} - 100)], \end{aligned} \quad (9.1)$$

откуда

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{(1 - \psi) \cdot (i_{\text{в.к}} - i_{\text{в.н}}) + \psi \cdot [(i_{\text{в.100}} - i_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + (i_{\text{пар}} - i_{\text{пар.100}})]} = \\ &= \frac{Q}{(1 - \psi) \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в.к}} - t_{\text{в.н}}) + \psi \cdot [c_{\text{в}} \cdot (100 - t_{\text{в.н}}) + Q_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{пар}} \cdot (t_{\text{г.к}} - 100)]}, \text{ кг/с,} \end{aligned} \quad (9.2)$$

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°C (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, $^\circ\text{C}$; ψ – коэффициент испарения воды (доля воды, перешедшая в пар); $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2258$ кДж/кг – теплота испарения 1 кг воды.

⁹ Практическая работа подготовлена на основе материалов [3]

Количество теплоты Q , которое необходимо отнять от газа в процессе его охлаждения, определяют по формуле

$$Q = V_{\Gamma} \cdot (i_{\Gamma,н} - i_{\Gamma,к}) = V_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot (t_{\Gamma,н} - t_{\Gamma,к}), \text{Вт}, \quad (9.3)$$

где V_{Γ} – 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_{Γ} – 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, $^{\circ}\text{C}$.

9.2 Примеры расчетов

9.2.1 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 (9.1) 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 9.1.

Дано:	
$t_{нач} := 20.$	- начальная температура воды, С
$t_{кон} := 50.$	- конечная температура воды, С
$V_{вода} := 10.$	- расход воды, кг/с
$c_{вода} := 4.18 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость воды, Дж/(кг*К)
Решение:	
$\Delta Q := V_{вода} \cdot c_{вода} \cdot (t_{кон} - t_{нач}) = 1.3 \times 10^6$ - количество теплоты, Вт	
Ответ:	
Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет	
$\Delta Q = 1.3 \times 10^6$ Вт	

Рисунок 9.1 – Протокол выполнения примера 1 "Теплота, поглощаемая водой при отсутствии испарения"

9.2.2 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 (9.1)

$$Q = V \cdot \psi \cdot [c_v \cdot (100 - t_{в.н}) + Q_{H_2O} + c_{пар} \cdot (t_{г.к} - 100)] = \\ = 10 \cdot 1 \cdot [4,18 \cdot 10^3 \cdot (100 - 20) + 2258 \cdot 10^3 + 1,9 \cdot 10^3 \cdot (200 - 100)] = 27,8 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

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 9.2.

Дано:	
$t_{в.н} := 20.$	- 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
Решение:	
$\Delta Q := V \cdot [c_v \cdot (100 - t_{в.н}) + r_{исп} + c_{пар} \cdot (t_{г.к} - 100)] = 27.8 \times 10^6$ - количество теплоты, Вт	
Ответ:	
Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет	
$\Delta Q = 27.8 \times 10^6$ Вт	

Рисунок 9.2 – Протокол выполнения примера 2 "Теплота, поглощаемая водой при полном испарении воды"

9.2.3 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 $c_{в} = 4,18$ 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 (9.1)

$$Q = V \cdot (1 - \psi) \cdot c_{в} \cdot (t_{в.к} - t_{в.н}) + V \cdot \psi \cdot [c_{в} \cdot (100 - t_{в.н}) + Q_{H_2O} + c_{пар} \cdot (t_{г.к} - 100)] =$$
$$= 10 \cdot (1 - 0,4) \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot (50 - 20) +$$
$$+ 10 \cdot 0,4 \cdot [4,18 \cdot 10^3 \cdot (100 - 20) + 2258 \cdot 10^3 + 1,9 \cdot 10^3 \cdot (200 - 100)] = 11,9 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет $11,9 \cdot 10^6$ Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 9.3.

Дано:	
$t_{в.н} := 20.$	- 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
$c_{в} := 4.18 \cdot 10^3$	- 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
$\psi := 0.4$	- коэффициент испарения воды
Решение:	
$Q_{вода} := V \cdot [c_{в} \cdot (t_{в.к} - t_{в.н})]$	$= 1.3 \times 10^6$
$Q_{пар} := V \cdot [c_{в} \cdot (100 - t_{в.н}) + r_{исп} + c_{пар} \cdot (t_{г.к} - 100)]$	$= 27.8 \times 10^6$
$\Delta Q := (1 - \psi) \cdot Q_{вода} + \psi \cdot Q_{пар}$	$= 11.9 \times 10^6$
Ответ:	
Количество теплоты, которое заберет вода при прямом контакте с газом составляет	
$\Delta Q = 11.9 \times 10^6$	Вт

Рисунок 9.3 – Протокол выполнения примера 3 "Теплота, поглощаемая водой при частичном испарении воды"

9.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 9.1

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 кг/с , испарение отсутствует. Удельная теплоемкость воды $4,18\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Задача 9.2

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если при расходе воды 10 кг/с вся вода испарилась. Начальная температура воды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а удельная теплоемкость воды $4,18\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, 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) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплота испарения 1 кг воды составляет 2258 кДж/кг .

Задача 9.3

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если при расходе воды 10 кг/с вода не испарялась. Начальная температура воды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а конечная $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельная теплоемкость воды $4,18\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Задача 9.4

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если при расходе воды 10 кг/с испарилось 50% воды. Начальная температура воды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а конечная – $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельная теплоемкость воды $4,18\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, 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) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплота испарения 1 кг воды составляет 2258 кДж/кг .

Задача 9.5

Определить расход воды при прямом контакте с газом для съема у охлаждаемого газа теплоты 2 МВт , если температура воды увеличилась с $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а испарение отсутствует. Удельная теплоемкость воды $4,18\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Задача 9.6

Определить количество теплоты, которое забрала вода при прямом контакте с газом, если температура газа упала с $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход газа составил $10\text{ м}^3/\text{с}$. Удельная теплоемкость газа $1,38\text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$.

9.4 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?

10 Возвращение теплоты в технологический процесс. Тепловые расчеты¹⁰

10.1 Основы расчетов по утилизации теплоты уходящих газов металлургических печей

Уходящие газы печей – ценнейший теплоноситель, обладающий всеми основными признаками, при которых их использование технически возможно и экономически целесообразно. Потери теплоты с уходящими газами составляют 30-40 %, а в ряде случаев доходят до 60-70 % от всей теплоты, выделяемой при сжигании топлива в печах. Физическая теплота уходящих газов определяется их количеством ($V_{yx}, \text{м}^3/\text{с}$), составом и температурой ($t_{yx}, \text{°C}$):

$$M_{yx} = V_{yx} \cdot c_{yx} \cdot t_{yx}, \text{Вт}, \quad (10.1)$$

где $c_{yx}, \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ – удельная теплоемкость газов, зависящая от состава газа (определяется по справочным данным).

Можно обратить внимание, что в формулы для расчета физической теплоты газов и других материалов температура входит в градусах Цельсия, а не Кельвина. Это связано с тем, что температура неразрывно связана с удельной теплоемкостью. А вот удельная теплоемкость определена из эксперимента и приведена в справочниках в интервале температур от 0 °C до t [°C], а не в интервале от 0 К до T [K].

Расход уходящих газов V_{yx} определяется количеством и видом топлива, а также условиями его сжигания. В плавильных печах следует учитывать также выделение газов из шихты. В общем случае объем уходящих газов, приведенный к нормальным условиям, может быть подсчитан по формуле

$$V_{yx} = B_T \cdot V_{п.сг} + G_{ш.м} \cdot V_{т.г}, \quad (10.2)$$

где B_T – расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{п.сг}$ – объем продуктов сгорания на единицу топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $V_{т.г}$ – выход технологических газов на 1 кг шихтовых материалов, $\text{м}^3/\text{кг}$; $G_{ш.м}$ – расход шихтовых материалов, $\text{кг}/\text{с}$.

При определении избытка воздуха в дымовых газах следует учитывать избыток воздуха в горелках и присосы воздуха по длине дымового тракта печного агрегата. Теплоемкость продуктов сгорания зависит от их состава и температуры и находится по справочникам. Температура уходящих газов определяется температурным режимом печи и колеблется в широких пределах, достигая 1600-1800 °C.

В основном теплота уходящих дымовых газов утилизируется с использованием разнообразных теплообменников путем подогрева воздуха и, реже, топлива, которые, в свою очередь, поступают на горелку печи. Таким образом, существенно экономится топливо для создания высоких температур

¹⁰ Практическая работа подготовлена на основе материалов [4]

внутри печи, т.к. теплота дыма возвращается обратно в рабочее пространство печи.

10.1.1 Тепловой баланс печи непрерывного действия

Печи непрерывного действия – это печи, в которых температурный и тепловой режим во времени не изменяются.

Баланс выражается уравнением, связывающим приход и расход теплоты в единицу времени, т.е. в размерности мощности (Вт), а не теплоты (Дж):

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{расх}}, \text{ [Вт]}. \quad (10.3a)$$

Рассмотрим статьи теплового баланса рабочего пространства печи (рис. 10.1) при полном сжигании топлива.

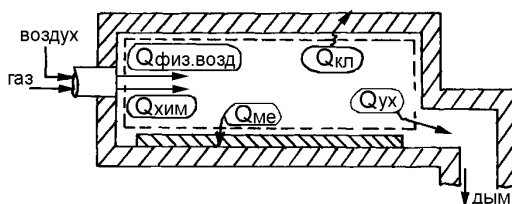


Рисунок 10.1 – Тепловой баланс камеры для нагрева материала

Приход теплоты чаще всего состоит из следующих частей:

– химическая теплота топлива

$$M_{\text{хим}} = V_{\text{т}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}},$$

где $V_{\text{т}}$ – расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания 1 м^3 топлива, определяемая составом топлива, $\text{Дж}/\text{м}^3$;

– теплота, вносимая подогретым воздухом

$$M_{\text{физ.возд}} = V_{\text{т}} \cdot L_{\text{в}}^{\text{д}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}},$$

где $L_{\text{в}}^{\text{д}}$ – удельный расход воздуха на 1 м^3 топлива (определяется составом топлива из расчета горения топлива), $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха (определяется по справочным данным), $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

– теплота, вносимая подогретым топливом

$$M_{\text{физ.т}} = V_{\text{т}} \cdot c_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}},$$

$c_{\text{т}}$ – удельная теплоемкость топлива (определяется по справочным данным), $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ $t_{\text{т}}$ – температура топлива, $^{\circ}\text{C}$.

Расход теплоты состоит из следующих частей:

– теплота, усвоенная нагреваемым материалом $M_{\text{усв}}$;

– потери теплоты с уходящими продуктами горения

$$M_{\text{ух}} = V_{\text{т}} \cdot V_{\text{д}} \cdot c_{\text{д.ух}} \cdot t_{\text{д.ух}},$$

где $V_{\text{д}}$ – удельный выход дыма на 1 м^3 топлива (определяется составом топлива из расчета горения топлива), $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c_{\text{д.ух}}$ – удельная теплоемкость

дыма (определяется по справочным данным), Дж/(м³ · К) $t_{д,ух}$ – температура уходящего дыма, °С;

– потери теплоты из рабочего пространства печи (через кладку, излучением через щели и окна и др.) $M_{пот}$.

Таким образом, уравнение теплового баланса можно представить в следующем виде:

$$M_{хим} + M_{физ.возд} + M_{физ.т} = M_{усв} + M_{ух} + M_{пот}. \quad (10.3б)$$

Здесь $M_{хим}$, $M_{физ.возд}$, $M_{физ.т}$ и $M_{ух}$ зависят от расхода топлива. Поэтому перенесем их в одну часть, а остальные слагаемые в другую часть. Подставляя в уравнение раскрытые выражения, содержащие расход топлива, получим формулу для расчета расхода топлива в явном виде

$$V_T = \frac{M_{усв} + M_{пот}}{Q_H^p + L_B^d \cdot c_B \cdot t_B + c_T \cdot t_T - V_d \cdot c_{д,ух} \cdot t_{д,ух}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (10.4)$$

Несколько слов о слагаемых, входящих в числитель правой части (10.4).

Если окисление материала отсутствует, то теплота, усвоенная нагреваемым материалом определяется по формуле

$$M_{усв} = G \cdot \Delta i_{ме}, [\text{Вт}]. \quad (10.5)$$

где $\Delta i_{ме} = c_{ме,к} \cdot \bar{t}_{мк} - c_{ме,0} \cdot \bar{t}_{м0}$ – удельная теплота, идущая на нагрев материала [Дж/кг]; G – производительность печи, кг/с; $\bar{t}_{м0}$ и $\bar{t}_{мк}$ – среднемассовая температура материала, соответственно, на входе и на выходе из печи, °С; $c_{ме,0}$ и $c_{ме,к}$ – удельная теплоемкость материала при температурах $\bar{t}_{м0}$ и $\bar{t}_{мк}$, Дж/(кг · К).

Величину $\Delta i_{ме}$ иногда называют изменением энтальпии в процессе тепловой обработки материала или тепловым дефицитом.

Мощность тепловых потерь печи складывается из тепловых потерь через кладку $M_{кл}$, излучением через щели и окна $M_{изл}$, потери на охлаждение элементов печи $M_{охл}$ и других неучтенных потерь $M_{неуч}$

$$M_{пот} = M_{кл} + M_{изл} + M_{охл} + M_{неуч}, [\text{Вт}]. \quad (10.6)$$

10.2 Примеры расчетов

10.2.1 Пример 1 – Физическая теплота дымовых газов

Исходные данные:

Имеется тепловое устройство со сжиганием топлива и системой дымоудаления. Расход газов (дыма) составляет $V_{ух} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, температура газов $t_{ух} = 1000 \text{ °С}$. Удельная теплоемкость газов $c_{ух} = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Задание:

Определить физическую теплоту газов (дыма), уходящих из теплового устройства.

Решение:

а) Физическая теплота газов определяется по формуле (10.1)

$$M_{yx} = V_{yx} \cdot c_{yx} \cdot t_{yx} = 0,01 \cdot 1,4 \cdot 10^3 \cdot 1000 = 14000 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Физическая теплота газов составляет 14000 Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 10.2.

Дано:	
$V_{yx} := 0.01$	- расход газа (дыма), м ³ /с
$c := 1.4 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость газа, Дж/(м ³ ·К)
$t_{нач} := 1000.$	- температура газа, С
Решение:	
$Q := V_{yx} \cdot c \cdot t_{нач} = 14 \times 10^3$	- физическая теплота газа, Вт
Ответ:	
Физическая теплота газа (дыма) составляет $Q = 14 \times 10^3$ Вт	

Рисунок 10.2 – Протокол выполнения примера 1 "Физическая теплота дымовых газов"

10.2.2 Пример 2 – Физическая теплота воздуха

Исходные данные:

Имеется тепловое устройство со сжиганием топлива. Расход топлива составляет $V_T = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, удельный расход воздуха на единицу топлива $L_B^D = 10,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$, температура воздуха $t_B = 1000 \text{ °С}$. Удельная теплоемкость воздуха $c_B = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Задание:

Определить теплоту, вносимую подогретым воздухом.

Решение:

а) Расход воздуха

$$V_{возд} = V_T \cdot L_B^D = 0,01 \cdot 10,5 = 0,105 \text{ м}^3/\text{с};$$

б) Физическая теплота воздуха

$$M_{физ.возд} = V_{возд} \cdot c_B \cdot t_B = 0,105 \cdot 1,4 \cdot 10^3 \cdot 1000 = 147 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Теплота, вносимая подогретым воздухом составляет 147000 Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 10.3.

Дано:		
$V := 0.01$	- расход топлива, м ³ /с	
$L_{\text{возд}} := 10.5$	- удельный расход воздуха на ед. топлива, м ³ /м ³	
$c := 1.4 \cdot 10^3$	- удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м ³ ·К)	
$t_{\text{возд}} := 1000.$	- температура воздуха, С	
Решение:		
$V_{\text{возд}} := V \cdot L_{\text{возд}} = 0.105$	- расход воздуха, м ³ /с	
$Q_{\text{возд}} := V_{\text{возд}} \cdot c \cdot t_{\text{возд}} = 147 \times 10^3$	- физическая теплота воздуха, Вт	
Ответ:		
Теплота, вносимая подогретым воздухом составляет $Q_{\text{возд}} = 147 \times 10^3$ Вт		

Рисунок 10.3 – Протокол выполнения примера 2 "Физическая теплота воздуха"

10.2.3 Пример 3 – Теплота, усвоенная материалом

Исходные данные:

Имеется промышленная печь для нагрева материала. Производительность печи 10 кг/с, а удельная теплота, идущая на нагрев материала 800 кДж/кг.

Задание:

Определить теплоту, усвоенную нагреваемым материалом.

Решение:

а) Теплота, усвоенная нагреваемым материалом

$$M_{\text{усв}} = G \cdot \Delta i_{\text{ме}} = 10 \cdot 800 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Ответ:

Теплота, усвоенная нагреваемым материалом составляет $8 \cdot 10^6$ Вт.

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 10.4.

Дано:		
$G := 10.$	- производительность печи, кг/с	
$\Delta i_{\text{ме}} := 800 \cdot 10^3$	- удельная теплота на нагрев материала, Дж/кг	
Решение:		
$M_{\text{усв}} := G \cdot \Delta i_{\text{ме}} = 8 \times 10^6$	- физическая теплота материала, Вт	
Ответ:		
Теплота, усвоенная нагреваемым материалом составляет $M_{\text{усв}} = 8 \times 10^6$ Вт		

Рисунок 10.4 – Протокол выполнения примера 3 "Теплота, усвоенная материалом"

10.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 10.1

Определить физическую теплоту газов (дыма), уходящих из теплового устройства, если расход газов составляет $0,008 \text{ м}^3/\text{с}$, температура газов $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость газов $1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Задача 10.2

Определить расход газов (дыма), уходящих из теплового устройства, если расход топлива составляет $0,008 \text{ м}^3/\text{с}$, а удельный объем продуктов сгорания на единицу топлива $7,8 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Задача 10.3

Определить химическую теплоту топлива, если расход топлива составляет $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, низшая теплота сгорания топлива $35 \text{ МДж}/\text{м}^3$.

Задача 10.4

Определить теплоту, вносимую подогретым воздухом, если расход топлива составляет $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, удельный расход воздуха на единицу топлива $10,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$, температура воздуха $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость воздуха $1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Задача 10.5

Определить теплоту, вносимую подогретым топливом, если расход топлива составляет $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, температура топлива $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость топлива $1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Задача 10.6

Определить теплоту, усвоенную нагреваемым материалом, если производительность печи $5,6 \text{ кг}/\text{с}$, а удельная теплота, идущая на нагрев материала $750 \text{ кДж}/\text{кг}$.

10.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) По какой причине выгодно заниматься утилизацией теплоты уходящих газов печей?
- 2) Как устроено движение газов в рабочем пространстве печи?
- 3) Какие элементы печи имеют самую высокую температуру?
- 4) По какой причине расчет физической теплоты газов производится через температуру в $[\text{ }^\circ\text{C}]$, а не в $[\text{К}]$?
- 5) В каких единицах измерения рассчитываются статьи теплового баланса печи непрерывного действия?
- 6) Какие приходные статьи теплового баланса печи непрерывного действия?
- 7) Какие расходные статьи теплового баланса печи непрерывного действия?
- 8) Как называется произведение удельной теплоемкости на температуру?
- 9) Какая величина чаще всего определяется из расчетного теплового баланса печи или другого теплового устройства?
- 10) Какие слагаемые включаются в понятие мощности тепловых потерь?

11 Движение частицы пыли в неподвижной среде. Гидравлические расчеты¹¹

11.1 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

$$P = C \cdot F \cdot \frac{\rho_r \cdot w^2}{2} = C \cdot F \cdot P_{\text{дин}}, \text{ [Н]} \quad (11.1)$$

где C – аэродинамический коэффициент; F – площадь проекций частицы на плоскость, нормальную к направлению движения, м^2 ; w – скорость движения частицы относительно среды, м/с ; ρ_r – плотность вещества окружающей среды, 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, м ; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; μ – 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 11.1.

Таблица 11.1 – Аэродинамический коэффициент "С" в зависимости от Re

№	Режим течения	Re	C
1	ламинарный	≤ 2	$24/Re$
2	промежуточный	2-500	$18,5/Re^{0,6}$
3	турбулентный	> 500	0,44

¹¹ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

При ламинарном режиме для частиц сферической формы после подстановки в уравнение (11.1) $F = \pi \cdot d^2 / 4$ и развернутого значения величины аэродинамического коэффициента получим

$$P = \frac{24 \cdot \mu}{w \cdot d \cdot \rho_r} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_r \cdot w^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w. \quad (11.2)$$

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 ρ_q и ρ_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

$$w_B = \frac{d^2 \cdot \rho_q \cdot g}{18 \cdot \mu}. \quad (11.3)$$

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:

$$M = \frac{P}{g} = \frac{3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_B}{g}. \quad (11.4)$$

Если известна скорость витания частиц, то из уравнения (11.3) 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 ρ_r и вязкости среды μ каждой скорости витания соответствует свой размер частиц той или иной плотности.

11.2 Примеры расчетов

11.2.1 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 (11.1). В той формуле C – аэродинамический коэффициент, который зависит от числа Рейнольдса в соответствии с таблицей 11.1.

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 11.1.

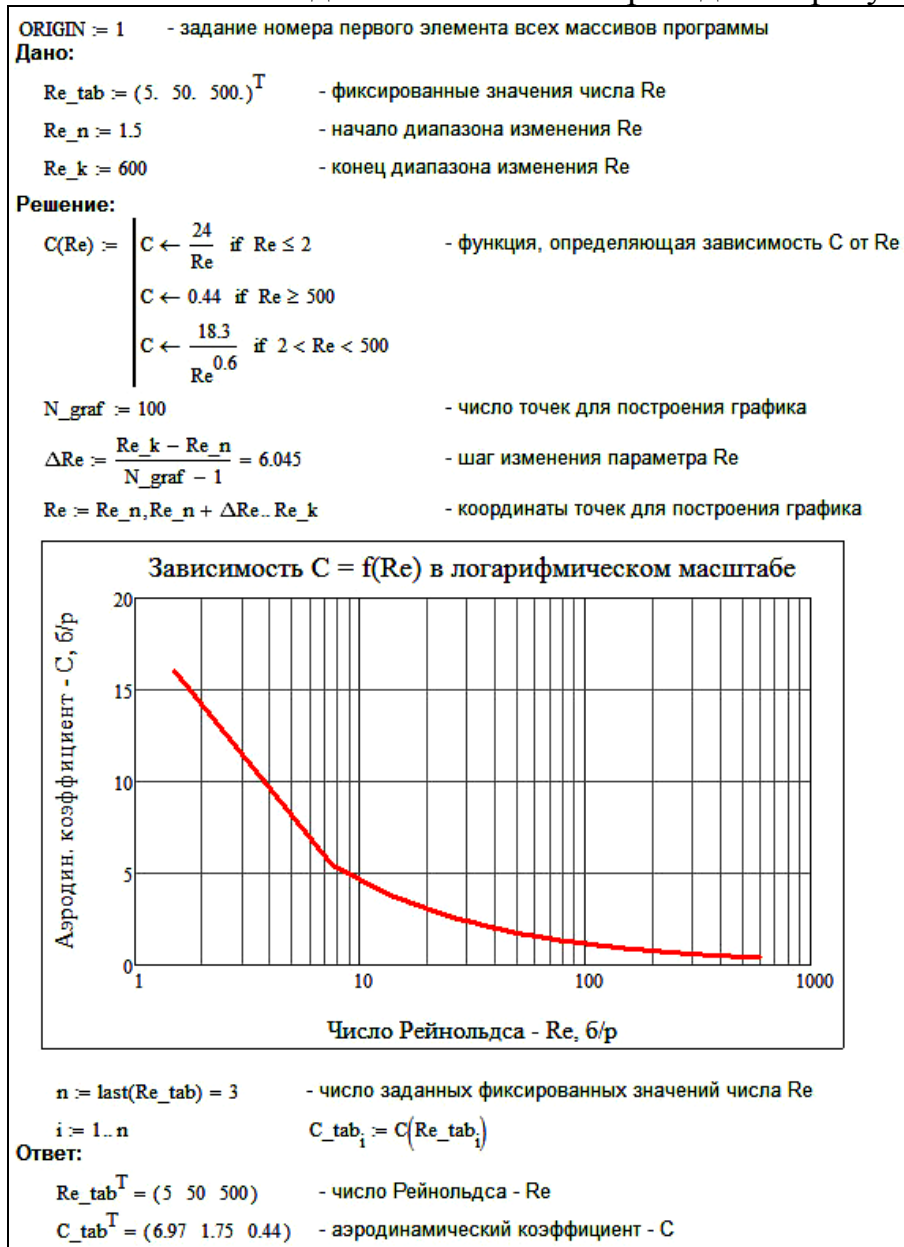


Рисунок 11.1 – Протокол выполнения примера 1 "Аэродинамический коэффициент"

Ответ:

Значения C в фиксированных точках при $Re = \{5; 50; 500\}$ составляют:
 $C = \{6,97; 1,75; 0,44\}$.

11.2.2 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 "ρ" в виде $W = f(d, \rho)$ и построить её график при изменении диаметра "d" от 0 до 100 мкм при фиксированных значениях плотности пыли "ρ" = {500; 1000; 2000} кг/м³. Найти значения W в фиксированных точках при $d = \{2; 20; 100\}$ мкм для частиц пыли плотностью 500 кг/м³.

Решение:

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 11.2.

Ответ:

Скорость витания частиц пыли плотностью $\rho = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$ и диаметром $d = \{2; 20; 100\}$ мкм составляет, соответственно: $W = \{0,0001; 0,0064; 0,1593\}$ м/с.

11.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 11.1

Определить динамическое давление запыленного газа плотностью 1,2 кг/м³ на частички пыли, если скорость движения частицы относительно газа 1,5 м/с.

Задача 11.2

Определить силу сопротивления движению пыли в неподвижном газе, если динамическое давление газа 7 Па, площадь проекции частицы на плоскость, нормальную к направлению движения 0,000001 м², аэродинамический коэффициент 0,3.

Задача 11.3

Определить число Рейнольдса при движении частицы в неподвижной среде, если диаметр частицы 1 мм, коэффициент кинематической вязкости газа $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, относительная скорость частицы 2,5 м/с.

Задача 11.4

Определить режим течения (ламинарный, промежуточный или турбулентный) при движении частицы в неподвижной среде, если диаметр частицы 2 мм, коэффициент кинематической вязкости газа $12,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, относительная скорость частицы 0,6 м/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 ρ , кг/м³

$d_n := 0 \cdot 10^{-6}$ - 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, м²/с

$g := 9.81$ - ускорение свободного падения, м/с²

$\rho_v := 1.293$ - плотность воздуха, кг/м³

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 ρ

$N_graf := 100$ - 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/м³

Рисунок 11.2 – Протокол выполнения примера 2 "Скорость витания"

Задача 11.5

Определить скорость витания частиц пыли плотностью 1000 кг/м³ и диаметром 2 мкм в неподвижной воздушной среде, если кинематическая вязкость воздуха $13,23 \cdot 10^{-6}$ м²/с, плотность воздуха 1,293 кг/м³.

Задача 11.6

Определить скорость витания частиц пыли плотностью 2000 кг/м³ и диаметром 1,5 мкм в неподвижной воздушной среде, если динамическая вязкость воздуха $17 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Задача 11.7

Определить диаметр частиц пыли плотностью 700 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 11.8 (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 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 кг/м^3 . Динамическая вязкость воздуха $17 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

11.4 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?

12 Осаждение частиц пыли в камерах и газоходах. Гидравлические расчеты¹²

12.1 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. 12.1).

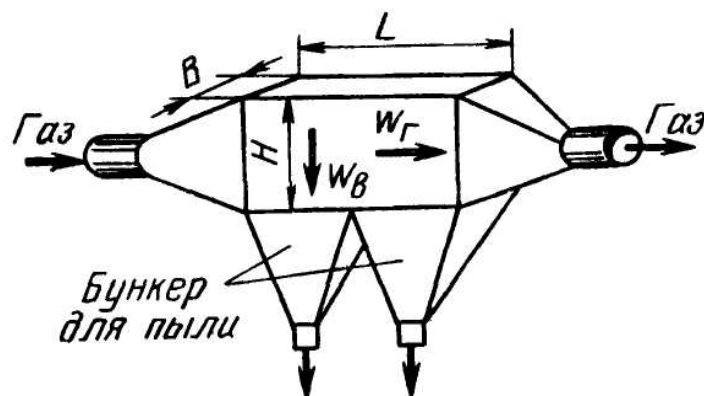


Рисунок 12.1 – Схема пылеосадительной камеры

При приближенном расчете осадительных камер принимают, что частицы движутся вдоль камеры со скоростью $w_{П}$, равной скорости газового потока $w_{Г}$, и одновременно опускаются вниз со скоростью, равной скорости витания $w_{В}$. Для осаждения частица должна достичь дна раньше, чем газовый поток вынесет ее из камеры, поэтому время осаждения частицы $t = H / w_{В}$ не должно превышать времени ее пребывания в камере $t_1 = L / w_{Г}$:

$$H / w_{В} < L / w_{Г}. \quad (12.1)$$

Выражая скорость газа через расход $V_{Г}$, деленный на площадь поперечного сечения камеры $H \cdot B$, получим $H / w_{В} = L \cdot H \cdot B / V_{Г}$, откуда с учетом выражения для скорости витания частиц

$$w_{В} = \frac{d^2 \cdot \rho_{ч} \cdot g}{18 \cdot \mu},$$

¹² Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

следует, что

$$V_{\Gamma} = L \cdot B \cdot w_B = L \cdot B \cdot \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}{18 \cdot \mu}. \quad (12.2)$$

Из формулы (12.2) 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_{Γ} :

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot V_{\Gamma}}{L \cdot B \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}}. \quad (12.3)$$

Формулы (12.2) и (12.3) показывают, что решающую роль при осаждении играет площадь дна камеры, увеличение которой существенно улучшает условия осаждения. Уменьшение высоты камеры без увеличения площади дна её 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 (12.2, 12.3) 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

$$\rho_1 = \frac{M_1}{22,4}; \rho_2 = \frac{M_2}{22,4}; \dots \rho_n = \frac{M_n}{22,4}, \quad (12.4)$$

где n – количество компонентов в смеси; M_1, M_2, \dots, M_n – молярные массы отдельных компонентов смеси, кг/кмоль; 22,4 – молярный объем, м³ / кмоль

и плотность смеси газов

$$\rho_{\text{см}} = a_1 \cdot \rho_1 + a_2 \cdot \rho_2 + \dots + a_n \cdot \rho_n, \quad (12.5)$$

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

$$\mu_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{см}}}{a_1 \cdot \frac{\rho_1}{\mu_1} + a_2 \cdot \frac{\rho_2}{\mu_2} + \dots + a_n \cdot \frac{\rho_n}{\mu_n}}, \text{ Па}\cdot\text{с} \quad (12.6)$$

где $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – динамическая вязкость отдельных газов в смеси, Па·с.

При рабочей температуре T [К] динамическая вязкость компонентов смеси определяется из выражения

$$\mu_i = \mu_{0,i} \frac{273 + C_i}{T + C_i} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n. \quad (12.7)$$

Входящие в (12.7) значения $\mu_{0,i}$ (вязкость при 0°C) и константы C_i для различных газов приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Параметры, характеризующие вязкость газов

№	Газ	Химическая формула	Вязкость μ_0 (при 0°C и давлении 101325 Па)	Константа С
1	Воздух	79% N_2 + 21% O_2	$17,5 \cdot 10^{-6}$	124
2	Азот	N_2	$17 \cdot 10^{-6}$	114
3	Водяной пар	H_2O	$10 \cdot 10^{-6}$	961
4	Диоксид углерода	CO_2	$13,7 \cdot 10^{-6}$	254
5	Кислород	O_2	$20,3 \cdot 10^{-6}$	131
6	Оксид углерода	CO	$16,6 \cdot 10^{-6}$	100
7	Диоксид серы	SO_2	$11,7 \cdot 10^{-6}$	396
8	Водород	H_2	$8,42 \cdot 10^{-6}$	73
9	Метан	CH_4	$10,3 \cdot 10^{-6}$	162
10	Аммиак	NH_3	$9,18 \cdot 10^{-6}$	626

12.2 Примеры расчетов

12.2.1 Пример 1 – Динамическая вязкость газа

Исходные данные:

Имеется шлаковик мартеновской печи в виде осадительной камеры. В шлаковик входит газ – запыленный дым заданного состава:

Компоненты	N_2	H_2O	CO_2	O_2	Σ
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 12.1а-12.1б.

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 12.1а – Протокол выполнения примера 1 "Динамическая вязкость газа" (начало)

Ответ:

Значения динамической вязкости смеси газов в фиксированных точках при температурах $t_r = \{0; 1000; 1400\}$ °С составляют: $\mu = \{15,38 \cdot 10^{-6}; 49,15 \cdot 10^{-6}; 58,16 \cdot 10^{-6}\}$ Па·с.

12.2.2 Пример 2 – Расчет шлаковика мартеновской печи

Исходные данные:

Имеется шлаковик мартеновской печи в виде осадительной камеры (рис. 12.1). 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 $t_r = 1400$ °С. Динамическая вязкость газа $\mu = 58,16 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Плотность частиц пыли $\rho_n = 2000$ кг/м³. Плотность газа при нормальных условиях $\rho_r = 1,3$ кг/м³. Расход газа $V_r = 56000$ м³/ч. Запыленность газового потока (концентрация пыли) на входе в шлаковик $Z_{\text{вход}} = 30$ мг/м³.

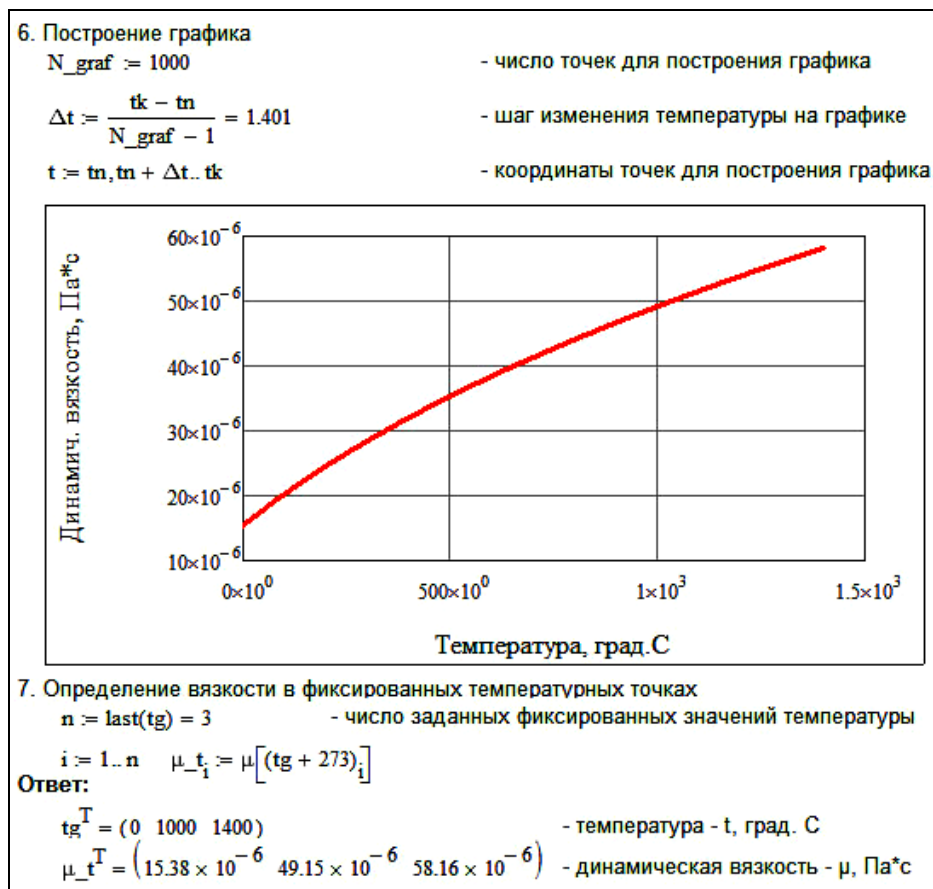


Рисунок 12.1б – Протокол выполнения примера 1 "Динамическая вязкость газа" (окончание)

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 12.2.

Ответ:

Степень очистки газа от пыли в шлаковике составляет 12,1 %. Запыленность потока газа на выходе из шлаковика составляет 26 мг/м³.

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 ³
$g := 9.81$	- ускорение свободного падения, м/с ²
$Z_{\text{вход}} := \frac{30}{1000}$	- концентрация пыли (запыленность) на входе в камеру, кг/м ³
$d := 100 \cdot 10^{-6}$	- диаметр частиц пыли, м
$\rho_g := 1.3$	- плотность газа, кг/м ³
$V_g := \frac{56000}{3600}$	- расход газа при нормальных условиях, м ³ /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
- ³

$$Z_{\text{выход}} := \frac{M_{p_k}}{V_g} = 0.026$$

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/м³.

Рисунок 12.2 – Протокол выполнения примера 2 "Расчет шлаковика мартеновской печи"

12.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 12.1

Определить плотность воздуха, состоящего из 21% кислорода и 79% азота.

Задача 12.2

Определить плотность газообразного аммиака NH_3 .

Задача 12.3

Определить плотность метана.

Задача 12.4

Определить расход газа через поперечное сечение канала площадью 2 м^2 , если скорость потока газа 20 м/с .

Задача 12.5

Определить действительную скорость газа при температуре газа 546 К , если скорость газа при нормальных условиях 2 м/с .

Задача 12.6

Определить площадь поперечного сечения пылеосадительной камеры для прохода газа, если её высота 2 м , а ширина 4 м .

Задача 12.7

Определить время пребывания частиц пыли в пылеосадительной камере постоянного сечения, если её длина 4 м , а скорость потока газа 4 м/с .

Задача 12.8

Определить степень очистки газа от пыли в пылеосадительной камере, если концентрация пыли до камеры 55 мг/м^3 , а после камеры 50 мг/м^3 .

Задача 12.9 (повышенной сложности)

Используя исходные данные примера 2 "Расчет шлаковика мартеновской печи" создать функцию зависимости степени очистки газа (η) от диаметра частиц пыли (d) и с её помощью построить график $\eta = f(d)$ при изменении диаметра от $d = 0 \text{ мкм}$ до $d = 100 \text{ мкм}$.

12.4 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?

13 Расчет улавливания пыли в циклонах¹³

13.1 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° и выходит из циклона через расположенную по оси выхлопную трубу (рис. 13.1). 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. 13.2), различающиеся между собой углом наклона входного патрубка к горизонту:

- а) ЦН-15 с углом наклона 15° (в том числе укороченный – ЦН-15У);
- б) ЦН-11 с углом наклона 11° . Он имеет повышенную эффективность по сравнению с ЦН-15, но обладает повышенным гидравлическим сопротивлением;
- в) ЦН-24 с углом наклона 24° . 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°C и избыточном давлении не более 2,5 кПа.

¹³ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

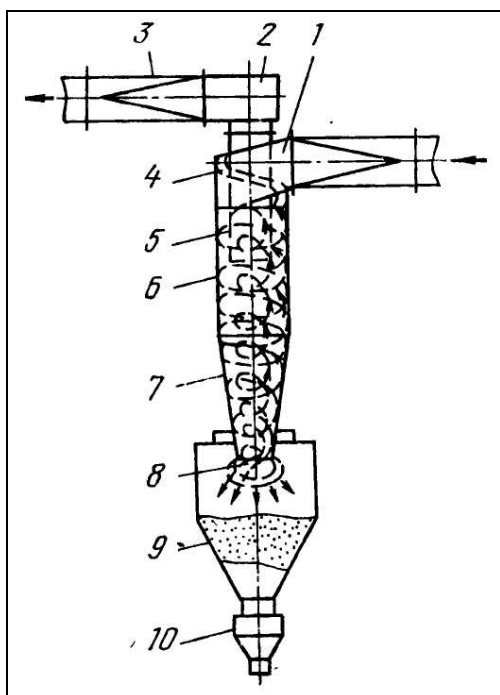


Рисунок 13.1 – Схема циклона:

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

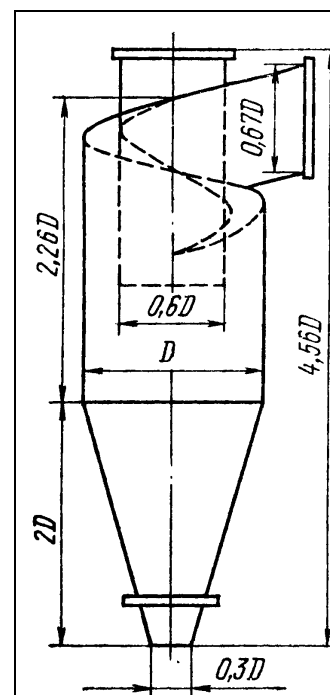


Рисунок 13.2 – Схема циклона серии ЦН

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:

$$P_{ц} = \frac{M \cdot w_{г}^2}{R} = \frac{\pi \cdot d_{п}^3}{6} \cdot \rho_{ч} \cdot \frac{w_{г}^2}{R}, \quad (13.1)$$

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:

$$\frac{\pi \cdot d_{\text{п}}^3}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot \frac{w_{\text{г}}^2}{R} = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_{\text{max}} \cdot \quad (13.2)$$

Таким образом, предельная скорость, которой может достигнуть частица пыли в радиальном направлении, равна

$$w_{\text{max}} = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}{18 \cdot \mu \cdot R} \cdot \quad (13.3)$$

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

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}{18 \cdot \mu \cdot R} \cdot \quad (13.4)$$

После разделения переменных и интегрирования в пределах от R_1 до R_2 и от 0 до t получим

$$R_2^2 - R_1^2 = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2}{9 \cdot \mu} \cdot t,$$

откуда время прохождения частицей пути $R_2 - R_1$ равно

$$t = 9 \cdot \mu \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{г}}^2} \cdot \quad (13.5)$$

Диаметр частицы, успевающей за время t пройти путь $R_2 - R_1$, будет равен

$$d = \frac{3}{w_{\text{г}}} \cdot \sqrt{\mu \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{t \cdot \rho_{\text{ч}}}} \cdot \quad (13.6)$$

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 μ 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 13.1-13.4.

Таблица 13.1 – Значения 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° $R/d = 1,5$	
	ξ_{500}^C	$\xi_{500}^П$	ξ_{500}^C	$\xi_{500}^П$	ξ_{500}^C	$\xi_{500}^П$	ξ_{500}	$L/d=0-12$ ξ_{500}^C	$L/d>12$ ξ_{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: ξ_{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 13.2 – 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 13.3 – Поправка K_2 на влияние запыленности газа Z

Тип циклонов	K_2 при запыленности газа						
	0	10 г/м ³	20 г/м ³	40 г/м ³	80 г/м ³	120 г/м ³	150 г/м ³
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 13.4 – 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

13.2 Примеры расчетов

13.2.1 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 $\rho_{г,0} = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$; температура газа $t = 110 \text{ }^\circ\text{C}$; 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 $z_{\text{нач}} = 50 \text{ г}/\text{м}^3$; характеристика дисперсного состава пыли: средний диаметр частиц $d_m = 10 \text{ мкм}$; логарифм дисперсии по размеру частиц $\lg \sigma_{\text{ч}} = 0,7$; плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 3000 \text{ кг}/\text{м}^3$. 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 $w_t = 3,5 \text{ м}/\text{с}$; вязкость газа $\mu_t = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; диаметр $D_t = 0,6 \text{ м}$; плотность частиц пыли $\rho_t = 1930 \text{ кг}/\text{м}^3$. 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 рисунках 13.1а-13.1б.

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 $16,7 \text{ г}/\text{м}^3$.

13.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 13.1

Определить плотность воздуха при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$, если плотность воздуха при нормальных условиях составляет $1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Задача 13.2

Определить плотность воздуха при температуре $273 \text{ }^\circ\text{C}$, если плотность воздуха при нормальных условиях составляет $1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Задача 13.3

Определить плотность воздуха при давлении 202650 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:

$V_0 := \frac{4100.}{3600.}$ - расход газа при норм. условиях, м³/с

$\rho_{g0} := 1.293$ - плотность газа при норм. условиях, кг/м³

$\mu := 24.8 \cdot 10^{-6}$ - 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/м³

$d_m := 10.$ - усредненный диаметр частиц пыли, мкм

$ig\sigma := 0.7$ - характеристика дисперсного состава пыли, б/р

$\rho_p := 3000.$ - плотность частиц пыли, кг/м³

$W_{opt} := 3.5$ - 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/м³:

$$\rho_g := \rho_{g0} \cdot \frac{273}{T_g} \cdot \frac{(P_{bar} - P_r)}{P_{bar}} = 0.92$$

2. Расход газа при рабочих условиях, м³/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

$$D_{st} := \frac{round(D \cdot 10, 0)}{10} = 0.800$$

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 13.1а – Протокол выполнения примера 1 "Расчет циклона" (начало)

Задача 13.4

Определить объемный расход воздуха при давлении 202650 Па, если расход воздуха при нормальных условиях составляет 1,5 м³/с.

Задача 13.5

Определить действительный объемный расход воздуха при оптимальной (экономичной) скорости потока 3,5 м/с, если диаметр циклона 0,5 м.

Задача 13.6

Определить гидравлическое сопротивление циклона, если коэффициент сопротивления равен 100, скорость потока 4 м/с, а плотность потока газа 1,2 кг/м³.

Задача 13.7

Определить степень очистки газа в циклоне, если начальная концентрация пыли составляет 50 г/м³, а конечная 30 г/м³.

6. Поправочный коэффициент (K1), учитывающий влияние диаметра циклона ЦН-15, определяется из таблицы K1D:

$$K1_D := \begin{pmatrix} 150 & 200 & 300 & 400 & 500 \end{pmatrix}^T \quad \begin{array}{l} \text{- диаметр циклона, мм} \\ \text{- коэффициент K1} \end{array}$$

$$K1 := \text{interp}\left(\frac{K1_D^{(1)}}{1000}, K1_D^{(2)}, D_st\right) = 1 \quad \text{- выбор K1 интерполяцией из табл. K1_D}$$

7. Поправочный коэффициент (K2), учитывающий влияние запыленности газа, определяется из таблицы K2_Z:

$$K2_Z := \begin{pmatrix} 1 & 10 & 20 & 40 & 80 & 120 & 150 \end{pmatrix}^T \quad \begin{array}{l} \text{- запыленность (концентрация пыли), г/м3} \\ \text{- коэффициент K2} \end{array}$$

$$K2 := \text{interp}(K2_Z^{(1)} \cdot 10^{-3}, K2_Z^{(2)}, Z_нач) = 0.907 \quad \text{- выбор K2 интерполяцией из табл. K2_Z}$$

8. Коэффициент сопротивления циклона, б/р

$$\xi := K1 \cdot K2 \cdot \xi_{500} = 141$$

9. Гидравлическое сопротивление циклона, Па

$$\Delta p := \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot W_g^2}{2} = 655$$

10. Константы при определении размера улавливаемых частиц (справочно для циклона ЦН-15):

$$d_{t50\%} := 4.5 \text{ мкм}; \quad W_t := 3.5 \text{ м/с}; \quad \mu_t := 22.2 \cdot 10^{-6} \text{ Па*с}; \quad D_t := 0.6 \text{ м}; \quad \rho_t := 1930 \text{ кг/м3};$$

$$lg\sigma_t := 0.352$$

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 осаднения "X", б/р

$$X := \frac{\log\left(\frac{d_m}{d_{50\%}}\right)}{\sqrt{lg\sigma_t^2 + lg\sigma^2}} = 0.428$$

13. Степень очистки газа в циклоне определяется кумулятивной функцией на основе нормального закона распределения по формуле:

$$\eta = \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp(-0.5 \cdot x^2) dx \right). \text{ Функция в Маткаде является стандартной - спном(x):}$$

$$\eta := \text{спном}(X) = 0.666 \quad \text{или в процентах: } \eta \cdot 100 = 66.6 \%$$

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 13.16 – Протокол выполнения примера 1 "Расчет циклона" (окончание)

13.4 Контрольные вопросы по практической работе

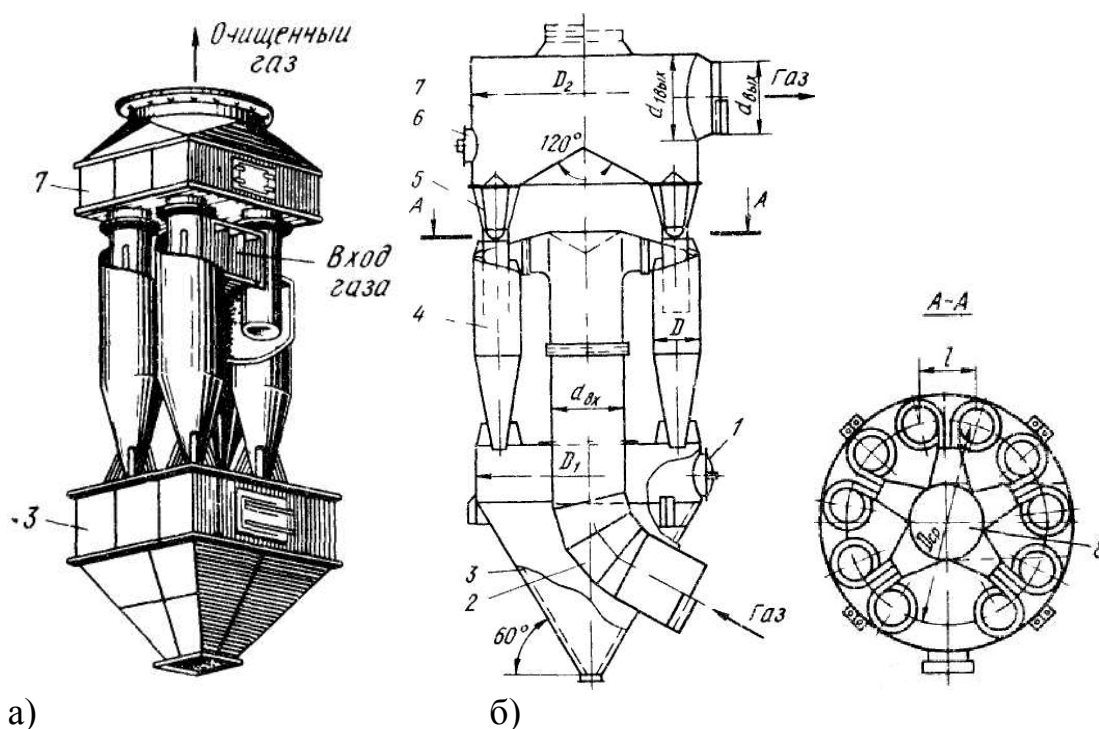
- 1) При каком размере пылевых частиц циклон работает с максимальной эффективностью?
- 2) В результате действия каких сил частицы пыли, взвешенные в потоке газа, отбрасываются на стенки корпуса циклона и выпадают из потока?
- 3) Зависит ли эффективность работы циклона от диаметра циклона?

- 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?

14 Определение гидравлического сопротивления и размеров циклона. Гидравлические расчеты¹⁴

14.1 Основы расчетов процессов в групповом центробежном пылеуловителе

Для очистки большого количества газа используют группу циклонов которые устанавливают на общий бункер (рис. 14.1). 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. 14.1,а) и круговой (рис. 14.1,б). Число циклонов при прямоугольной компоновке не превышает 8, а при круговой – не более 14.



а)

б)

Рисунок 14.1 – 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

При расчете сухих центробежных циклонов определяют их основные

¹⁴ Практическая работа подготовлена на основе материалов [3]

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. 14.1. Последующим расчетом проверяют и уточняют эти табличные данные.

Таблица 14.1 – Ориентировочные значения количества очищаемого газа в циклонах конструкции НИИОгаза

Диаметр циклона D, мм	Количество очищаемого газа при числе циклонов в группе, м ³ /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. 14.1 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 м³/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 расчете 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; ξ_{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 ξ_{500} определяются по тем же формулам как и

для одного одиночного циклона. При групповой компоновке добавляется коэффициент K_3 .

14.2 Примеры расчетов

14.2.1 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 $\rho_{г,0} = 1,3 \text{ кг/м}^3$; влагосодержание воздуха $f = 6 \text{ г/м}^3$; температура воздуха $t = 100 \text{ °С}$; 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 $z_{\text{нач}} = 2 \text{ г/м}^3$; плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 2500 \text{ кг/м}^3$. 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 рисунке 14.1а-14.1в.

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 $0,21 \text{ г/м}^3$.

14.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 14.1

Определить плотность воздуха при влажности 10 г/м^3 , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет $1,293 \text{ кг/м}^3$.

Задача 14.2

Определить плотность воздуха при температуре 273 °С и давлении 202650 Па , если плотность воздуха при нормальных условиях составляет $1,293 \text{ кг/м}^3$.

ORIGIN := 1 - задание номера первого элемента всех массивов программы

Дано:

Тип циклона в соответствии 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

$S := \text{submatrix}(\text{Состав}, 1, \text{rows}(\text{Состав}), 2, \text{cols}(\text{Состав})) = \begin{pmatrix} 45 & 33 & 18 & 14.5 & 7.5 & 4 \\ 38 & 20 & 20 & 10 & 7 & 5 \end{pmatrix}$

Размер := $(S^T)^{(1)}$ Размер^T = (45 33 18 14.5 7.5 4) - диаметр частиц пыли, мкм

Доля := $(S^T)^{(2)}$ Доля^T = (38 20 20 10 7 5) - % доля частиц в общей массе, %

Рисунок 14.1а – Протокол выполнения примера 1 "Расчет группового циклона" (начало)

Коэффициент местного сопротивления (ξ) 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	".."	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: ξ_{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:

$V_{g\Sigma} := \frac{20000}{3600} = 5.556$ - расход газа при норм. условиях, м³/с

$f := \frac{6}{1000}$ - влагосодержание воздуха, кг/м³

$\rho_{g0} = 1.3$ - плотность воздуха при норм. условиях, кг/м³

$\mu := 21.7 \cdot 10^{-6}$ - 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/м³

$\rho_p = 2500$. - плотность частиц пыли, кг/м³

$K3 = 35$ - прямоугольная компоновка циклонов в группе

Решение:

1. Плотность воздуха с поправкой на влажность, кг/м³

$$\rho_{g_{w1}} := \frac{\rho_{g0} + f}{1 + \frac{f}{0.804}} = 1.296$$

2. Плотность воздуха с поправкой на давление и температуру, кг/м³

$$\rho_g := \rho_{g_{w1}} \cdot \frac{273}{T_g} \cdot \frac{P_{bar} - P_r}{P_{bar}} = 0.947$$

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 ³ /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 $V_{g\Sigma} \cdot 3600 = 20000$ м³/ч выбираем количество циклонов:

$n = 6$

4. Расход воздуха, приходящийся на 1 циклон, м³/с

$$V_g := \frac{V_{g\Sigma}}{n} = 0.926 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{или} \quad V_g \cdot 3600 = 3333 \text{ м}^3/\text{ч}$$

5. Диаметр одного циклона, м

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot V_g}{\pi \cdot W_{opt}}} = 0.58$$

Рисунок 14.16 – 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, %

$M_i := 0 \quad i := 2..last(\text{Доля}) \quad M_i := M_{i-1} + \text{Доля}_{i-1} \quad M^T = (0 \ 38 \ 58 \ 78 \ 88 \ 95)$

- 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 осаждения "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 осаждения "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 $[\text{Размер}]^T = (45 \ 33 \ 18 \ 14.5 \ 7.5 \ 4)$ мкм] составляет, соответственно, $\eta(\text{Размер})^T = (99.2 \ 98.0 \ 91.7 \ 87.5 \ 66.7 \ 39.9) \ %$.

Рисунок 14.1в – Протокол выполнения примера 1 "Расчет группового циклона" (окончание)

Задача 14.3

Определить давление воздуха внутри циклона, если атмосферное давление составляет 101325 Па, а разрежение внутри циклона от действия дымососа 50 Па.

Задача 14.4

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 14.5

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 14.6

Определить гидравлическое сопротивление циклона, если коэффициент сопротивления равен 100, а динамическое давление воздушного потока на входе в циклон 25 Па.

Задача 14.7

Определить концентрацию пыли на выходе из циклона, если степень очистки газа в циклоне 95 %, а начальная концентрация пыли $50 \text{ г} / \text{м}^3$.

14.4 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?

15 Захват частиц пыли жидкостью¹⁵

15.1 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.).

15.1.1 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 η_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:

$$\eta_3 = \frac{F_{\text{п}}}{F_1}.$$

¹⁵ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

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 η_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/м³; w_0 – скорость потока, м/с; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц, м; μ – 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 $F_1 = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4}$)

$$N_t = F_{\text{п}} \cdot w_0 \cdot z_{\text{нач}} = \eta_3 \cdot F_1 \cdot w_0 \cdot z_{\text{нач}} = \eta_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \cdot w_0 \cdot z_{\text{нач}}, \left[\frac{\text{кол. частиц}}{\text{с}} \right], \quad (15.1)$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе, м²; F_1 – площадь проекции элемента на плоскость, нормальную к направлению движения потока, м²; η_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/м³.

Количество частиц, захваченных на единицу длины пути газового потока:

$$N_L = \frac{N_t}{w_0} = \eta_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \cdot z_{\text{нач}}, \left[\frac{\text{кол. частиц}}{\text{м}} \right]. \quad (15.2)$$

Следовательно, количество частиц, захваченных 1 м³ распыленной воды на том же участке пути, равно

$$N_V = \frac{N_L}{V_{\text{к}}} = \frac{\eta_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \cdot z_{\text{нач}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^3}{6}} = \frac{3}{2} \cdot \eta_3 \cdot \frac{z_{\text{нач}}}{d_{\text{к}}}, \left[\frac{\text{кол. частиц}}{\text{м} \cdot \text{м}^3} \right]. \quad (15.3)$$

Здесь $V_{\text{к}}$ – объем капли воды в виде шара, м³.

Как видно из формулы (15.3), эффективность улавливания при прочих равных условиях возрастает с уменьшением диаметра капли и может достичь высоких значений даже для мелких частиц.

15.1.2 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 $E_{ад}$:

$$\frac{m \cdot w_{отс}^2}{2} > E_{ад}, \quad (15.4)$$

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

$$P_{ад} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot d_{ч} \text{ и } E_{ад} = \int \overline{P_{ад}} dh, \quad (15.5)$$

где $d_{ч}$ – диаметр частиц, м; h – зазор между поверхностью стенки и частицей, м.

В результате приближенного интегрирования выражения (15.5) можно найти граничное значение скорости удара, при котором еще возможно прилипание частиц ($h = 1 \text{ мкм}$; $\rho_{ч} = 3000 \text{ кг/м}^3$):

$$w_{удар} \leq \frac{2,490 \cdot 10^{-9}}{d_{ч}}, \text{ м/с}, \quad (15.6)$$

где $d_{ч}$ – размер частицы, м.

При наличии на поверхности пленки жидкости условия прилипания существенно улучшаются (схема захвата дана на рис. 15.1а). В этом случае сила адгезии может быть определена по формуле

$$P_{ад} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч}}{1 + \text{tg}(\alpha/2)} \cdot \cos \varphi, \quad (15.7)$$

где α – угол, определяющий смоченную часть поверхности частицы; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $d_{ч}$ – диаметр частицы; φ – краевой угол смачивания, зависящий от физико-химических свойств и дисперсности пыли (рис. 15.1б).

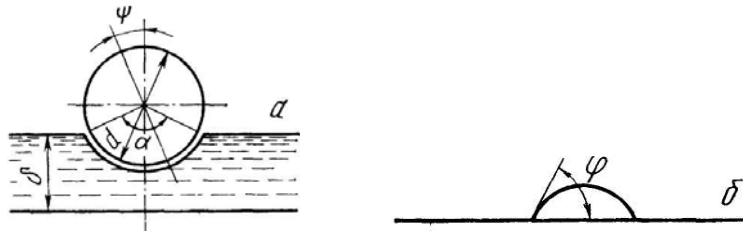


Рисунок 15.1 – Захват частиц пыли пленкой жидкости:
а – схема захвата; б – краевой угол смачивания

Как видно из рисунке 15.1 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

$$P_{ад} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч} \quad (15.8)$$

Для минеральных масел ($\sigma \approx 25 \cdot 10^{-3}$ Н/м) при толщине пленки $\delta = 0,5 \cdot d_{ч}$

$$P_{ад} = 0,157 \cdot d_{ч}, \text{ Н}, \quad (15.9)$$

где $d_{ч}$ – размер частицы, м.

Сравнивая выражения (15.5) и (15.9), 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:

$$w_{удар} \leq \frac{73,50 \cdot 10^{-6}}{d_{ч}} \quad (15.10)$$

Таким образом, наличие водяной пленки позволяет увеличить максимальную скорость частиц возле твердой поверхности почти в 30000 раз (см. формулы 15.6 и 15.10).

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

$$w_{удар} \leq \frac{1}{\cos \psi} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{\rho_{ч} \cdot d_{ч}}}, \quad (15.11)$$

где ψ – угол между направлением движения частицы и нормалью к поверхности жидкости в точке удара, $\psi = 0-90^\circ$; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $d_{ч}$ – диаметр частицы; $\rho_{ч}$ – плотность частицы.

При $\psi = 0$, т.е. при движении частицы по нормали к поверхности жидкости,

$$w_{\text{удар}} \leq \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}}}}. \quad (15.12)$$

При больших углах " ψ " 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.

15.2 Примеры расчетов

15.2.1 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/м³, 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 15.2.

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/м³

$w_0 := 7$ - 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 15.2 – 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.

15.2.2 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/м³, 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

$$P_{ад} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч} = 2 \cdot \pi \cdot 73 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

2. Сила адгезии на сухой поверхности

$$P_{ад}^{сух} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot d_{ч} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 96 \cdot 10^{-12} \text{ Н.}$$

3. Отношение силы адгезии на водяной и сухой поверхностях

$$\frac{P_{ад}}{P_{ад}^{сух}} = \frac{3,7 \cdot 10^{-6}}{96 \cdot 10^{-12}} = 38223.$$

4. Максимальная скорость удара запыленного потока на поверхности, покрытой водой, при которой еще возможно прилипание частиц пыли

$$w_{удар} = \frac{73,50 \cdot 10^{-6}}{d_{ч}} = \frac{73,50 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-6}} = 9,2 \text{ м/с.}$$

5. Максимальная скорость удара запыленного потока на сухой поверхности, при которой еще возможно прилипание частиц пыли

$$w_{удар}^{сух} = \frac{2,49 \cdot 10^{-9}}{d_{ч}} = \frac{2,49 \cdot 10^{-9}}{8 \cdot 10^{-6}} = 0,00031 \text{ м/с.}$$

6. Отношение скорости удара на водяной и сухой поверхностях

$$\frac{w_{удар}}{w_{удар}^{сух}} = \frac{9,2}{0,00031} = 29518.$$

Протокол выполнения задания в MathCAD приведен на рисунке 15.4.

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.

15.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 15.1

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/м³, динамическая вязкость потока 22 · 10⁻⁶ Па·с.

Задача 15.2

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/м³
 $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ - коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м

Решение:

- Сила адгезии (сила прилипания) при хорошо смачиваемой поверхности, Н
 $P_{\text{adg}} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d_{ч} = 3.7 \times 10^{-6}$
- Сила адгезии (сила прилипания) на сухой поверхности, Н
 $P_{\text{adg_suh}} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot d_{ч} = 96 \times 10^{-12}$
- Отношение силы адгезии на водяной и сухой поверхностях
 $\Delta PP = \frac{P_{\text{adg}}}{P_{\text{adg_suh}}} = 38223$
- Максимальная скорость удара запыленного потока на поверхности, покрытой водяной пленкой, при которой еще возможно прилипание частиц пыли, м/с
 $w_{\text{удар}} = \frac{73.5 \cdot 10^{-6}}{d_{ч}} = 9.2$
- Максимальная скорость удара запыленного потока на сухой поверхности, при которой еще возможно прилипание частиц пыли, м/с
 $w_{\text{удар_suh}} = \frac{2.49 \cdot 10^{-9}}{d_{ч}} = 0.00031$
- Отношение скорости удара потока на водяной и сухой поверхностях
 $\Delta ww = \frac{w_{\text{удар}}}{w_{\text{удар_suh}}} = 29518$

Ответ:

- 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
- 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 15.4 – Протокол выполнения примера 2 "Расчет захвата частиц пыли пленкой жидкости"

Задача 15.3

Определить объем капли воды в виде шара, если диаметр капли 8 мкм.

Задача 15.4

Определить коэффициент захвата пыли водяным элементом в виде шара, если площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе равна 45 мкм², а площадь сечения шара составляет 50 мкм².

Задача 15.5

Определить площадь сечения набегающего потока, из которого все частицы пыли полностью осаждаются на водяном элементе в виде шара, если площадь сечения шара составляет 50 мкм², а коэффициент захвата пыли равен 0,95.

Задача 15.6

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 мкм², скорость потока 7 м/с, а количество частиц перед началом очистки равно 100 миллионов частиц/м³.

Задача 15.7

Определить массу сферической частицы диаметром 12 мкм и плотностью 2500 кг/м³.

Задача 15.8

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 15.9

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 15.10

Определить скорость удара гидрофобной (плохо смачиваемой) 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/м³, коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma \approx 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

15.4 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 счет 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?

16 Тепло- и массообмен в мокрых пылеуловителях¹⁶

16.1 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_g " и над жидкостью " $p_{ж}$ " 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:

$$\pm Q_1 = K_T \cdot F \cdot \Delta T + Q_{\text{пот}}, \text{ Вт} \quad (16.1)$$

где K_T – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К); F – поверхность, через которую происходит теплообмен, м²; ΔT – средняя разность температур между газом и жидкостью, К; $Q_{\text{пот}}$ – потеря теплоты в окружающую среду.

Уравнение массообмена имеет вид

$$\pm \Delta M = \beta_m \cdot F \cdot (p_g - p_{ж}), \text{ кг/с}, \quad (16.2)$$

где β_m – коэффициент массообмена, с/м.

Процессы массообмена сопровождаются выделением (при конденсации) или поглощением (при испарении) теплоты Q_2 :

$$\pm Q_2 = r \cdot \Delta M = r \cdot \beta_m \cdot F \cdot (p_g - p_{ж}), \text{ Вт}, \quad (16.3)$$

где $r = 2260$ кДж/кг – удельная теплота парообразования.

В приведенных уравнениях (16.1) и (16.2) знак "плюс" ставится в случаях перехода теплоты и массы от газа к жидкости ($T_g > T_{ж}$ и $p_g > p_{ж}$), а знак "минус" в случаях перехода теплоты и массы от жидкости к газу ($T_g < T_{ж}$ и $p_g < p_{ж}$). 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 ($T_g > T_{ж}$, $p_g > p_{ж}$). При этом конденсируется часть водяного пара в газе, в результате чего газ подсушивается. Вода при этом нагревается, получая, теплоту в количестве " $Q_1 + Q_2$ ".

Испарительное охлаждение происходит при взаимодействии горячего не

¹⁶ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2]

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.

16.2 Примеры расчетов

16.2.1 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 16.1.

Дано:	
$F := 2.5$	- площадь водяной поверхности, м ²
$K_{\tau} := 35.$	- коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)
$t_g := 240.$	- температура газа, град. С
$t_{\text{вода}} := 20.$	- температура воды, град. С
$Q_{\text{пот}} := 0.$	- 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
Решение:	
1. Перепад температур между газом и водой, град. С	
$\Delta T := t_g - t_{\text{вода}} = 220$	
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	
$Q := Q_1 + Q_2 = 25352$	
Ответ:	
Количество теплоты, передаваемое от газа к воде в мокром пылеуловителе составляет	
$Q = 25352$ Вт	

Рисунок 16.1 – Протокол выполнения примера 1 "Расчет передачи теплоты между запыленным газом и водой при конденсационном охлаждении"

16.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 16.1

Определить количество теплоты, передаваемое прямым теплообменом в мокром пылеуловителе от газа к воде, если площадь воды 3,5 м², коэффициент теплопередачи от газа к воде 28 Вт/(м²·К), средняя разность температур между газом и жидкостью 160 °С. Потери теплоты в окружающую среду равны нулю.

Задача 16.2

Определить количество теплоты, передаваемое в мокром пылеуловителе от газа к воде при конденсации части водяных паров газа в количестве 0,0033 кг/с.

Задача 16.3

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.

16.4 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?

17 Процессы тепло- и массообмена в скруббере¹⁷

17.1 Общие сведения о расчетах аппаратов с промывкой газа жидкостью

В зависимости от способа диспергирования жидкости пылеулавливающие аппараты этого типа делят на три группы:

- а) форсуночные скрубберы, где диспергирование жидкости осуществляется с помощью форсунок за счет энергии орошающей жидкости;
- б) скрубберы Вентури, в которых дробление жидкости происходит за счет энергии турбулентного потока;
- в) динамические газопромыватели, где разбрызгивание жидкости происходит за счет механической энергии вращающегося ротора.

17.1.1 Форсуночные скрубберы

В форсуночных скрубберах достаточно эффективно улавливаются частицы пыли размером $> 10-15$ мкм. Частицы размером < 5 мкм практически не улавливаются. Скрубберы получили широкое распространение в металлургии, преимущественно для охлаждения и увлажнения газа, необходимых для последующей тонкой очистки газа.

Скрубберы, используемые в металлургии, мало отличаются друг от друга. Они имеют форму цилиндра высотой 20-30 метров и диаметром 6-8 метров.

В верхней части скруббера (рис. 17.1) размещено несколько поясов орошения с большим числом форсунок, создающих равномерный поток мелко диспергированных капель, движущихся под действием силы тяжести вниз. Нижняя часть скруббера, оканчивающаяся конусом, заполнена водой, уровень которой поддерживается постоянным. Подводимый запыленный газ направляют на зеркало воды для осаждения наиболее крупных частиц пыли, после чего, распределяясь по всему сечению скруббера, газ движется вверх навстречу потоку капель воды. В процессе промывки капли жидкости захватывают частицы пыли и коагулируют. Образовавшийся шлам собирается в нижней части скруббера, откуда непрерывно удаляется промывочной водой.

Параллельно с очисткой газ, проходящий через скруббер, охлаждается чаще всего до $40-50$ °С и увлажняется обычно до состояния насыщения. Скорость газа в шахте скруббера принимают равной $0,8-1,5$ м/с. При больших скоростях начинается капельный унос влаги, что способствует образованию отложений на выходном патрубке скруббера и в газопроводах.

Удельный расход воды на скруббер обычно составляет $0,5-1,5$ кг/м³ газа (до $3-6$ кг/м³ газа). Гидравлическое сопротивление полых скрубберов не превышает 250 Па.

¹⁷ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2, 3]

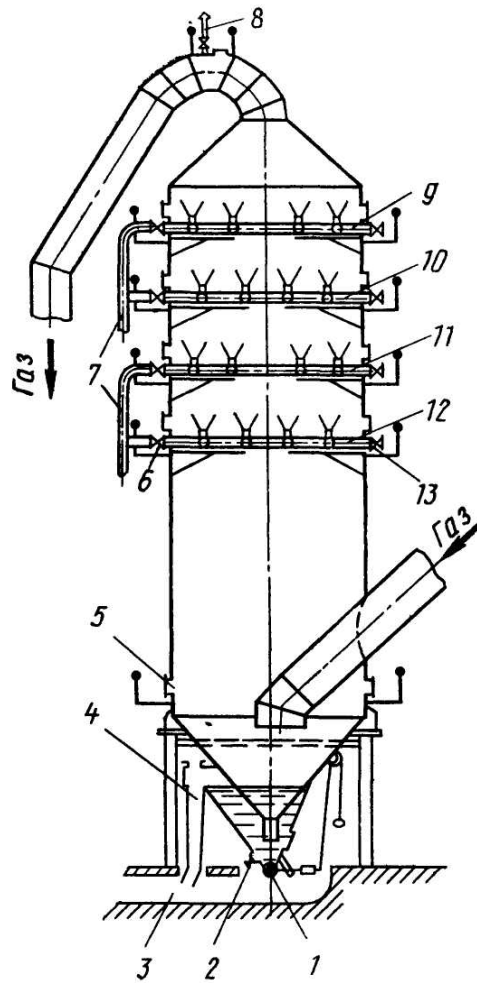


Рисунок 17.1 – Общий вид форсуночного скруббера для охлаждения и увлажнения доменного газа:

1 – клапан с контргрузом; 2 – смывной патрубок; 3 – сливной канал; 4 – гидрозатвор; 5 – люк; 6 – регулирующие задвижки; 7 – подвод воды к зонам орошения; 8 – свеча; 9-12 – зоны орошения; 13 – промывочные задвижки

При орошении горячего газа холодной водой в скруббере естественно идут тепло- и массообменные процессы. Так как газ входит в скруббер обычно не насыщенным влагой, то в нижней части скруббера идет испарительное охлаждение. Испаряющаяся вода увеличивает влагосодержание газа до тех пор, пока при какой-то температуре он не становится насыщенным. Все это время охлаждение газа протекает при постоянной энтальпии, так как образующийся пар подмешивается к газу, возвращая ему теплоту, затраченную в процессе парообразования. Температура воды все это время также остается постоянной и равной температуре мокрого термометра, так как теплота, получаемая водой от газа, полностью расходуется на парообразование. В момент достижения газом состояния насыщения парообразование прекращается. В период испарительного охлаждения температура газа снижается наиболее интенсивно.

В верхней части скруббера протекает процесс конденсационного охлаждения.

С момента насыщения газа водяными парами дальнейшее охлаждение его

вызывает конденсацию части паров. Выделяющаяся при этом теплота, как и теплота, передаваемая воде за счет разности температур газа и воды, затрачивается на нагрев воды, который продолжается до тех пор, пока температура воды не достигнет температуры мокрого термометра. Эта стадия процесса сопровождается уменьшением энтальпии и влагосодержания газа.

Кривые, характеризующие изменения температуры газа и воды, энтальпии (теплосодержания) и влагосодержания газа по высоте скруббера, приведены на рисунке 17.2.

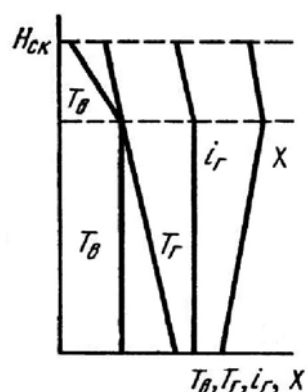


Рисунок 17.2 – Схематическое изображение процессов по высоте форсуночного скруббера:

T_{θ} – температура воды; $T_{г}$ – температура газа; $i_{г}$ – удельная энтальпия газа; x – влагосодержание газа

Граница между испарительным и конденсационным режимами охлаждения газа в скруббере зависит от плотности орошения "U", представляющей собой количество орошающей воды, приходящейся на 1 м^2 сечения скруббера в единицу времени [обычно $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$].

Количество теплоты Q , кВт, передаваемого в скруббере от газа воде, пренебрегая потерями теплоты, может быть подсчитано из выражения

$$Q = V_{\text{сух}} \cdot (I_1 - I_2) = V_{\text{сух}} \cdot [c_p \cdot (t_1 - t_2) + f_1 \cdot (i_1 - i_2)], \quad (17.1)$$

где $V_{\text{сух}}$ – объемный расход сухих газов, $\text{м}^3 / \text{с}$; I_1 и I_2 – энтальпия газов на входе в скруббер и выходе из него, $\text{Дж} / \text{м}^3$; c_p – теплоемкость сухих газов при постоянном давлении, $\text{Дж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$; t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры газов, $^{\circ}\text{C}$; i_1 и i_2 – начальная и конечная энтальпии водяных паров, содержащихся в газах, $\text{Дж} / \text{м}^3$; f_1 – начальное влагосодержание газа, $\text{кг} / \text{м}^3$.

После подстановки теплоты испарения и удельной теплоемкости водяного пара энтальпия водяного пара определяется через температуру пара в виде

$$i_1 = (2480 + 1,96 \cdot t_1) \cdot 10^3; i_2 = (2480 + 1,96 \cdot t_2) \cdot 10^3, \text{ Дж / м}^3.$$

Среднюю разность температур между газом и водой Δt_{cp} находят, принимая конечную температуру воды $t_{\text{кон}}$ близкой к температуре мокрого термометра $t_{\text{м}}$ (обычно $t_{\text{кон}}$ на 5-10 градусов ниже):

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(t_1 - t_{\text{кон}}) - (t_2 - t_{\text{нач}})}{\ln \frac{t_1 - t_{\text{кон}}}{t_2 - t_{\text{нач}}}}, \quad (17.2)$$

где $t_{\text{нач}}$ – начальная температура воды.

Температура мокрого термометра находится по данным таблицы 17.1.

Таблица 17.1 – Температура мокрого термометра, °С

Влажность газа – f , г/м ³	Начальная температура газа, °С						
	100	200	300	400	500	750	1000
25	38,5	49,5	57	62	65,5	72,5	77,5
50	44	53,5	59,5	64	67,5	74	78,5
100	52,5	59	63,5	68	70,5	76,5	80,5
200	61	66,5	70	72,5	75,5	79,5	–
300	68	71,5	74	78,5	–	–	–

Наиболее неопределенной величиной является коэффициент теплопередачи в скруббере, так как поверхность, к которой его следует относить (суммарная поверхность капель), трудноопределима и в значительной степени условна. Поэтому при расчетах приходится пользоваться полученными на практике для аналогичных условий значениями коэффициента теплопередачи, отнесенного к единице объема скруббера [$K_v = 60-240$ Вт/(м³ · К)].

При приближенных подсчетах для определения величины K_v можно пользоваться эмпирической формулой, которая получена Г.Ф. Алексеевым и В.А.Оленевым опытным путем при исследовании охлаждения и очистки доменного газа водой

$$K_v = [14,7 + 96,7 \cdot \lg(U)] \cdot \rho_0 \cdot w_0, \quad (17.3)$$

где U – плотность орошения, составляющая примерно 10-20 м³/(м² · ч); ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; w_0 – скорость газа при нормальных условиях, м/с.

Объем скруббера $V_{\text{скр}}$, м³ определяют исходя из условий теплообмена по известному выражению

$$V_{\text{скр}} = \frac{Q}{K_v \cdot \Delta t_{\text{cp}}}. \quad (17.4)$$

Необходимый расход воды M_B на скруббер исчисляют по количеству теплоты, переданной от газа воде:

$$M_B = \frac{Q}{\varphi \cdot (i_{\text{пар}} - i_{\text{нач}}) + (1 - \varphi) \cdot (i_{\text{кон}} - i_{\text{нач}})}, \quad (17.5)$$

где φ – коэффициент испарения воды (обычно $\varphi \approx 0,5$); $i_{\text{пар}}$ – энтальпия насыщенного пара при температуре t_2 , Дж/кг; $i_{\text{нач}}$, $i_{\text{кон}}$ – соответственно начальная и конечная энтальпии воды, Дж/кг.

Чаще всего для распыливания воды в скрубберах используются эвольвентные форсунки (рис. 17.3), которые отличаются друг от друга диаметром сопла. Если известно избыточное давление воды перед форсункой, то расход воды на одну эвольвентную форсунку может быть определен из рисунка 17.4. Например, при избыточном давлении воды 2,0 ати (0,2 МПа) при диаметре сопла $d_c = 20,0$ мм максимальный расход воды составляет около $12,0 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

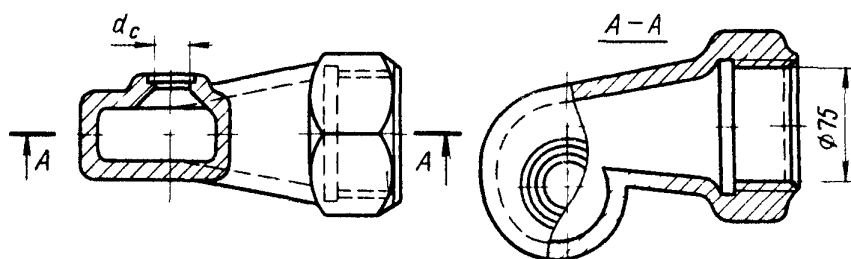


Рисунок 17.3 – Схема эвольвентной форсунки с входным диаметром 75 мм (d_c – диаметр сопла)

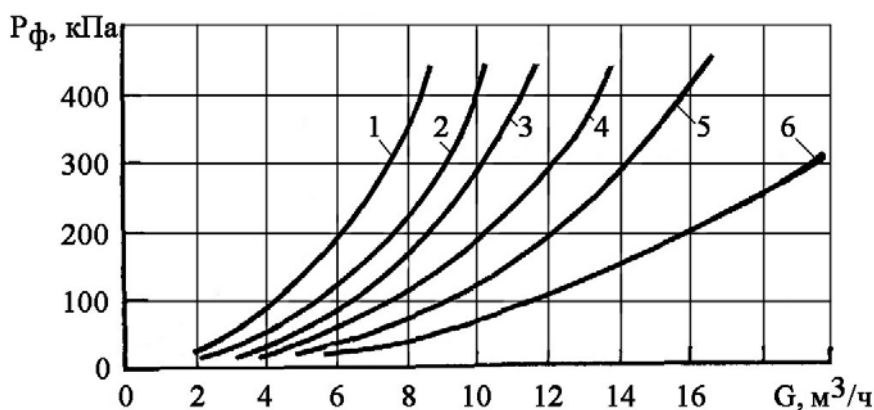


Рис. 17.4 – Расходная характеристика эвольвентной форсунки (зависимость избыточного давления P_ϕ перед форсункой от расхода воды G) при различных диаметрах сопла d_c :

1 – 12 мм; 2 – 15 мм; 3 – 16 мм; 4 – 18 мм; 5 – 20 мм; 6 – 25 мм

Влажесодержание газа на выходе из скруббера находят по I-x диаграмме

влажного воздуха (рис. 17.5). I-x диаграмма, построена для влажного воздуха, находящегося при барометрическом давлении 100 кПа (745 мм рт. ст.).

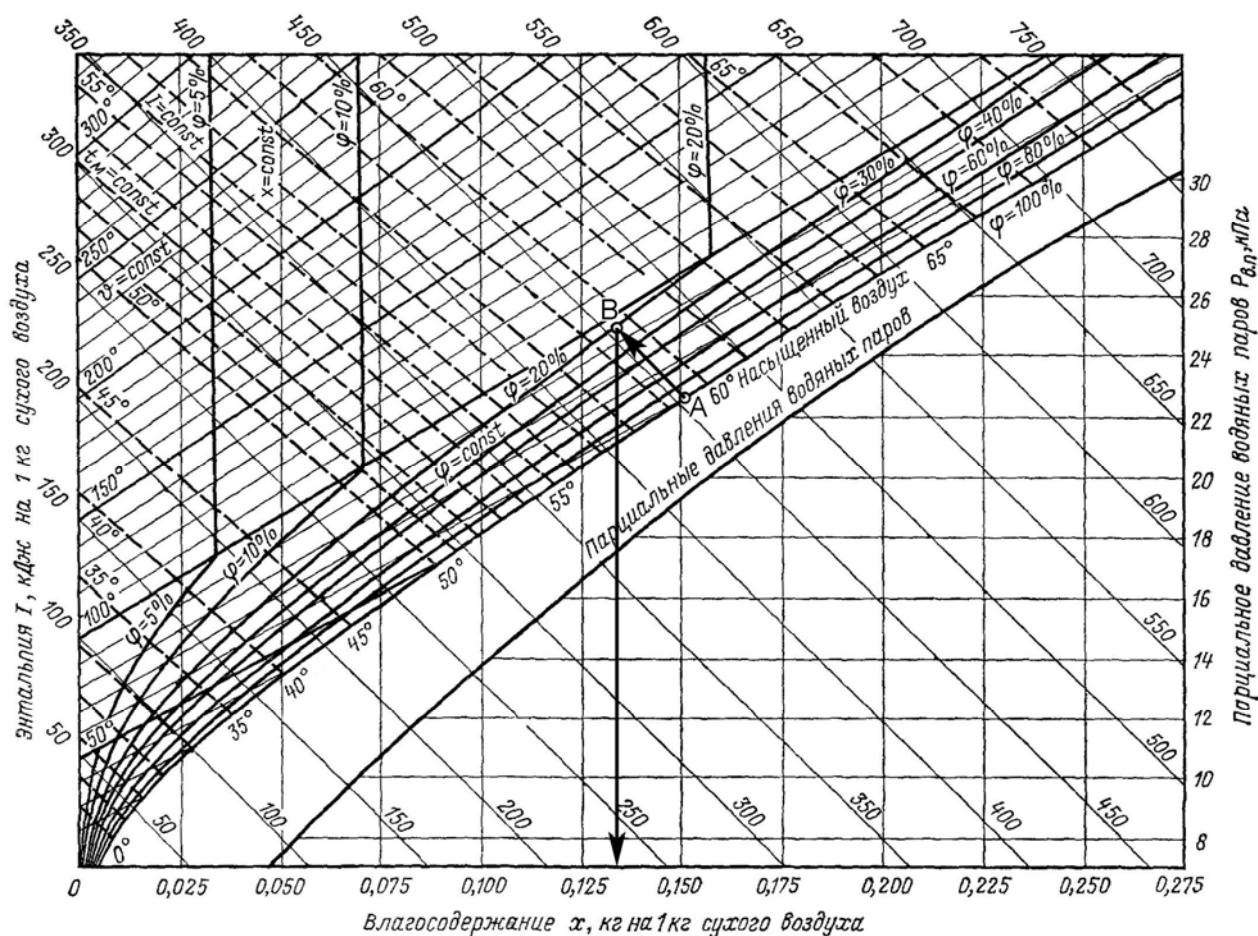


Рисунок 17.5 – I-x диаграмма влажного воздуха

По оси ординат диаграммы отложена энтальпия влажного воздуха I [кДж/кг сухого воздуха].

Для лучшего использования площади диаграммы ось абсцисс проведена под углом 135° к оси ординат. На ней отложены значения абсолютной влажности x [кг /кг сухого воздуха]. Соответствующие точки спроектированы на горизонтальную (условную) ось x .

На диаграмме нанесены линии постоянных значений x , идущие вертикально; постоянных значений I , идущие под углом 135° к оси ординат; постоянных температур воздуха t и постоянных значений относительной влажности φ . Температура t иначе называется температурой "сухого термометра", хотя в действительности это температура влажного ненасыщенного газа.

Кривая для $\varphi = 100\%$ является пограничной, точки на ней соответствуют состоянию насыщенного воздуха. Область под кривой $\varphi = 100\%$ является областью влажного пара (область "тумана").

Под кривой $\varphi = 100\%$ построена линия парциальных давлений водяного пара $P_{в.п} = f(x)$. Значения $P_{в.п}$ можно прочесть на правой крайней ординате диаграммы.

Кроме того, на диаграмму нанесены пунктиром линии постоянных температур "мокрого термометра" t_m , идущие под небольшим углом к линиям $I = \text{const}$. В случае насыщенности парами воздуха ($\varphi = 100\%$) "мокрый термометр" (т.е. термометр, измерительный конец которого увлажнен) покажет ту же температуру, что и сухой. Поэтому изотермы t и t_m для одинаковых температур на кривой $\varphi = 100\%$ пересекаются.

Объемный расход газа на выходе из скруббера, $\text{м}^3/\text{с}$, равен

$$V_{\text{сух},2} = V_{\text{сух}} \cdot \left(1 + \frac{f_2}{\rho_{\text{вод.пар}}}\right) \cdot \frac{T_2}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_r} \quad (17.6)$$

Здесь f_2 – конечное влагосодержание газа, $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$f_2 = x_2 \cdot \rho_{\text{г,сух},0} \quad (17.7)$$

где p_0 – давление при нормальных условиях ($p_0 = 101325 \text{ Па}$); p_r – давление газа, Па ; T_0 – температура при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$); T_2 – температура газа, К ; x_2 – абсолютная влажность [кг/кг сухого воздуха] газа на выходе из скруббера; $\rho_{\text{г,сух},0}$ – плотность сухого газа при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{вод.пар}}$ – плотность водяного пара ($\rho_{\text{вод.пар}} = 0,804 \text{ кг}/\text{м}^3$).

Задаваясь скоростью газа на выходе из скруббера по условиям допустимого капельного уноса воды в пределах $w_r = 0,8-1,5 \text{ м}/\text{с}$, определяют необходимый диаметр скруббера D .

По известному диаметру скруббера и его расчетному объему находят активную высоту скруббера.

По данным практики, с точки зрения строительной прочности, рекомендуется выдерживать соотношение между высотой скруббера H и его диаметром D в районе 2,5. Хотя встречаются скрубберы и с отношением H/D около 4.

17.2 Примеры расчетов

17.2.1 Пример 1 – Расчет полого форсуночного скруббера

Исходные данные:

Имеется полый скруббер для первичной очистки и охлаждения влажного газа производительностью $V_0 = 50000 \text{ м}^3/\text{ч} = 13,89 \text{ м}^3/\text{с}$. Газ охлаждается с $t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Химический состав сухого газа: $\% \text{CO} = 57\%$, $\% \text{N}_2 = 21\%$, $\% \text{CO}_2 = 22\%$. Начальное влагосодержание газа $f_1 = 25 \text{ г}/\text{м}^3$, избыточное давление газа перед скруббером $p_{\text{изб}} = 49000 \text{ Па}$, барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$, температура воды, поступающей на форсунки в скруббере $t_{\text{вода,н}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Тип форсунок – эвольвентные с входным диаметром 75 мм и соплом 25,3 мм. Избыточное давление воды перед форсункой $\Delta p = 20 \text{ ати} = 2$

МПа. Плотность орошения водой сечения скруббера $U = 15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Реальная скорость газа в скруббере $w_r = 1 \text{ м}/\text{с}$. Коэффициент испарения воды в результате теплообмена между газом и водой $\varphi = 0,5$. Справочно: удельная массовая теплоемкость компонентов газа при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$: $C_{\text{CO}} = 1050 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $C_{\text{N}_2} = 1040 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $C_{\text{CO}_2} = 836 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $C_{\text{H}_2\text{O}} = 2010 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Задание:

Рассчитать габариты и количество водяных форсунок полого скруббера.

Решение:

1. Плотность водяных паров

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{22,4} = \frac{18}{22,4} = 0,804 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

2. Расход сухого газа на входе в скруббер

$$V_{\text{сух}} = V_0 \cdot \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} + f_1} = 13,89 \cdot \frac{0,804}{0,804 + 0,025} = 13,47 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Плотности отдельных компонент в газе (CO , N_2 , CO_2)

$$\rho_{\text{CO}} = \frac{\mu_{\text{CO}}}{22,4} = \frac{28}{22,4} = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\rho_{\text{N}_2} = \frac{\mu_{\text{N}_2}}{22,4} = \frac{28}{22,4} = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{22,4} = \frac{44}{22,4} = 1,964 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

4. Удельная объемная теплоемкость сухого газа

$$C_{\text{г,сух}} = C_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}} \cdot \frac{\% \text{CO}}{100} + C_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2} \cdot \frac{\% \text{N}_2}{100} + C_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot \frac{\% \text{CO}_2}{100} =$$

$$= 1050 \cdot 1,25 \cdot \frac{57}{100} + 1040 \cdot 1,25 \cdot \frac{21}{100} + 836 \cdot 1,964 \cdot \frac{22}{100} = 1382 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

5. Удельная энтальпия водяного пара:

– при начальной температуре газа:

$$i_1 = r_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{H}_2\text{O},0} \cdot t_1 = 2480 \cdot 10^3 + 1960 \cdot 350 = 3166000 \text{ Дж}/\text{кг};$$

– при конечной температуре газа:

$$i_2 = r_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{H}_2\text{O},0} \cdot t_2 = 2480 \cdot 10^3 + 1960 \cdot 95 = 2666200 \text{ Дж}/\text{кг},$$

где $r_{\text{H}_2\text{O}} = 2480 \text{ кДж}/\text{кг}$ – теплота испарения воды;

$C_{\text{H}_2\text{O},0} = 1960 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – удельная массовая теплоемкость водяного пара при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Количество теплоты, которое отдает газ в процессе охлаждения

$$Q = V_{\text{сух}} \cdot [C_{\text{г,сух}} \cdot (t_1 - t_2) + f_1 \cdot (i_1 - i_2)] =$$

$$= 13,47 \cdot [1382 \cdot (350 - 95) + 0,025 \cdot (3166000 - 2666200)] = 4,917 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

7. Температура мокрого термометра (согласно таблицы 17.1)

$$t_M = 59,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

8. Температура воды на выходе из скруббера (она на 5-10 градусов меньше температуры мокрого термометра). Для удобства дальнейших расчетов примем ее на 9,5 градусов меньше t_M

$$t_{\text{вода,к}} = t_M - 9,5 = 59,5 - 9,5 = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

9. Среднеарифметическая разность температур газа и воды при противоточной схеме работы скруббера

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_{\text{вода,к}}) - (t_2 - t_{\text{вода,н}})}{\ln \frac{t_1 - t_{\text{вода,к}}}{t_2 - t_{\text{вода,н}}}} = \frac{(350 - 50) - (95 - 30)}{\ln \frac{350 - 50}{95 - 30}} = 154 \text{ }^\circ\text{C}.$$

10. Плотность сухого газа при нормальных условиях

$$\rho_{\text{г,сух,0}} = \rho_{\text{CO}} \cdot \frac{\% \text{CO}}{100} + \rho_{\text{N}_2} \cdot \frac{\% \text{N}_2}{100} + \rho_{\text{CO}_2} \cdot \frac{\% \text{CO}_2}{100} =$$
$$= 1,25 \cdot \frac{57}{100} + 1,25 \cdot \frac{21}{100} + 1,964 \cdot \frac{22}{100} = 1,407 \text{ кг/м}^3.$$

11. Скорость газа внутри скруббера при нормальных условиях

$$w_{\text{г,0}} = w_{\text{г}} \cdot \frac{p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}}{p_{\text{бар}}} \cdot \frac{273}{273 + t_2} = 1 \cdot \frac{101325 + 49000}{101325} \cdot \frac{273}{273 + 95} = 1,101 \text{ м/с}.$$

12. Объемный коэффициент теплопередачи от газа к воде (17.3)

$$K_V = [14,7 + 96,7 \cdot \lg(U)] \cdot \rho_{\text{г,сух,0}} \cdot w_{\text{г,0}} =$$
$$= [14,7 + 96,7 \cdot \lg(15)] \cdot 1,407 \cdot 1,101 = 199 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

13. Объем скруббера

$$V_{\text{скр}} = \frac{Q}{K_V \cdot \Delta t} = \frac{4,917 \cdot 10^6}{199 \cdot 154} = 160,9 \text{ м}^3.$$

14. Массовый расход воды на форсунки скруббера (при уд. теплоемкости воды $C_B = 4167 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$)

$$M_B = \frac{Q}{\varphi \cdot (C_{\text{H}_2\text{O,0}} \cdot t_2 - C_B \cdot t_{\text{вода,н}}) + (1 - \varphi) \cdot (C_B \cdot t_{\text{вода,к}} - C_B \cdot t_{\text{вода,н}})} =$$
$$= \frac{4,917 \cdot 10^6}{0,5 \cdot (1960 \cdot 95 - 4187 \cdot 30) + (1 - 0,5) \cdot (4187 \cdot 50 - 4187 \cdot 30)} = 65,96 \text{ кг/с}.$$

15. Объемное влагосодержание газа на выходе из скруббера (17.7)

$$f_2 = x_2 \cdot \rho_{\text{г,сух,0}} = 0,135 \cdot 1,407 = 0,190 \text{ кг/м}^3.$$

Здесь $x_2 = 0,135 \text{ кг/кг}$ – абсолютное влагосодержание газа на выходе из скруббера. Определяется по диаграмме I-x (рис. 17.5) следующим образом:

а) на линии насыщения $\varphi = 100\%$ находим точку, соответствующую температуре мокрого термометра $t_M = 59,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (точка А на рис. 17.5);

б) двигаясь от этой точки по линии $I = \text{const}$ до пересечения с линией,

соответствующей $t_2 = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ (точка В на рис. 17.5) и опускаясь вертикально вниз на ось абсцисс, находим $x_2 = 0,135 \text{ кг/кг}$.

16. Расход сухого газа на выходе из скруббера при рабочих условиях

$$V_{\text{сух},2} = V_0 \cdot \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} + f_2}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{P_{\text{бар}}}{P_{\text{бар}} + P_{\text{изб}}} \cdot \frac{273 + t_2}{273} =$$
$$= 13,89 \cdot \frac{0,804 + 0,190}{0,804} \cdot \frac{101325}{101325 + 49000} \cdot \frac{273 + 95}{273} = 15,60 \text{ м}^3/\text{с}.$$

17. Внутренний диаметр скруббера

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{сух},2}}{\pi \cdot w_r}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15,60}{\pi \cdot 1}} = 4,457 \text{ м}.$$

18. Внутренняя высота скруббера

$$H = \frac{4 \cdot V_{\text{скр}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 160,9}{\pi \cdot 4,457^2} = 10,311 \text{ м}.$$

19. Проверка на соответствие размеров скруббера строительной прочности конструкции

$H/D = 10,311 / 4,457 = 2,3$. Эта величина меньше 2,5. Условие выполнено.

20. Максимальный расход воды на одну форсунку определяется из рисунка 17.3.

$$G = 8,5 \text{ м}^3/\text{ч} = 8,5 \cdot \frac{1000}{3600} = 2,361 \text{ кг/с}.$$

Здесь 1000 кг/м^3 – плотность воды.

21. Количество форсунок для распыливания воды

$$N_{\text{ф}} = \frac{M_{\text{в}}}{G} = \frac{65,96}{2,361} = 27,9 \approx 28 \text{ шт}.$$

22. Принимаем, что в скруббере будет 3 пояса орошения. Тогда в среднем на каждом поясе будет $28 / 3 = 9,3$ форсунок ≈ 9 форсунок.

Ответ:

Скруббер имеет высоту 10,311 м и диаметр 4,457 м. Число форсунок в скруббере 28 штук.

Протокол расчета приведен на рисунках 17.6а-17.6б.

17.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 17.1

Определить количество теплоты, передаваемое в скруббере от газа воде, если расход сухого воздуха $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Удельная энтальпия сухих газов на входе в скруббер 400 кДж/м^3 , а на выходе – 100 кДж/м^3 .

Задача 17.2

Определить удельную энтальпию водяного пара, если теплота испарения воды 2480 кДж/кг , удельная теплоемкость водяного пара $1960 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, а

температура пара 200 °С.

ORIGIN := 1

Дано:

$V_0 := \frac{50000}{3600} = 13.89$ - производительность скруббера (расход влажн. газа) при норм. усл., м3/с

$t_{g1} := 350$ - начальная температура газа, град. С

$t_{g2} := 95$ - конечная температура газа, град. С

$t_{wod_1} := 30$ - температура воды на входе в скруббер, град. С

$f_1 := \frac{25}{1000}$ - влажность газа на входе в скруббер, кг/м3

$P_{изб} := 49000$ - избыточное давление газа, Па

$P_{bar} := 101325$ - атмосферное давление, Па

$U_{orosh} := 15$ - плотность орошения водой 1 м2 сечения скруббера (10-20 кг/(м2*ч))

$w_g := 1.0$ - скорость газа в скруббере при реальных условиях (от 0,7 до 1,5 м/с), м/с

Тип форсунок - эвольвентные - с диаметрами:

$d_{fors} := 0.075$ - диаметр стандартной эвольвентной форсунки, м

$d_{sopl} := 0.016$ - диаметр сопла стандартной эвольвентной форсунки, м

$P_{pered} := 200 \cdot 10^3$ - давление воды перед форсунками, Па

$\psi := 0.5$ - коэффициент испарения воды (средний по объему скруббера), б/р

Состав сухого газа:

$\%CO := 57$ - CO в газе, %

$\%N2 := 21$ - N2 в газе, %

$\%CO2 := 22$ - CO2 в газе, %

Проверка: $\%CO + \%N2 + \%CO2 = 100$ %

Удельная массовая теплоемкость компонентов газа (при температуре 20 гр.С), Дж/(кг*К):

$Cm_{CO} := 1050$. $Cm_{N2} := 1040$. $Cm_{CO2} := 836$. $Cm_{H2O} := 2010$.

Температура мокрого термометра при различных начальных температурах газа и его влажносте указана в справочной таблице:

$T_{мокр_термом} :=$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	"f, г/м3"	100	200	300	400	500	750	1·10 ³
2	25	38.5	49.5	57	62	65.5	72.5	77.5
3	50	44	53.5	59.5	64	67.5	74	78.5
4	100	52.5	59	63.5	68	70.5	76.5	80.5
5	200	61	66.5	70	72.5	75.5	79.5	0
6	300	68	71.5	74	78.5	0	0	0

Отсюда:

$t_{g_nach} := \text{submatrix}(T_{мокр_термом}, 1, 1, 2, 8)^T$ - табличная начальная температура газа, гр. С

$t_{g_nach}^T = (100 \ 200 \ 300 \ 400 \ 500 \ 750 \ 1 \times 10^3)$

$t_{мокр} := \text{submatrix}(T_{мокр_термом}, 2, 2, 2, 8)^T$

$t_{мокр}^T = (38.5 \ 49.5 \ 57 \ 62 \ 65.5 \ 72.5 \ 77.5)$ - табличная температура мокрого термометра при $f_1 \cdot 10^3 = 25$ г/м3

Решение:

1. Плотность водяных паров (с учетом молярной массы: $\mu_{H2O} := 18$), кг/м3

$$\rho_{H2O} := \frac{\mu_{H2O}}{22.4} = 0.804$$

2. Расход сухого газа в скруббере, м3/с

$$V_{сух} := V_0 \cdot \frac{\rho_{H2O}}{\rho_{H2O} + f_1} = 13.47$$

3. Плотности газовых компонент (с учетом молярных масс: $\mu_{CO} := 28$; $\mu_{N2} := 28$; $\mu_{CO2} := 44$), входящих в состав газа, кг/м3

$$\rho_{CO} := \frac{\mu_{CO}}{22.4} = 1.25 \quad \rho_{N2} := \frac{\mu_{N2}}{22.4} = 1.25 \quad \rho_{CO2} := \frac{\mu_{CO2}}{22.4} = 1.964$$

4. Удельная объемная теплоемкость сухого газа, Дж/(м3*К)

$$Cm_g := Cm_{CO} \cdot \rho_{CO} \cdot \frac{\%CO}{100} + Cm_{N2} \cdot \rho_{N2} \cdot \frac{\%N2}{100} + Cm_{CO2} \cdot \rho_{CO2} \cdot \frac{\%CO2}{100} = 1382$$

5. С учетом теплоты испарения воды $r_{H2O} := 2480 \cdot 10^3$ Дж/кг и удельной массовой теплоемкости водяного пара $Cm_{пар} := 1960$ Дж/(кг*К) (при температуре 0 гр.С) энтальпия водяного пара при начальной и конечной температуре газа, Дж/кг:

$$I_1 := r_{H2O} + Cm_{пар} \cdot t_{g1} = 3166000 \quad I_2 := r_{H2O} + Cm_{пар} \cdot t_{g2} = 2666200$$

Рисунок 17.6а – Протокол выполнения примера 1 "Расчет полого форсуночного скруббера" (начало)

6. Количество теплоты [Вт], которое отдает газ в процессе охлаждения от $t_{g1} = 350$ до $t_{g2} = 95$ C
- $$Q := V_{\text{сyx}} \cdot [C_{m_g} \cdot (t_{g1} - t_{g2}) + f_{-1} \cdot (I_{-1} - I_{-2})] = 4.917 \times 10^6$$
7. Температура мокрого термометра при $t_{g1} = 350$ C и при $f_{-1} \cdot 10^3 = 25$ г/м³ определяется линейной интерполяцией табличных данных
- $$t_{-m} := \text{interp}(t_{-g_nach}, t_{-mokr}, t_{g1}) = 59.5$$
8. Температура воды на выходе из скруббера (она отличается от температуры мокрого термометра на 5-10 гр.С. Примем: $t_{-razn} := 9.5$ гр.С), гр.С
- $$t_{\text{wod}_2} := t_{-m} - t_{-razn} = 50$$
9. Среднелогарифмическая разность температур газа и воды, гр.С
- $$\Delta t := \frac{(t_{g1} - t_{\text{wod}_2}) - (t_{g2} - t_{\text{wod}_1})}{\ln \left[\frac{(t_{g1} - t_{\text{wod}_2})}{(t_{g2} - t_{\text{wod}_1})} \right]} = 154$$
10. Плотность газовой смеси при нормальных условиях, кг/м³
- $$\rho_{-0} := 0.01 \cdot (\rho_{\text{CO}} \cdot \% \text{CO} + \rho_{\text{N2}} \cdot \% \text{N2} + \rho_{\text{CO2}} \cdot \% \text{CO2}) = 1.407$$
11. Скорость газа внутри скруббера при нормальных условиях, м/с
- $$w_{g_0} := w_g \cdot \frac{P_{\text{bar}} + P_{\text{изб}}}{P_{\text{bar}}} \cdot \frac{273}{273 + t_{g2}} = 1.101$$
12. Объемный коэффициент теплоотдачи от газа к воде, Вт/(м³*К)
- $$\alpha_{-V} := (14.7 + 96.7 \cdot \log(U_{\text{orosh}})) \cdot \rho_{-0} \cdot w_{g_0} = 199$$
13. Объем скруббера, м³
- $$V_{\text{skr}} := \frac{Q}{\alpha_{-V} \cdot \Delta t} = 160.9$$
14. Массовый расход воды (уд. теплоемкость воды $C_{m_в} := 4186.8$ Дж/(кг*К)), кг/с
- $$M_{-в} := \frac{Q}{\psi \cdot (C_{m_H2O} \cdot t_{g2} - C_{m_в} \cdot t_{\text{wod}_1}) + (1 - \psi) \cdot (C_{m_в} \cdot t_{\text{wod}_2} - C_{m_в} \cdot t_{\text{wod}_1})} = 65.96$$
- I-x диаграмма влажного воздуха**
15. Объемное влагосодержание газа на выходе из скруббера, кг/м³
- $$f_{-2} := x_{-2} \cdot \rho_{-0} = 0.190$$
16. Объемный расход сухого газа на выходе из скруббера при рабочих условиях, м³/с
- $$V_{2\text{сyx}} := \frac{V_{-0}}{\rho_{\text{H2O}}} \cdot (\rho_{\text{H2O}} + f_{-2}) \cdot \frac{P_{\text{bar}}}{P_{\text{bar}} + P_{\text{изб}}} \cdot \frac{273 + t_{g2}}{273} = 15.60$$
17. Внутренний диаметр скруббера, м
- $$D := \sqrt{\frac{4 \cdot V_{2\text{сyx}}}{\pi \cdot w_g}} = 4.457$$
18. Внутренняя высота скруббера, м
- $$H := \frac{4 \cdot V_{\text{skr}}}{\pi \cdot D^2} = 10.311$$
19. Проверка на соответствие строительной прочности скруббера (H/D должно быть не более 2,5)
- $$\frac{H}{D} = 2.3 \quad \text{Условие соблюдено!}$$
20. Расход воды на одну форсунку (при давлении воды перед форсункой $P_{\text{pered}} = 200.0 \times 10^3$ Па) определяется из расходной характеристики форсунки с соплом $d_{\text{сопл}} = 0.0160$ м, кг/с
- Расходная характеристика эвольвентной форсунки диаметром 75 мм**
- При плотности воды $\rho_{\text{вода}} := 1000$ кг/м³ расход воды на одну форсунку:
- $$G := 8.5 \cdot \frac{\rho_{\text{вода}}}{3600} = 2.361 \quad \text{кг/с}$$
21. Количество форсунок для распыливания воды
- $$N_{\Sigma} := \text{Ceil} \left(\frac{M_{-в}}{G}, 1 \right) = 28 \quad \text{- округление до ближайшего большего целого значения}$$
- Принимаем, что в скруббере будет $n_{\text{рядов}} := 3$ пояса орошения. Тогда на каждом поясе размещается (в одном поясе орошения обычно от 6 до 12 форсунок)
- $$N_{\text{1ряд}} := \text{Round} \left(\frac{N_{\Sigma}}{n_{\text{рядов}}}, 1 \right) = 9$$
- Ответ:**
Для заданных технических характеристик охлаждения потока газа необходим скруббер диаметром $D = 4.5$ м и высотой $H = 10.3$ м с установленными в нем водяными форсунками в количестве $N_{\Sigma} = 28$ штук.

Рисунок 17.6б – Протокол выполнения примера 1 "Расчет полого форсуночного скруббера" (окончание)

Задача 17.3

Определить среднелогарифмическую разность температур между газом и водой в скруббере, если разность температуры в начале скруббера $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на выходе скруббера – $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 17.4

Определить объем скруббера, если количество теплоты, передаваемое в скруббере от газа воде 4 МВт , коэффициент теплопередачи $200\text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, а среднелогарифмическая разность температур между газом и водой в скруббере $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 17.5

Определить плотность водяного пара при нормальных условиях.

Задача 17.6

Определить диаметр скруббера, если расход газа $11\text{ м}^3/\text{с}$, а скорость газа $1,5\text{ м}/\text{с}$.

Задача 17.7

Определить высоту скруббера, если объем скруббера 100 м^3 , а диаметр скруббера 6 м .

Задача 17.8

Определить количество водяных форсунок в скруббере, если общий расход воды $30\text{ кг}/\text{с}$, а расход воды на одну форсунку $3,5\text{ кг}/\text{с}$.

17.4 Контрольные вопросы по практической работе

1) Какой размер частиц пыли эффективно улавливается в форсуночных скрубберах?

2) Какую геометрическую форму обычно имеют форсуночные скрубберы?

3) С какой целью поток газа сначала направляется вниз на зеркало воды, а только затем поднимается вверх?

4) Можно ли охладить газ в скруббере до состояния перенасыщения (с конденсацией водяных паров)?

5) По какой причине ограничивается скорость газа в скруббере?

6) Возможно ли парообразование с распыленной воды в скруббере, если газ достиг состояния насыщения?

7) При достижении какой температуры газа (по отношению к температуре воды) возможно конденсационное охлаждение в верхней части скруббера?

8) Какой физический смысл закладывается в показателе "плотность орошения – $U, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ "?

9) Зависимость какого параметра от расхода воды определяется в расходной характеристике форсунки?

10) Какие значения давления и температуры включают в себя нормальные условия?

11) Как изменится объемный расход газа при снижении его температуры?

12) Как влияет увеличение начальной температуры газа на габариты скруббера?

18 Теплообмен в трубе Вентури¹⁸

18.1 Скрубберы Вентури. Устройство и работа

Работа скрубберов Вентури основана на дроблении воды турбулентным газовым потоком, захвате каплями воды частиц пыли, последующей их коагуляции (справка: коагуляция – это процесс слипания мелких частиц в более крупные) и осаждении в каплеуловителе инерционного типа.

Простейший скруббер Вентури (рис. 18.1а) включает трубу Вентури (рис. 18.1б) и прямоточный циклон. Труба Вентури состоит из служащего для увеличения скорости газа конфузора, в котором размещают оросительное устройство, горловины, где происходит осаждение частиц пыли на каплях воды, и диффузора, в котором протекают процессы коагуляции, а также за счет снижения скорости восстанавливается часть давления, затраченного на создание высокой скорости газа в горловине. В каплеуловителе тангенциального ввода газа создается вращение газового потока, вследствие чего смоченные и укрупненные частицы пыли отбрасываются на стенки и непрерывно удаляются из каплеуловителя в виде шлама.

Скрубберы Вентури могут работать с высокой эффективностью: $\eta = 96-98\%$ на пылях со средним размером частиц 1-2 мкм и улавливать высокодисперсные частицы пыли (вплоть до субмикронных размеров) в широком диапазоне начальной концентрации её в газе – от 0,05 до 100 г/м³. При работе в режиме тонкой очистки от высокодисперсных пылей скорость газов в горловине должна поддерживаться в пределах 100-150 м/с, а удельный расход воды – в пределах 0,5-1,2 дм³/м³. Это обуславливает необходимость большого перепада давления ($\Delta p = 10-20$ кПа) и, следовательно, значительных затрат энергии на очистку газа. В ряде случаев, когда труба Вентури работает только как коагулятор перед последующей тонкой очисткой (например, в электрофильтрах) или для улавливания крупной пыли размером частиц более 5-10 мкм, скорости в горловине могут быть снижены до 50-100 м/с, что значительно сокращает энергозатраты.

Широко распространены скрубберы Вентури на основе трубы Вентури типа ГВПВ (Газопромыватель Вентури, Прямоточный, Высоконапорный) в комплекте с каплеуловителем типа КЦТ (Каплеуловитель Центробежный с Тангенциальным подводом газа). В табл. 18.1 приведены основные размеры труб Вентури, которые отличаются друг от друга площадью поперечного сечения горловины. Например, маркировка трубы ГВПВ-0,08 означает, что площадь сечения ее горловины составляет $F = 0,08$ м². Обозначение геометрических параметров труб Вентури в табл. 18.1 соответствуют обозначениям на рисунке 18.1б.

К характеристикам скрубберов Вентури типа ГВПВ относят следующие:

¹⁸ Практическая работа подготовлена на основе материалов [2, 5]

а) относительная длина горловины $0,15 \cdot d_2$; б) угол сужения конфузора 28° ; в) угол раскрытия диффузора 7° ; г) допустимая запыленность очищаемого газа – 30 г/м^3 ; д) предельная температура очищаемого газа – $400 \text{ }^\circ\text{C}$; е) удельный расход воды – $0,5\text{-}2,5 \text{ л/м}^3$; ж) гидравлическое сопротивление – $6\text{-}12 \text{ кПа}$.

При введении жидкости в газовый поток дробление крупных капель на более мелкие за счет энергии турбулентного потока происходит, когда внешние силы, действующие на каплю, преодолевают силы поверхностного натяжения.

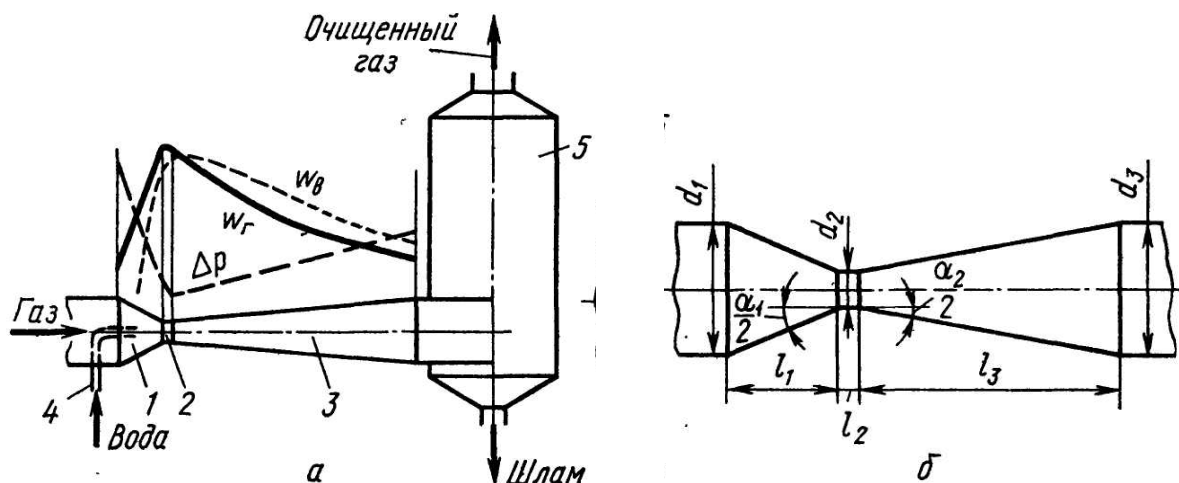


Рисунок 18.1 – Скруббер Вентури:

а – общий вид; б – нормализованная труба Вентури.

1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – подача воды; 5 – каплеуловитель

Таблица 18.1 – Нормализованный ряд труб Вентури типа ГВПВ

Параметр	ГВПВ-0,006	ГВПВ-0,010	ГВПВ-0,014	ГВПВ-0,019	ГВПВ-0,025	ГВПВ-0,030	ГВПВ-0,045	ГВПВ-0,060	ГВПВ-0,080	ГВПВ-0,100	ГВПВ-0,140
$F, \text{ м}^2$	0,006	0,01	0,014	0,019	0,025	0,03	0,045	0,06	0,08	0,1	0,14
$d_1, \text{ мм}$	273	377	400	480	600	630	720	900	1000	1120	1320
$d_2, \text{ мм}$	85	115	135	155	180	200	240	280	320	370	420
$d_3, \text{ мм}$	219	325	377	400	480	530	630	720	820	1000	1120
$L_1, \text{ мм}$	377	525	530	650	840	860	965	1245	1365	1505	1805
$L_2, \text{ мм}$	13	17	20	23	27	30	36	42	48	56	63
$L_3, \text{ мм}$	1095	1715	1980	2005	2450	2700	3190	3595	4085	5150	5720

При подаче орошающей жидкости в трубу Вентури ее начальная скорость незначительна. За счет сил динамического давления газового потока капли одновременно с дроблением получают значительные ускорения и в конце горловины приобретают скорость, близкую к скорости газового потока. В диффузоре скорости газового потока и капель падают, причем вследствие сил инерции скорость капель превышает скорость газового потока. Поэтому захват

частиц каплями наиболее интенсивно идет в конце конфузора и в горловине, где скорость газа относительно капли особенно значительна и кинематическая коагуляция протекает наиболее эффективно.

Огромная скорость протекания процессов дробления капель, изменение скоростей капель и пыли, частичное испарение капель и конденсация паров в весьма малом объеме трубы Вентури (в основном в горловине) и наложение этих процессов друг на друга чрезвычайно осложняют создание теории работы этого аппарата.

По способу подачи жидкости трубы Вентури, применяемые в металлургии, делят на три группы:

- а) с форсуночным орошением (рис. 18.2а);
- б) с пленочным орошением (рис. 18.2б);
- в) с периферийным орошением (рис. 18.2в).

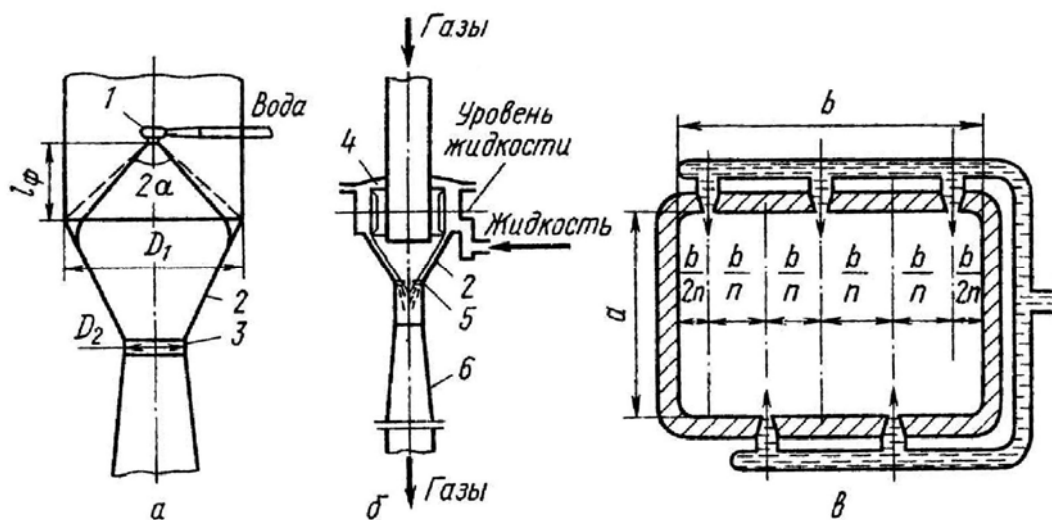


Рисунок 18.2 – Способы орошения труб Вентури:

а – форсуночное; б – пленочное; в – периферийное

1 – форсунка; 2 – конфузор; 3 – горловина; 4 – камера для воды; 5 – уступ; 6 – диффузор

При центральной подаче воды (рис. 18.2а) форсунку устанавливают на расстоянии $(1-1,5) \cdot d_1$ перед конфузуром. Максимальный диаметр зоны орошения форсунки не должен превышать 500 мм; при больших диаметрах газопровода можно устанавливать несколько форсунок.

Периферийную подачу жидкости (рис. 18.2в) применяют в трубах Вентури как круглого, так и прямоугольного сечения. Такая подача позволяет организовать более равномерное орошение в трубах больших размеров, особенно прямоугольных, через отверстия с двух противоположных сторон, расположенных в шахматном порядке. Вода чаще всего подается в начальный участок горловины. Периферийная подача допускает чистку отверстий без прекращения работы аппарата, значительно снижает абразивный износ и замедляет рост отложений на орошающих устройствах.

При пленочном орошении подаваемая вода непрерывно стекает по стенкам конфузора, образуя возобновляющуюся пленку (рис. 18.2б). Дробление пленки на капли происходит за счет энергии высокоскоростного потока газа. Основным преимуществом пленочного орошения являются отсутствие мелких отверстий, склонных к зарастанию и засорению, а также возможность подачи на орошение воды пониженного качества, что очень важно в условиях обратного водоснабжения газоочисток. Пленочное орошение полностью устраняет отложения пыли, образующиеся обычно на границе между сухой и смоченной поверхностями конфузора. Однако пленочное орошение обеспечивает равномерность распределения воды по сечению только при ширине или диаметре горловины не более 100 мм.

В некоторых конструкциях применяют комбинированные способы орошения, например центральную подачу совмещают с пленочной.

В настоящее время при расчете скоростных газопромывателей наиболее часто предпочтение отдается энергетическому методу, согласно которому эффективность работы мокрых пылеуловителей определяется затратами энергии на процесс очистки газа. При этом учитывается энергия, затраченная на движение газа через пылеуловитель, и энергия, израсходованная на подачу и распыление орошающей жидкости. Затраты энергии на очистку газа от пыли (энергия соприкосновения), т.е. расход энергии на обработку жидкостью определенного объема газа, Дж / м³ газа:

$$K = \Delta p_{\text{ап}} + p_{\text{в}} \cdot \frac{V_{\text{ж}}}{V_{\text{г}}} = \Delta p_{\text{ап}} + p_{\text{в}} \cdot m, \quad (18.1)$$

где $\Delta p_{\text{ап}}$ – гидравлическое сопротивление аппарата, Па; $p_{\text{в}}$ – давление распыляемой жидкости (воды) на входе в аппарат, Па; $V_{\text{ж}}$ и $V_{\text{г}}$ – соответственно объемные расходы жидкости и газа, м³/с; m – удельный расход орошающей жидкости, м³/м³ газа.

В скрубберах Вентури чаще всего $m = 0,0005-0,0015 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (0,5-1,5 литра воды на 1 м³ газа).

Степень очистки газа в турбулентном промывателе

$$\eta = 1 - \exp(-B \cdot K^x), \quad (18.2)$$

где B и x – константы, зависящие от свойств улавливаемой пыли.

Значения констант B и x для некоторых пылей металлургического производства приведены в табл. 18.2.

Расчет производят в следующем порядке:

1) определяют требуемую степень очистки газа η исходя из начальной и конечной концентрации пыли в газе;

2) в зависимость (18.2) подставляют найденное значение η (доли единицы), а также значения B и x . Далее вычисляют необходимый для получения требуемой степени очистки газа удельный расход энергии K ;

3) принимают удельный расход орошающей жидкости m ;

4) в соответствии с выражением (18.1) определяют гидравлическое сопротивление скоростного газа промывателя, Па:

$$\Delta p_{\text{ап}} = K - p_{\text{в}} \cdot m;$$

5) оценивают гидравлическое сопротивление каплеуловителя $\Delta p_{\text{к}}$ и вычисляют гидравлическое сопротивление трубы распылителя (трубы Вентури), Па:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \Delta p_{\text{ап}} - \Delta p_{\text{к}}; \quad (18.3)$$

Таблица 18.2 – Значения констант B и x для некоторых пылей

№	Виды пыли	B	x
1	Колошниковая (доменная) пыль	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
2	Пыль известковых печей	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,0529
3	Пыль мартеновских печей, работающих на дутье, обогащенном кислородом	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
4	Пыль мартеновских печей, работающих на воздушном дутье	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
5	Конвертерная пыль при продувке кислородом сверху	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
6	Пыль, образующаяся при выплавке 45 %-ного ферросилиция в закрытых электропечах	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
7	Пыль, образующаяся при выплавке силикомарганца в закрытых печах	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67

б) определяют по справочным данным значения коэффициента гидравлического сопротивления сухой (без подачи орошающей жидкости) трубы Вентури ξ_1 и коэффициента, учитывающего дополнительные потери давления, вызванные подачей в трубу орошающей жидкости, ξ_2 ;

7) вычисляют скорость газа в горловине трубы Вентури, м/с:

$$u = \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{\text{тр}}}{\xi_1 \cdot \rho + \xi_2 \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5}, \quad (18.4)$$

где ρ и $\rho_{\text{ж}}$ – соответственно плотность очищаемого газа и орошающей жидкости, кг/м³;

8) определяют площадь поперечного сечения горловины

$$F = \frac{V_{\text{г}}}{u}, \text{ м}^2. \quad (18.5)$$

18.2 Примеры расчетов

18.2.1 Пример 1 – Расчет скоростного газопромывателя (скруббера Вентури)

Исходные данные:

Имеется скруббер Вентури для очистки отходящих газов мартеновской печи, работающей на дутье, обогащенном кислородом. Производительность скруббера (расход влажного газа при норм. условиях) $V_{\text{г},0} = 150000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Температура газов перед очисткой $t_{r,1} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, разрежение газа перед очисткой $\Delta P_{r,1} = 5 \text{ кПа}$, концентрация пыли в газе перед очисткой $z_1 = 5 \text{ г/м}^3$. Плотность газа при норм. условиях $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$. Необходимая концентрация пыли на выходе из скруббера $z_2 = 0,1 \text{ г/м}^3$. Абсолютное давление воды перед скруббером $P_b = 300 \text{ кПа}$. Удельный расход воды на 1 м^3 газа $m = 0,001 \text{ м}^3 / \text{м}^3$. Гидравлическое сопротивление каплеуловителя $\Delta P_k = 100 \text{ Па}$. Барометрическое давление $P_{\text{бар}} = 101300 \text{ Па}$.

Задание:

Рассчитать размеры, эффективность очистки и гидравлическое сопротивление скруббера Вентури.

Решение:

1. Требуемая степень очистки газа

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1} = \frac{0,005 - 0,0001}{0,005} = 0,98. \text{ В процентах: } \eta = 98\%.$$

2. Число единиц переноса

$$N = \ln\left(\frac{1}{1 - \eta}\right) = \ln\left(\frac{1}{1 - 0,98}\right) = 3,912.$$

3. Удельный расход энергии на обработку газа

$$K = \left(\frac{N}{B}\right)^{x-1} = \left(\frac{3,912}{1,565 \cdot 10^{-6}}\right)^{1,619-1} = 8949 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = 8949 \text{ Па},$$

где $B = 1,565 \cdot 10^{-6}$ и $x = 1,619$ – константы из табл. 18.2.

4. Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури

$$\Delta P_{\text{ап}} = K - P_b \cdot m = 8949 - 300 \cdot 10^3 \cdot 0,001 = 8649 \text{ Па}.$$

5. Плотность газа на входе в скруббер Вентури

$$\rho_{r,1} = \rho_0 \cdot \frac{P_{\text{бар}} - \Delta P_{r,1}}{P_{\text{бар}}} \cdot \frac{273}{273 + t_{r,1}} = 1,29 \cdot \frac{101300 - 5000}{101300} \cdot \frac{273}{273 + 200} = 0,708 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

6. Расход газа, поступающего на очистку при рабочих условиях

$$V_{r,1} = V_{r,0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{r,1}} = 150000 \cdot \frac{1,29}{0,708} = 273384 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 75,94 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

7. Расход орошающей воды

$$M = m \cdot V_{r,1} = 0,001 \cdot 75,94 = 0,076 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 273 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

8. Гидравлическое сопротивление трубы Вентури без каплеуловителя

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{ап}} - \Delta P_k = 8649 - 100 = 8549 \text{ Па}$$

9. Температура газа на выходе из скруббера Вентури

$$t_{r,2} = (0,133 - 41 \cdot m) \cdot t_{r,1} + 35 = (0,133 - 41 \cdot 0,001) \cdot 200 + 35 = 53,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

10. Плотность газа на выходе из скруббера Вентури

$$\rho_{г,2} = \rho_0 \cdot \frac{P_{бар} - \Delta P_{г,1} - \Delta P_{тр}}{P_{бар}} \cdot \frac{273}{273 + t_{г,2}} =$$

$$= 1,29 \cdot \frac{101300 - 5000 - 8549}{101300} \cdot \frac{273}{273 + 53,4} = 0,935 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

11. Коэффициент сопротивления трубы Вентури

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^c = 0,63 \cdot 0,15 \cdot 0,001^{-0,3} = 0,75,$$

где $\xi_1 = 0,15$ – коэффициент сопротивления сухой трубы Вентури (движение газа без подачи воды); $A = 0,63$ и $c = -0,3$ – эмпирические коэффициенты.

12. Необходимая скорость газа в горловине трубы Вентури

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{тр}}{\xi_1 \cdot \rho_{г,2} + \xi_2 \cdot m \cdot \rho_{ж}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8549}{0,15 \cdot 0,935 + 0,75 \cdot 0,001 \cdot 1000}} = 138,5 \text{ м/с},$$

где $\rho_{ж} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность орошающей воды.

13. Расход газа на выходе из трубы Вентури при рабочих условиях

$$V_{г,2} = V_{г,0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{г,2}} = 150000 \cdot \frac{1,29}{0,935} = 57,5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

14. Площадь сечения горловины

$$F_2 = \frac{V_{г,2}}{u_2} = \frac{57,5}{138,5} = 0,415 \text{ м}^2.$$

15. Полученная площадь сечения горловины значительно больше максимального возможного сечения $F_{вент} = 0,14 \text{ м}^2$ для трубы типа ГВПВ-0,140 (см. табл. 18.1). Поэтому предусматриваем параллельную установку нескольких труб типа ГВПВ-0,140. Минимальное число параллельно работающих труб Вентури:

$$n = \frac{F_2}{F_{вент}} = \frac{0,415}{0,14} = 2,965 \approx 3 \text{ шт.}$$

16. Максимальная скорость газа в горловине каждой из труб Вентури

$$u_{2,\text{max}} = \frac{V_{г,2}}{F_{вент}} = \frac{57,5}{0,14} = 136,9 \text{ м/с}.$$

Эта скорость близка к требуемой скорости по условиям очистки газа от пыли $u_2 = 138,5 \text{ м/с}$. Поэтому выбор скруббера Вентури заканчивается.

Ответ:

1) Для обеспечения степени очистки газа 98% необходимы параллельно работающие 3 скруббера Вентури типа ГВПВ-0,140 с соответствующим диаметрами и длинами в соответствии с данными табл. 18.1.

2) Общее гидравлическое сопротивление скруббера Вентури 8649 Па. Протокол расчета приведен на рисунках 18.3а-18.3б.

Дано:

Труба Вентури типа ГВПВ с каплеуловителем типа КЦТ

$$V_{g_0} := \frac{150000}{3600} = 41.67 \text{ - производительность скруббера (расх. влажн. газа) при норм. усл., м3/с}$$

$$t_{g_1} := 200. \text{ - температура газов перед очисткой, гр. С}$$

$$P_{g1} := 5000. \text{ - разрежение газов перед очисткой, Па}$$

$$\rho_{g_0} := 1.29 \text{ - плотность газа при норм. усл., кг/м3}$$

$$Z_1 := 5 \cdot 10^{-3} \text{ - концентрация пыли в газе перед очисткой, кг/м3}$$

$$P_{vod} := 3 \cdot 10^5 \text{ - абсолютное давление воды, Па}$$

$$Z_2 := 100 \cdot 10^{-6} \text{ - необходимая концентрация пыли в газе на выходе из скруббера, кг/м3}$$

$$m := 0.001 \text{ - удельный расход воды на 1 м3 газа, м3/м3 (принят по практическим данным)}$$

$$\Delta P_k := 100. \text{ - гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя, Па (принят по практическим данным)}$$

$$P_{bar} := 101300. \text{ - барометрическое давление, Па}$$

$$\rho_{vod} := 1000. \text{ - плотность воды, кг/м3}$$

Таблица - Значения констант В и х для некоторых пылей

Принимаем из этой таблицы константы:

$$B := 1.565 \cdot 10^{-6}$$

$$x := 1.619$$

Решение:

1. Требуемая степень очистки газа, б/р

$$\eta := \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} = 0.98$$

2. Число единиц переноса

$$N := \ln\left(\frac{1}{1 - \eta}\right) = 3.912$$

3. Удельный расход энергии на обработку 1 м3 газа, Дж/м3

$$K := \left(\frac{N}{B}\right)^{x-1} = 8949$$

4. Общее гидравлическое сопротивление скруббера Вентури, Па

$$\Delta P_{aparat} := K - P_{vod} \cdot m = 8649$$

5. Плотность газа на входе в скруббер Вентури, кг/м3

$$\rho_{g_1} := \rho_{g_0} \cdot \frac{P_{bar} - P_{g1}}{P_{bar}} \cdot \frac{273}{273 + t_{g_1}} = 0.708$$

6. Объемный расход газа, поступающего на очистку при рабочих условиях, м3/с

$$V_{g_1} := V_{g_0} \cdot \frac{\rho_{g_0}}{\rho_{g_1}} = 75.94 \text{ или в м3/ч: } V_{g_1} \cdot 3600 = 273384$$

7. Расход орошающей воды, м3/с

$$M := m \cdot V_{g_1} = 0.076 \text{ или в м3/ч: } M \cdot 3600 = 273$$

8. Гидравлическое сопротивление только трубы Вентури (без каплеуловителя), Па

$$\Delta P_{tr} := \Delta P_{aparat} - \Delta P_k = 8549$$

9. Температура газа на выходе из скруббера Вентури, гр. С

$$t_{g_2} := (0.133 - 41 \cdot m) \cdot t_{g_1} + 35 = 53.4$$

10. Плотность газа на выходе из трубы Вентури, кг/м3

$$\rho_{g_2} := \rho_{g_0} \cdot \frac{P_{bar} - P_{g1} - \Delta P_{tr}}{P_{bar}} \cdot \frac{273}{273 + t_{g_2}} = 0.935$$

11. Коэффициент сопротивления трубы Вентури, связанный с вводом жидкости (для сухой трубы с центральным подводом воды коэффициент сопротивления $\xi_1 := 0.15$; эмпирические коэффициенты $A := 0.63$ и $c := -0.3$)

$$\xi_2 := A \cdot \xi_1 \cdot m^c = 0.75$$

12. Необходимая скорость газа в горловине трубы Вентури, м/с

$$u_{g_2} := \left(\frac{2 \cdot \Delta P_{tr}}{\xi_1 \cdot \rho_{g_2} + \xi_2 \cdot m \cdot \rho_{vod}} \right)^{0.5} = 138.5$$

13. Объемный расход газа на выходе из трубы Вентури, м3/с

$$V_{g_2} := V_{g_0} \cdot \frac{\rho_{g_0}}{\rho_{g_2}} = 57.5$$

Рисунок 18.3а – Протокол выполнения примера 1 "Расчет скоростного газопромывателя (скруббера Вентури)" (начало)

14. Площадь сечения горловины, м²

$$F_{г_2} = \frac{V_{г_2}}{u_{г_2}} = 0.415$$

▶ Рисунок трубы Вентури и стандартные размеры трубы типа ГВПВ

15. Минимальное число параллельно работающих труб Вентури (исходя из того, что для трубы Вентури типа ГВПВ-0,140 максимальная площадь сечения $F_{Вент} = 0.14$ м²), шт.

$$n = \text{Ceil}\left(\frac{F_{г_2}}{F_{Вент}}, 1\right) = 3 \quad - \text{округляем до ближайшего большего целого, шт.}$$

16. Максимальная скорость газа в горловине каждой трубы, м/с

$$u_{г_2_max} = \frac{V_{г_2}}{n \cdot F_{Вент}} = 136.9$$

Ответ:
 Для обеспечения степени очистки газа $\eta = 100 = 98$ % необходимы $n = 3$ скруббера Вентури с трубами площадью сечения горловины $F_{Вент} = 0.14$ м с соответствующими диаметрами и длинами:
 $d_1=1320$ мм - диаметр патрубка на входе газа в трубу Вентури (большой диаметр конфузора), мм; $d_2=420$ мм - диаметр горловины, мм; $d_3=1120$ мм - диаметр патрубка на выходе газа из трубы Вентури, мм; $L_1=1805$ мм - длина конфузора, мм; $L_2=63$ мм - длина горловины; $L_3=5720$ мм - длина диффузора.
 Общее гидравлическое сопротивление скруббера Вентури: $\Delta P_{апарат} = 8649$ Па.

Рисунок 18.3б – Протокол выполнения примера 1 "Расчет скоростного газопромывателя (скруббера Вентури)" (окончание)

18.3 Задания для самостоятельной работы

Задача 18.1

Определить удельный расход орошающей воды в скруббере Вентури, если расход очищаемого газа $85000 \text{ м}^3 / \text{ч}$, а расход воды $95 \text{ т} / \text{ч}$.

Задача 18.2

Определить степень очистки газа в скруббере Вентури, если концентрация пыли перед скруббером составляет $20 \text{ г} / \text{м}^3$, а на выходе из скруббера $0,3 \text{ г} / \text{м}^3$.

Задача 18.3

Определить плотность газа на входе в скруббер Вентури, если плотность газа при нормальных условиях составляет $1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$, температура газа – $300 \text{ }^\circ\text{C}$, а избыточное давление газа – 5000 Па .

Задача 18.4

Определить расход газа на входе в скруббер Вентури, если расход газа при нормальных условиях составляет $12000 \text{ м}^3 / \text{с}$, температура газа – $300 \text{ }^\circ\text{C}$, а избыточное давление газа – 5000 Па .

Задача 18.5

Определить гидравлическое сопротивление скруббера Вентури, если потеря давления газа в трубе Вентури составляет 10 кПа , а потери давления в каплеуловителе 100 Па .

Задача 18.6

Определить расход газа через горловину трубы Вентури типа ГВПВ-0,14, если скорость газа в горловине составляет $100 \text{ м} / \text{с}$.

Задача 18.7 (повышенной сложности)

Определить минимально необходимое количество параллельно установленных труб Вентури для очистки газа от пыли. Расход газа $100000 \text{ м}^3 / \text{ч}$, а необходимая скорость газа в горловине трубы Вентури составляет 100 м/с .

18.4 Контрольные вопросы по практической работе

- 1) Какие основные элементы включает в себя скруббер Вентури?
- 2) Какие основные элементы включает в себя труба Вентури?
- 3) Какое назначение конфузора трубы Вентури?
- 4) Какое назначение горловины трубы Вентури?
- 5) Какое назначение диффузора трубы Вентури?
- 6) Какое назначение каплеуловителя скруббера Вентури?
- 7) Как разделяются трубы Вентури по способу подачи жидкости?
- 8) В чем состоит идея энергетического метода расчета скоростного газопромывателя в виде трубы Вентури?

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. 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.
3. 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.
4. Свинолобов Н.П. Теоретические основы металлургической теплотехники / Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 226 с.
5. Теплоэнергетика металлургических заводов: Учебник для вузов / Розенгарт Ю.И., Мурадова З.А., Теверовский Б.З., Федоров О.Г., Якобсон Б.И. – М.: Металлургия, 1985. – 303 с.

Навчальне видання

Бровкін Володимир Леонідович

Застосування прикладного програмного забезпечення для вирішення завдань із
захисту довкілля

Навчальний посібник

Тем. план 2021, поз. 257

Підписано до друку 11.08.2021. Формат 60×84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік. вид. арк. 7,65. Умов. друк. арк. 7,55. Замовлення № 15.

Національна металургійна академія України
49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4

Редакційно – видавничий відділ НМетАУ