

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ДГТУ)**

Кафедра «Химические технологии нефтегазового комплекса»

**Методические указания**

к практическим и контрольным работам

по дисциплине

«Процессы и аппараты химических технологий»

Ростов-на-Дону

2025

УДК 61.13

Составитель: Кашпаров И.И.

Методические указания к практическим и контрольным работам

по дисциплине «Процессы и аппараты химических технологий»

/ сост.: Кашпаров И.И. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. – 59 с.

В методических указаниях кратко изложены теоретические вопросы для выполнения практических и контрольных работ.

Предназначено для обучающихся по направлениям 18.03.01 Химическая технология всех форм обучения.

Ответственный за выпуск зав. кафедрой Жукова Ирина Юрьевна

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

В печать \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Формат 60×84/16. Объем \_\_\_\_\_\_\_ усл. п. л.

Тираж 50 экз. Заказ № \_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Введение | | 4 |
| 1 | Системы единиц, соотношения между ними. Основные газовые законы | 5 |
|  | 1.1 Основные термодинамические параметры состояния | 5 |
|  | 1.2 Основные газовые законы | 6 |
| 2 | Физические свойства жидкостей. Основные законы гидростатики и гидродинамики. Реальные и идеальные жидкости | 16 |
|  | 2.1 Основные понятия гидравлики | 16 |
|  | 2.2 Основные понятия гидростатики | 19 |
| 3 | Применение теории подобия | 31 |
|  | 3.1 Условия подобия физических процессов | 31 |
|  | 3.2 Некоторые из основных критериев подобия и их физический смысл | 31 |
| 4 | Теплоемкость | 39 |
|  | 4.1 Основные теоретические положения | 39 |
| 5 | Основные термодинамические процессы с идеальным | 44 |
|  | 5.1 Основные теоретические положения | 44 |
| 6 | Поршневые компрессоры | 52 |
|  | 6.1 Основные теоретические положения | 52 |
| 7 | Циклы двигателей внутреннего сгорания | 54 |
|  | 7.1 Основные теоретические положения | 54 |
|  | ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ | 57 |
| Перечень использованных информационных ресурсов | | 58 |

**ВВЕДЕНИЕ**

В химической промышленности осуществляются разнообразные процессы, в которых исходные материалы в ходе различных физических и химических преобразований превращаются в конечный продукт. Для этих целей используют различные тепло и массообменные аппараты. Изучить закономерности этих процессов и аппараты для их проведения помогает курс «Процессы и аппараты химической технологии».

Курс «Процессы и аппараты химической технологии» имеет большое значение в общеинженерной подготовке студентов химико-технологических специальностей. Неотъемлемой составной частью этого курса, как и любой другой инженерной дисциплины, является решение практических заданий. Именно на практических занятиях студенты знакомятся с сущностью основных физических явлений, лежащих в основе расчета тех или иных процессов, с аппаратами или с их моделями, в которых осуществляются эти процессы; на практических занятиях студенты определяют и устанавливают факторы, влияю­щие на производительность и экономичность работы различных установок.

В соответствии с общепринятой классификацией основных процессов химической технологии указанный курс разделяется на 4 части: «Основы гидрав­лики и гидромеханические процессы», «Теплообменные процессы», «Массообменные процессы» и «Механические процессы». По каждой из этих частей предусмотрены практические задания для самостоятельного решения. Настоящие методические указания к практическим занятиям издаются как первая часть единого пособия для выполнения индивидуальных заданий по курсу. При написании формул учтён стандарт ISO 31-0: 1992 буквенных обозначений физических величин.

# 1 СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ, СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ. ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

# Основные термодинамические параметры состояния

При выполнении расчетов в задачах необходимо использовать только международную систему единиц измерения.

При решении задач по этой теме следует ознакомится с соответствующим разделом лекционного курса. Необходимо уяснить, что термодинамические параметры состояния: температура, давление и удельный объем – связаны уравнением вида:

*f* (*P*, *V*, *Т*) = 0 (1.1)

Это уравнение называется уравнением состояния. Вид функции *f* опре­деляется родом рабочего тела. Для идеального газа в зависимости от решаемых задач уравнение (1) приобретет вид:

*P* *V = M Rμ Т* (1.2)

*P* *V = G R Т* (1.3)

где *P* – абсолютное давление, Па;

*V* – объем, занимаемый газом, м3;

*M* – молекулярная масса данного газа, кг/кмоль;

*Rμ* – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг К);

*Т* – абсолютная температура, оС;

*G* – расход газа, кг/ч;

*R* – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К).

Уравнение (2) уравнение отнесенное к одному молю вещества. Уравнение (3) широко используется для расчетов параметров состояния газа или для определения массы *M* или количества *G* газа. Индивидуальная газовая постоянная *R*, Дж/(кг К), определяется либо по справочной литературе, либо по формуле:

*R = Rμ* / *M* (1.4)

Важно понять, что в уравнении (3) *P* и *Т* абсолютное давление и абсолютная температура, поэтому вместо этих величин нельзя подставлять избыточное или вакуумметрическое давление или температуру в градусах Цельсия. Поэтому эту температуру нужно пересчитывать в абсолютные градусы кельвина:

*T* K *= t* оC+273,15 (1.5)

Поскольку при выполнении расчетов в задачах требуется применять международную систему единиц измерения СИ, а в условиях приведенное давление иногда приводится и внесистемных единицах, то переход от одних единиц измерения к другим может быть выполнен либо на основе механического определения давления как силы *F*, действующей на единицу площади *S*:

*P* *= F* / *S* (1.6)

Либо на основе уравнения, отражающего принцип действия жидкостных

приборов:

*P* *= ρ g h* (1.7)

где *ρ* – плотность этой жидкости, кг/м3;

*g* – ускорение свободного падения, м/с2;

*h* – высота столба жидкости в приборе, м.

Внесистемные единицы давления:

1 кгс/м2 = 9,81 Па = 1 мм.водн.ст.

1 ат. (техн. атмосфера) = 1 кгс/см2 = 98,1 кПа.

1 атм. (физическая атмосфера) = 101,325 кПа = 760 мм.рт.ст.

1 ат. = 0,968 атм.

1 мм.рт.ст. = 133,32 Па.

1 бар = 0,1 мПа = 100 кПа = 105 Па.

Удельный объем, определяемая отношением объема вещества к его массе.

*υ* = *V* / *m* (1.8)

где *υ* – удельный объем газа, м3/кг;

*V* – объем, занимаемый газом, м3;

*m* – масса газа, кг.

Плотность вещества, определяемая отношением массы к объему вещества.

*ρ* *= m* / *V* (1.9)

# 1.2 Основные газовые законы

Процессом называется всякое изменение термодинамических параметров.

1) Закон Бойля-Мариотта.

Если к рабочему телу, в процессе при постоянной температуре, подводить или отводить теплоту, то давление рабочего тела будет изменятся обратно пропорционально объему.

(*P*1/ *P*2) *=* (*υ*1/ *υ*2) → *P*1 *υ*1= *P*2 *υ*2 = *…* = *P*n *υ*n = const (1.10)

2) Закон Гей-Люссака.

Если к рабочему телу, в процессе при постоянном давлении. Подводить или отводить теплоту, то объем рабочего тела будет изменяться прямо пропорционально абсолютной температуре.

(*υ*1/ *υ*2) *=* (*T*1/ *T*2) (1.11)

3) Закон Шарля.

Если к рабочему телу, в процессе при постоянном объеме подводить или отводить теплоту, то давление рабочего тела будет изменяться прямо пропорционально абсолютной температуре.

(*P*1/ *P*2) *=* (*T*1/ *T*2) (1.12)

4) Закон Авогадро.

В равных объемах различных газов при одинаковых условиях содержится одинаковое количество молекул.

(*ρ*1/ *ρ*2) *=* (*M*1/ *M*2) (1.13)

(*υ*2/ *υ*1) *=* (*M*1/ *M*2) → *M*1 *υ*1= *M*2 *υ*2 = *…* = *M*n *υ*n = const (1.14)

Таблица 1.1 - Масса некоторых газов используемых в качестве рабочего тела в килограммах, численно равна их молекулярному весу

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | He2 | H2 | N2 | CO | CO2 | O2 | Воздух | SO2 | H2O |
| *M*,  кг/кмоль | 4 | 2 | 28 | 28 | 44 | 32 | 29 | 64 | 18 |

5) Объединенный газовый закон Клайперона.

Объединив термодинамические законы, рассмотренные выше, Клайперон вывел объединенный газовый закон.

*P* *V = m R Т* (1.15)

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

**Задача 1**

Найти мольную массу *M*см, кг/кмоль, плотность газовой смеси *ρ*см, кг/м3, указанного состава при температуре *t*, оС, и избыточном давлении *Р*изб., ат. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Исходные данные к задаче 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Состав газа, % об. | | | | | | *t*,  оС | *Р*изб.,  ат |
| H2 | CO | CO2 | N2 | H2O | O2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | – | – | 1 | 78 | – | 21 | 190 | 2,1 |
| 2 | 40 | 10 | 40 | – | 10 | – | 155 | 1,2 |
| 3 | – | – | 30 | 30 | 30 | 10 | 180 | 0,3 |
| 4 | 40 | 40 | 10 | 10 | – | – | 50 | 2,4 |
| 5 | – | – | 15 | 35 | 30 | 20 | 120 | 1,5 |
| 6 | 45 | 45 | 5 | 5 | – | – | 100 | 1,6 |
| 7 | 40 | – | 45 | 10 | 5 | – | 230 | 2,7 |

*Продолжение таблицы 1.2*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 8 | 35 | 15 | 20 | 20 | 10 | – | 335 | 10,8 |
| 9 | – | – | 50 | – | 40 | 10 | 440 | 0,9 |
| 10 | 10 | – | 25 | 40 | 25 | – | 160 | 1,8 |
| 11 | – | – | – | 70 | 15 | 15 | 500 | 4,1 |
| 12 | 20 | – | 20 | 25 | 35 | – | 25 | 0,2 |
| 13 | 25 | 25 | – | 50 | – | – | 60 | 1,3 |
| 14 | 10 | 10 | 40 | 40 | – | – | 365 | 0,1 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 40 | 15 | – | 170 | 2,5 |
| 16 | 30 | – | 30 | 30 | 10 | – | 700 | 0,6 |
| 17 | 10 | 10 | 10 | 10 | 60 | – | 273 | 1,7 |
| 18 | – | – | 10 | 40 | 40 | 10 | 208 | 0,2 |
| 19 | 20 | 20 | 20 | 40 | – | – | 177 | 5,9 |
| 20 | 50 | – | – | 50 | – | – | 90 | 12,0 |
| 21 | – | – | 40 | 20 | 20 | 20 | 282 | 0,1 |
| 22 | – | – | 10 | – | 40 | 50 | 185 | 7,2 |
| 23 | – | – | – | 50 | – | 50 | 200 | 3,3 |
| 24 | – | 25 | 25 | 25 | 25 | – | 125 | 0,4 |
| 25 | 5 | 15 | 25 | 30 | 25 | – | 150 | 0,5 |
| 26 | – | – | 50 | – | 50 | – | 306 | 1,1 |
| 27 | – | 50 | 40 | 10 | – | – | 300 | 6,2 |
| 28 | – | – | 45 | 25 | 15 | 15 | 120 | 2,8 |
| 29 | 30 | 5 | 60 | – | 5 | – | 205 | 9,0 |
| 30 | 45 | 20 | 15 | 20 | – | – | 115 | 0,5 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

*Пример*

Найти мольную массу *M*см, кг/кмоль, плотность газовой смеси *ρ*см, кг/м3, указанного состава yH2 = 55 % об., yCO = 20 % об., yCO2 = 15 % об., yN2 = 10 % об. при температуре *t* = 110 оС, и избыточном давлении *Р*изб. = 0,3 ат.

*Решение:*

Рассчитаем мольную массу газовой смеси.

*M*см = yH2 *M*H2 + yCO *M*CO + yCO2 *M*CO2 + yN2 *M*N2

*M*см = 0,55·2 + 0,2·28 + 0,15·44 + 0,1·28 = 16,1 кг/кмоль

Рассчитаем значение давления газовой смеси в системе СИ.

1 ат. (техн. атмосфера) = 98,1 кПа

0,3 ат. (техн. атмосфера) = Х кПа

По методу пропорции Х = 29,43 кПа

Рассчитаем плотность газовой смеси.

 кг/м3

**Задача 2**

Определить количество вещества *G*, кг, находящегося в сосуде объёмом *V*, м3, если показания манометра (вакуумметра) равны *Р*изб (*Р*вак), кПа, темпе-

ратура *t*, оС и показания барометра *Р*атм, кПа равны. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Исходные данные к задаче 2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Род вещества | *Р*вак,  кПа | *Р*изб,  МПа | *t*,  оС | *Р*атм.,  105 Па | *V*,  м3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Воздух | 93,5 | – | 50 | 0,980 | 0,3 |
| 2 | Азот | 86,5 | – | 100 | 0,986 | 0,2 |
| 3 | Кислород | 80,0 | – | 150 | 0,993 | 0,1 |
| 4 | Углекислый газ | 73,5 | – | 200 | 0,998 | 0,15 |
| 5 | Диоксид серы | 66,6 | – | 250 | 1,120 | 0,25 |
| 6 | Водород | – | 0,12 | 300 | 1,020 | 0,50 |
| 7 | Монооксид углерода | – | 0,13 | 350 | 1,028 | 0,35 |
| 8 | Метан | – | 0,16 | 400 | 0,990 | 0,03 |
| 9 | Аммиак | – | 0,18 | 450 | 1,010 | 0,01 |
| 10 | Этилен | – | 0,20 | 500 | 0,975 | 0,02 |
| 11 | Водяной пар | 73,4 | – | 50 | 0,980 | 0,4 |
| 12 | Хлор | 68,5 | – | 100 | 0,986 | 0,05 |
| 13 | Монооксид азота | 56,3 | – | 150 | 0,993 | 0,45 |
| 14 | Диоксид азота | 50,2 | – | 200 | 0,998 | 0,55 |
| 15 | Ацетилен | 47,8 | – | 250 | 1,120 | 0,04 |
| 16 | Воздух | – | 0,22 | 300 | 1,020 | 0,12 |
| 17 | Азот | – | 0,25 | 350 | 1,028 | 0,28 |
| 18 | Кислород | – | 0,27 | 400 | 0,990 | 0,3 |
| 19 | Углекислый газ | – | 0,30 | 450 | 1,010 | 0,2 |
| 20 | Диоксид серы | – | 0,33 | 500 | 0,975 | 0,1 |
| 21 | Водород | 93,5 | – | 50 | 0,980 | 0,15 |
| 22 | Монооксид углерода | 86,5 | – | 100 | 0,986 | 0,25 |
| 23 | Метан | 80,0 | – | 150 | 0,993 | 0,50 |
| 24 | Аммиак | 73,5 | – | 200 | 0,998 | 0,35 |
| 25 | Этилен | 66,6 | – | 250 | 1,120 | 0,45 |
| 26 | Водяной пар | – | 0,35 | 300 | 1,020 | 0,35 |
| 27 | Хлор | – | 0,38 | 350 | 1,028 | 0,03 |
| 28 | Углекислый газ | – | 0,40 | 400 | 0,990 | 0,01 |
| 29 | Диоксид серы | – | 0,42 | 450 | 1,010 | 0,04 |
| 30 | Ацетилен | – | 0,45 | 500 | 0,975 | 0,12 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

*Пример*

Определить количество воздуха *G*, кг, находящегося в сосуде объёмом *V* = 0,13 м3, если показания манометра равны *Р*изб = 0,40·106 Па, температура *t* = 450 оС и показания барометра *Р*атм = 0,975·105 Па.

*Решение:*

Рассчитаем количество вещества, находящегося в сосуде.

*P* *V = G R Т*



Найдем значение индивидуальной газовой постоянной

*R = Rμ* / *M =* 8314/29 = 286,689 Дж/(кг К)

*T =* 450 +273,15 *=* 723,15 K

*P* *= Р*изб + *Р*атм = 0,40·106 + 0,0975·106 = 0,4975·106 Па,

Произведем подстановку найденных величин

 кг.

**Задача 3**

Определить значение одного из трех термодинамических параметров состояния: давления *Р*, кПа, температуры *t*, оС, или удельного объёма *υ*, м3/кг, в зависимости от условий задания, если заданы значения двух из них. Указан род газа и его количество *G*, кг. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Исходные данные к задаче 3

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Род вещества | *t*,  оС | *Р*,  МПа | *υ*,  м3/кг | *G*,  кг |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Воздух | – | 10 | 0,08 | 23 |
| 2 | Азот | – | 8 | 0,01 | 15 |
| 3 | Кислород | 127 | – | 0,15 | 10 |
| 4 | Углекислый газ | 17 | – | 0,20 | 5 |
| 5 | Монооксид углерода | 24 | – | 0,25 | 2 |
| 6 | Водород | 15 | 0,2 | – | 2,5 |
| 7 | Диоксид серы | 120 | 0,5 | – | 1 |
| 8 | Метан | 27 | 0,8 | – | 10 |
| 9 | Аммиак | 10 | – | 0,03 | 3 |
| 10 | Этилен | 15 | – | 0,10 | 8 |
| 11 | Монооксид азота | 32 | – | 0,38 | 25 |
| 12 | Диоксид азота | 46 | – | 0,40 | 18 |
| 13 | Водяной пар | 50 | – | 0,56 | 12 |
| 14 | Хлор | – | 0,7 | 0,06 | 4 |
| 15 | Ацетилен | – | 0,4 | 0,80 | 3,5 |
| 16 | Воздух | 150 | 2 | – | 15 |
| 17 | Азот | 38 | 6 | – | 10 |
| 18 | Кислород | – | 1 | 0,65 | 5 |
| 19 | Углекислый газ | – | 3 | 0,32 | 2 |
| 20 | Монооксид углерода | – | 2 | 0,45 | 2,5 |
| 21 | Водород | – | 5 | 0,20 | 3 |
| 22 | Диоксид серы | 23 | – | 0,38 | 8 |
| 23 | Метан | 100 | – | 0,80 | 25 |

*Продолжение таблицы 1.4*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 24 | Аммиак | – | 0,3 | 0,35 | 18 |
| 25 | Этилен | 35 | – | 0,28 | 17 |
| 26 | Монооксид азота | 58 | 0,1 | – | 22 |
| 27 | Диоксид азота | 48 | 0,3 | – | 30 |
| 28 | Водяной пар | – | 0,5 | 0,90 | 3 |
| 29 | Хлор | 22 | 0,5 | – | 9 |
| 30 | Ацетилен | 18 | 0,2 | – | 1,2 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

*Пример*

Определить значение удельного объёма *υ*, м3/кг кислорода, если известны значения двух других его параметров: давления *Р* = 0,2·103 кПа и температуры *t* = 20 оС, количество *G* = 1,5 кг.

*Решение:*

Рассчитаем количество вещества, находящегося в сосуде.

*P* *υ = G R Т*



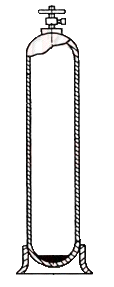
Найдем значение индивидуальной газовой постоянной

*R = Rμ* / *M =* 8314/29 = 286,689 = 0,2867 кДж/(кг К)

*T =* 20 +273,15 *=* 293,15 K

Произведем подстановку найденных величин

 м3/кг.



*Выпускаемый*

*газ*

**Задача 4**

Определить количество газа Δ*G*, кг, выпущенного из баллона (рисунок 1) в атмосферу в результате снижения давле­ния в нем от *Р*1 до *Р*2, кПа, если ёмкость баллона *V*, м3, а температура газа равна понижается от значения *t*1, до *t*2, оС. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.5.

*V*

Рисунок 1 - Газовый баллон

Таблица 1.5 - Исходные данные к задаче 4

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Род вещества | *Р*1,  МПа | *Р*2,  кПа | *t*1,  оС | *t*2,  оС | *V*,  м3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Воздух | 1,00 | 200 | 17 | 10 | 0,100 |
| 2 | Азот | 0,80 | 150 | 42 | 30 | 0,060 |
| 3 | Кислород | 0,60 | 60 | 77 | 50 | 0,040 |
| 4 | Углекислый газ | 0,75 | 170 | -13 | -20 | 0,020 |
| 5 | Монооксид углерода | 0,90 | 180 | 32 | 25 | 0,015 |
| 6 | Водород | 0,40 | 100 | 27 | 20 | 0,010 |
| 7 | Диоксид серы | 0,30 | 50 | 20 | 12 | 0,008 |
| 8 | Метан | 0,25 | 15 | 30 | 10 | 0,006 |
| 9 | Аммиак | 0,35 | 25 | 35 | 25 | 0,004 |
| 10 | Этилен | 0,50 | 35 | 7 | 0 | 0,005 |
| 11 | Монооксид азота | 0,20 | 120 | 19 | 10 | 0,080 |
| 12 | Диоксид азота | 0,45 | 80 | 24 | 14 | 0,070 |
| 13 | Водяной пар | 0,85 | 145 | 65 | 25 | 0,050 |
| 14 | Хлор | 0,70 | 130 | 12 | 2 | 0,030 |
| 15 | Ацетилен | 0,65 | 40 | 50 | 20 | 0,025 |
| 16 | Воздух | 0,55 | 75 | 32 | 18 | 0,030 |
| 17 | Азот | 0,20 | 160 | 43 | 23 | 0,018 |
| 18 | Кислород | 0,15 | 150 | 25 | 15 | 0,016 |
| 19 | Углекислый газ | 0,95 | 80 | 38 | 18 | 0,014 |
| 20 | Монооксид углерода | 1,05 | 130 | 50 | 20 | 0,015 |
| 21 | Водород | 0,40 | 140 | 10 | 2 | 0,100 |
| 22 | Диоксид серы | 0,30 | 100 | 15 | 5 | 0,060 |
| 23 | Метан | 0,25 | 60 | 27 | 7 | 0,040 |
| 24 | Аммиак | 0,35 | 45 | 38 | 18 | 0,080 |
| 25 | Этилен | 0,50 | 55 | 28 | 20 | 0,045 |
| 26 | Монооксид азота | 0,20 | 85 | 14 | 4 | 0,090 |
| 27 | Диоксид азота | 0,45 | 120 | 18 | 8 | 0,028 |
| 28 | Водяной пар | 0,85 | 70 | 24 | 10 | 0,036 |
| 29 | Хлор | 0,25 | 65 | 8 | 0 | 0,048 |
| 30 | Ацетилен | 0,35 | 20 | 15 | 5 | 0,056 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

*Пример*

Определить количество кислорода Δ*G*, кг, выпущенного из баллона в атмосферу в результате снижения давления в нем от *Р*1 = 550 до *Р*2 = 50, кПа, если ёмкость баллона *V* = 0,05, м3, температура газа равна *t*1 = 25 до *t*2 = 5, оС.

*Решение:*

Рассчитаем количество вещества, находящегося в сосуде, используя уравнением Менделеева-Клапейрона для первого состояния:

*P*1 *V* *= G*1 *R Т*1

и для второго состояния:

*P*2 *V* *= G*2 *R Т*2

Выразим количество выпущенного кислорода из полученных уравнений:

*P*1 *V* – *P*2 *V* *= G*1 *R Т*1 – *G*2 *R Т*2

*V*·(*P*1 – *P*2) *=* (*G*1 – *G*2)·*R*·(*Т*1 – *Т*2)



Найдем значение индивидуальной газовой постоянной

*R = Rμ* / *M =* 8,314/32 = 0,2598 кДж/(кг К)

*T*1 *=* 25 +273,15 *=* 298,15 K

*T*2 *=* 5 +273,15 *=* 278,15 K

Произведем подстановку найденных величин

 кг.

**Задача 5**

Для предупреждения испарения ртути, пары которой оказывают вредное действие на человеческий организм, обычно при пользовании ртутными манометрами над уровнем ртути наливают слой воды.

Определить абсолютное давление в сосуде, если разность столбов ртути в *U*-образном манометре составляет Δ*H*, мм, при температуре ртути *t*, оС, а высота столба воды над ртутью равна *h*, мм. Атмосферное давление по ртутному барометру *Р*атм, мм рт.ст., при температуре окружающей среды. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Исходные данные к задаче 5

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Δ*Н*,  мм | *h*,  мм | *t*рт,  оС | *t*окр,  оС | *Р*атм,  мм рт.ст. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 580 | 150 | 25 | 25 | 770 |
| 2 | 500 | 160 | 23 | 24 | 760 |
| 3 | 520 | 155 | 22 | 23 | 765 |
| 4 | 480 | 170 | 28 | 28 | 755 |
| 5 | 530 | 164 | 20 | 20 | 758 |
| 6 | 545 | 143 | 21 | 22 | 762 |
| 7 | 560 | 148 | 26 | 26 | 768 |
| 8 | 565 | 176 | 20 | 22 | 775 |
| 9 | 570 | 164 | 22 | 22 | 740 |
| 10 | 592 | 154 | 25 | 25 | 748 |
| 11 | 600 | 168 | 24 | 24 | 750 |
| 12 | 560 | 158 | 22 | 23 | 764 |
| 13 | 548 | 168 | 20 | 20 | 762 |
| 14 | 552 | 164 | 23 | 24 | 752 |
| 15 | 578 | 170 | 18 | 18 | 754 |
| 16 | 512 | 148 | 21 | 22 | 760 |

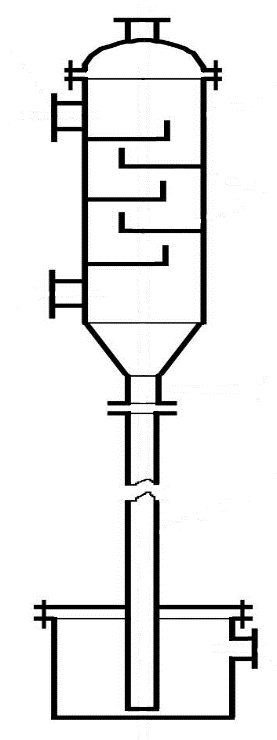
*Продолжение таблицы 1.6*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 17 | 525 | 145 | 20 | 20 | 763 |
| 18 | 530 | 152 | 23 | 24 | 768 |
| 19 | 550 | 158 | 22 | 22 | 765 |
| 20 | 556 | 138 | 25 | 25 | 759 |
| 21 | 518 | 140 | 28 | 28 | 754 |
| 22 | 526 | 167 | 27 | 28 | 756 |
| 23 | 545 | 153 | 29 | 29 | 749 |
| 24 | 548 | 158 | 19 | 20 | 752 |
| 25 | 562 | 145 | 15 | 16 | 766 |
| 26 | 540 | 162 | 17 | 18 | 768 |
| 27 | 520 | 160 | 20 | 20 | 770 |
| 28 | 550 | 150 | 25 | 25 | 757 |
| 29 | 510 | 155 | 23 | 24 | 760 |
| 30 | 580 | 147 | 16 | 18 | 769 |

**Задача 6**

Вакуумметр на барометрическом конденсаторе (рисунок 2) показывает ва­куум, равный *Р*вак, см рт.ст. Барометри­ческое давление составляет *Р*атм, мм рт.ст. Определить:

*Н*



Жидкость

*Р*вак

*Пар*

*Пар (газ)*

Жидкость

а) абсолютное давление в конден­саторе *Р*к, Па и ат.;

б) на какую высоту *Н*, м, поднимется вода в барометрической трубе?;

в) найти расход *G*, кг, жидкости в барометрическом конденсаторе, при про­ведении измерений;

г) найти удельный объем *υ*, м3/кг, газа проходящего, через конденсатор в зависимости от условий задания.

Исходные данные для расчета при­ведены в таблице 1.7.

Рисунок 2 - Барометрический кон­денсатор

Таблица 1.7 - Исходные данные к задаче 6

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Род жидкого вещества | *Р*вак,  см рт.ст. | *Р*атм,  мм рт.ст. | *t*,  оС | *V*,  м3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Воздух | 66,15 | 760 | 127 | 0,3 |
| 2 | Азот | 46,30 | 665 | 17 | 0,2 |
| 3 | Кислород | 51,50 | 725 | 24 | 0,1 |
| 4 | Углекислый газ | 60,00 | 730 | 15 | 0,15 |

*Продолжение таблицы 1.7*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | Монооксид углерода | 46,40 | 570 | 120 | 0,25 |
| 6 | Водород | 59,90 | 720 | 27 | 0,50 |
| 7 | Диоксид серы | 48,20 | 660 | 10 | 0,35 |
| 8 | Метан | 63,00 | 735 | 15 | 0,03 |
| 9 | Аммиак | 56,60 | 675 | 32 | 0,01 |
| 10 | Этилен | 58,80 | 740 | 46 | 0,02 |
| 11 | Монооксид азота | 45,10 | 635 | 50 | 0,4 |
| 12 | Диоксид азота | 50,00 | 680 | 150 | 0,05 |
| 13 | Водяной пар | 66,00 | 753 | 38 | 0,45 |
| 14 | Хлор | 51,20 | 755 | 23 | 0,55 |
| 15 | Ацетилен | 52,50 | 735 | 100 | 0,04 |
| 16 | Воздух | 47,90 | 745 | 35 | 0,12 |
| 17 | Азот | 64,30 | 737 | 58 | 0,28 |
| 18 | Кислород | 59,6 | 692 | 48 | 0,3 |
| 19 | Углекислый газ | 45,20 | 645 | 22 | 0,2 |
| 20 | Монооксид углерода | 52,70 | 730 | 18 | 0,1 |
| 21 | Водород | 60,50 | 756 | 28 | 0,15 |
| 22 | Диоксид серы | 49,40 | 733 | 30 | 0,25 |
| 23 | Метан | 53,80 | 749 | 32 | 0,50 |
| 24 | Аммиак | 54,30 | 655 | 20 | 0,35 |
| 25 | Этилен | 44,10 | 665 | 25 | 0,45 |
| 26 | Монооксид азота | 57,80 | 735 | 35 | 0,35 |
| 27 | Диоксид азота | 61,60 | 748 | 35 | 0,03 |
| 28 | Водяной пар | 58,20 | 682 | 40 | 0,01 |
| 29 | Хлор | 55,30 | 635 | 15 | 0,04 |
| 30 | Ацетилен | 65,00 | 750 | 50 | 0,12 |

# 2 ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ.

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГИДРОСТАТИКИ И ГИДРОДИНАМИКИ. РЕАЛЬНЫЕ И ИДЕАЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ

# 2.1 Основные понятия гидравлики

***Удельный вес*** γ есть вес жидкости в единице объёма:

γ = *G / W* (2.1)

где *G* – вес однородной жидкости, Н;

*W* – объём, занимаемый жидкостью, м3.

Удельный вес пресной воды при температуре 4 оС равен 9 810 Н/м3.

***Плотность*** *ρ* есть масса жидкости в единице объёма:

*ρ* = *m / W* (2.2)

где *m* – масса однородной жидкости, кг;

*W* – объём, занимаемый жидкостью, м3.

В гидравлических расчётах принимают плотность пресной воды равной 1000 кг/м3, если не оговорены температурные условия. В таблице 2.1 приве­дены значения плотности воды при разных температурах.

Таблица 2.1 - Плотность воды при разных температурах

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура  *t*, оС | Плотность  *ρ*, кг/м3 | Температура  *t*, оС | Плотность  *ρ*, кг/м3 | Температура  *t*, оС | Плотность  ρ, кг/м3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | 999,87 | 30 | 995,67 | 70 | 977,81 |
| 4 | 1000 | 40 | 992,24 | 80 | 971,83 |
| 10 | 999,73 | 50 | 988,79 | 90 | 965,34 |
| 20 | 998,23 | 60 | 983,24 | 100 | 959,09 |

Известно, что

*G*  = *m · g* (2.3)

где *g* – ускорение свободного падения, (для гидравлических расчётов принимается равным 9,81 м/с2).

Таким образом, между удельным весом и плотностью существует связь

γ = *ρ* *· g* (2.4)

Плотность смеси *ρ*см определяется по формуле:

 (2.5)

или  (2.6)

где *m*1 – масса жидкости, находящейся в резервуаре, плотностью *ρ*1, кг;

*W*1 – объём жидкости, находящейся в резервуаре, плотностью *ρ*1, м3;

*m*2 – масса, дополнительно закачанной жидкости для получения смеси плотностью *ρ*1, м3;

*W*2 – объём, дополнительно закачанной жидкости для получения смеси плотностью *ρ*1, м3.

Значения плотности капельных жидкостей при температуре 20 оС приве­дены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Плотность капельных жидкостей (при *t* = 20 оС) и некоторых газов (при *t* = 15 оС и *p* = 0,1 мПа)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Жидкость или газ | Плотность  *ρ*, кг/м3 | Жидкость или газ | Плотность  *ρ*, кг/м3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Мазут обыкновенный | 889 – 920 | Красочные составы | 900 – 1200 |
| Мазут жидкий | 929 – 938 | Масло соляровое | 879 – 889 |
| Бензин авиационный | 739 – 780 | Масло минеральное | 877 – 892 |
| Битум | 929 – 949 | Нефть | 760 – 900 |
| Вода морская | 1002 – 1030 | Ртуть | 13550 |
| Глицерин безводный | 1250 | Спирт этиловый (безводный) | 790 |
| Дёготь каменноугольный | 1030 | Штукатурные растворы | 2000 – 2500 |
| Керосин | 792 – 860 | Эфир этиловый | 715 – 719 |
| Воздух | 1,21 | Кислород | 1,34 |
| Водород | 0,085 | Углекислый газ | 0,78 |

***Сжимаемость*** – способность жидкости уменьшаться в объёме при увели­чении давления – характеризуется коэффициентом объёмного сжатия *β*W, кото­рый показывает относительное изменение объёма жидкости на единицу измене­ния давления:

 (2.7)

где *W* – первоначальный объём жидкости при атмосферном давлении, м3;

Δ*W* – уменьшение объёма жидкости при увеличении давления на Δ*p*.

В гидравлических расчётах коэффициент объёмного сжатия для воды принимают равным 1/(20∙108) м2/Н.

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия, называется объём­ным модулем упругости жидкости *E*:

*E* = 1 / *β*W (2.8)

Для воды объёмный модуль упругости *E* ≈ 2∙109 Па.

***Температурное расширение*** – способность жидкости изменяться в объёме при изменении температуры – характеризуется коэффициентом температурного расширения *β*t , который выражает относительное изменение объёма жидкости при изменении температуры на один градус:

 (2.9)

где Δ*W* – изменение объёма, соответствующее изменению температуры на величину Δ*t*, м3.

Коэффициент температурного расширения капиллярных жидкостей изме­няется незначительно, но в практике расчёта отопительных систем его учитывают. В расчётах для воды можно принимать *β*t ≈ 1∙10-4 °С-1.

***Вязкость*** – способность жидкости оказывать сопротивление касательным усилиям, стремящимся сдвинуть одни частицы жидкости по отношению к другим. Сила внутреннего трения в жидкости (касательное напряжение) *τ* на единицу площади определяется по закону Ньютона:

 (2.10)

где *μ* – динамическая вязкость жидкости, Н с/м2;

*du*/*dy* – градиент скорости в направлении, перпендикулярном течению.

Значение динамической вязкости зависит от рода жидкости и её температуры. Динамическая вязкость μ измеряется в пуазах (П):

1 П = 1 дин∙с/см2 = 0,1 Па·с.

Отношение динамической вязкости жидкости к её плотности называется кинематической вязкостью ν:

ν = *μ* / *ρ* (2.11)

Таблица 2.3 - Динамическая и кинематическая вязкость воды при разных температурах

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура  *t*, оС | Динамическая  вязкость  *μ*, Па·с | Кинематическая вязкость  ν, 10-6 м2/с | Температура  *t*, оС | Динамическая  вязкость  *μ*, Па·с | Кинематическая вязкость  ν, 10-6 м2/с |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | 0,00179 | 1,79 | 16 | 0,00112 | 1,11 |
| 6 | 0,00147 | 1,47 | 18 | 0,00106 | 1,06 |
| 8 | 0,00139 | 1,38 | 20 | 0,00101 | 1,01 |
| 10 | 0,00131 | 1,31 | 30 | 0,0008 | 0,81 |
| 12 | 0,00124 | 1,23 | 40 | 0,00065 | 0,60 |
| 14 | 0,00117 | 1,17 | 50 | 0,00055 | 0,56 |

Кинематическая вязкость измеряется в стоксах (Ст):

1 Ст = 1 см2/с = 10-4 м2/с.

Вязкость жидкости практически не зависит от давления, но значительно

уменьшается с увеличением температуры. В таблице 2.3 приведены значения динамической и кинематической вязкости воды.

В таблице 2.4 приведены значения кинематической вязкости некоторых жидкостей и газов.

Таблица 2.4 - Кинематическая вязкость некоторых жидкостей (при *t* = 20 °С) и некоторых газов (при *t* = 15 °С и *p* = 0,1 мПа)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Жидкость или газ | Кинематическая вязкость  ν, 10-6 м2/с | Жидкость или газ | Кинематическая вязкость  ν, 10-6 м2/с |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Анилин | 4,3 | Масло минеральное | 313 – 1450 |
| Бензин | 0,83 – 0,93 | Нефть | 8,1 – 9,3 |
| Вода пресная | 1,01 | Ртуть | 0,11 |
| Глицерин безводный | 4,1 | Воздух | 14,5 |
| Дизельное топливо | 5,0 | Водород | 94,5 |
| Керосин | 2,0 – 3,0 | Кислород | 1,4 |
| Красочные растворы | 90 – 120 | Углекислый газ | 7,2 |

На практике вязкость жидкостей определяется вискозиметрами и чаще всего выражается в градусах Энглера °*Е* – так называемая условная вязкость. Для перехода от условной вязкости в градусах Энглера °*Е* к кинематической вязкости в стоксах (Ст) служит эмпирическая формула

ν = (0,0731·°*Е* – 0,0631) / °*Е* (2.12)

Если в задаче не оговариваются температурные условия, то значения кинематической и динамической вязкости принимаются при температуре 20 °С.

***Идеальная жидкость*** – это воображаемая невязкая и несжимаемая абсолютно подвижная жидкость, не оказывающая сопротивления разрыву.

***Реальная жидкость*** – жидкость, которая встречается в природе: вязкая и сжимаемая.

# 2.2 Основные понятия гидростатики

***Гидростатическим давлением*** (г.с.д.)называют предел отношения силы Δ*P*, действующей на элементарную площадку, к площади этой площадки Δ*S*, которая, в свою очередь, стремится к нулю:

 (2.13)

Г.с.д. характеризует внутреннее напряжение сжатия и обладает следую­щими свойствами:

1) г.с.д. всегда направлено по внутренней нормали к площадке действия;

2) г.с.д. в любой точке жидкостной системы по всем направлениям одинаково, т. е. не зависит от ориентации в пространстве площадки, на которую оно действует.

***Абсолютное (или полное) гидростатическое давление*** *P*ав данной точке по основному уравнению гидростатики равно

*P*а *= P*о+ *ρ g h*а (2.14)

где *P*о – поверхностное давление (давление на свободной поверхности жидкости), Па;

*ρ g h*а – весовое давление (вес столба жидкости высотой *h*а с площадью поперечного сечения, равной единице);

*ρ* – плотность жидкости, кг/м3;

*g* – ускорение свободного падения, м/с2;

*h*а – глубина погружения данной точки под свободную поверхность.



*H*

*ρgh*

*b*

*h*

*ρgH*

Сила гидростатического давления на плоскую стенку произвольной формы равна произведению давления в центре тяжести этой стенки на её площадь. В общем случае формула для определения силы имеет вид:

Δ*P* *=* (*P*о+ *ρ g h*с) *S* (2.15)

где *S* – площадь данной плоской стенки, смоченная жидкос­тью, м2;

*h*с – глубина погружения цен­тра тяжести смоченной плос­кой стенки под свободную поверхность.

Рисунок 3- Эпюра гидростатичес­кого давления

Графически сила г.с.д. на плоскую стенку может быть определена как объём эпюры г.с.д.

***Эпюра гидростатического давления*** графически выражает закон распре­деления г.с.д. по глубине и строится на основании свойств г.с.д. (рисунок 3). Стрелкой указывается направление действия г.с.д. на поверхность. Линейный размер стрелки соответствует числовому значению г.с.д. в данной точке поверхности в принятом масштабе.

***Центром давления***называется точка приложения силы Δ*P* (точка Д). Местоположение этой точки определяется по формуле:

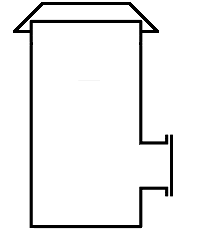
 (2.16)

где *h*Д – глубина погружения центра давления под свободную поверх­ность жидкости, м;

*I*c – момент инерции площади ω относительно оси, проходящей через её центр тяжести.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

**Задача 7**



*H*

*h*

*d*

Высота уровня жидкости в резе­рвуаре *Н*, м (рисунок 4). Относительная плотность жидкости Δ. В резервуаре над жидкостью поддерживается избыточное давление *Р*изб, ат. На высоте *h*, мм, от дна в резервуаре имеется круглый люк – лаз диаметром *d*, мм. Определить давление *Р*, Па, на дно резервуара и силу, дейст­вующую на крышку люк – лаза, *F*, КН. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.5.

Рисунок 4 - Жидкость в резервуаре

Таблица 2.5 - Исходные данные к задаче 7

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | *H*,  м | Δ | *Р*изб,  ат | *h*,  мм | *d*,  мм |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 7,6 | 0,96 | 0,1 | 800 | 760 |
| 2 | 3,0 | 1,04 | 0,3 | 500 | 800 |
| 3 | 10 | 0,76 | 0,4 | 1200 | 500 |
| 4 | 6,8 | 0,81 | 0,8 | 1400 | 600 |
| 5 | 9,0 | 0,90 | 1,3 | 2000 | 400 |
| 6 | 4,0 | 0,81 | 0,2 | 700 | 760 |
| 7 | 8,0 | 1,00 | 2,0 | 1500 | 700 |
| 8 | 12 | 0,85 | 0,2 | 1800 | 800 |
| 9 | 13 | 0,89 | 0,5 | 2000 | 600 |
| 10 | 4,0 | 1,24 | 1,4 | 600 | 650 |
| 11 | 5,0 | 0,80 | 2,5 | 600 | 500 |
| 12 | 2,0 | 1,20 | 0,7 | 700 | 550 |
| 13 | 9,0 | 1,83 | 0,5 | 900 | 450 |
| 14 | 8,0 | 1,15 | 0,4 | 1100 | 760 |
| 15 | 3,0 | 0,87 | 0,6 | 600 | 500 |
| 16 | 3,5 | 1,06 | 0,6 | 700 | 600 |
| 17 | 6,0 | 1,50 | 0,5 | 800 | 700 |
| 18 | 7,5 | 1,20 | 0,8 | 1500 | 800 |
| 19 | 3,2 | 1,63 | 0,1 | 800 | 450 |
| 20 | 4,4 | 0,71 | 0,3 | 600 | 550 |
| 21 | 5,0 | 0,88 | 0,4 | 700 | 600 |
| 22 | 3,0 | 1,20 | 1,2 | 800 | 800 |
| 23 | 5,5 | 0,80 | 1,5 | 630 | 500 |
| 24 | 6,0 | 0,87 | 0,6 | 700 | 450 |
| 25 | 8,0 | 1,00 | 1,0 | 1000 | 700 |
| 26 | 7,0 | 1,38 | 0,5 | 1000 | 650 |
| 27 | 10 | 0,83 | 0,2 | 1600 | 600 |
| 28 | 6,0 | 0,82 | 0,4 | 750 | 550 |
| 29 | 8,0 | 1,16 | 0,5 | 1000 | 500 |
| 30 | 12,5 | 0,89 | 0,3 | 1800 | 600 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

*Пример*

Высота уровня жидкости в резервуаре *Н* = 12,5 м. Относительная плот­ность жидкости Δ = 0,89. В резервуаре над жидкостью поддерживается избы­точное давление *Р*изб = 0,3 ат. На высоте *h* = 1800 мм, от дна в резервуаре имеется круглый люк – лаз диаметром *d* = 600 мм. Определить давление *Р*, Па, на дно резервуара и силу, действующую на крышку люк – лаза, *F*, кН.

*Решение:*

Рассчитаем давление жидкости на люк.

*Р* = *Р*о + *ρ*·*g*·*h*

Рассчитаем давление на поверхности жидкости, Па.

*Р*о =0,3 · 98100 = 29430 Па

Δ  = *ρ* / *ρ*в

*ρ* =Δ · *ρ*в = 0,89 · 1000 = 890 кг/см3

*Р* = 29430 +890·9,81·12,5 = 138566,25 = 1,39·105 Па

Рассчитаем значение силы действующей на люк

*F* = (*Р*о + *ρ*·*g*·*h*c) · *S*

*h*c = *H* – *h* = 12,5– 1,8 = 10,7 м

 м2

*F* = (29430 +890·9,81·10,7) · 0,2826 = 34,7 кН.

**Задача 8**

По трубопроводу расположенному горизонтально, перекачивается жид­кость с заданными внутренними характеристиками. Определить коэффициенты динамической *μ*, Па с, и кинематической ν, м2/с, вязкости этой жидкости при рабочей температуре *t*, °С. Исходные данные для расчета задачи приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Исходные данные к задаче 8

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Тип жидкости | *t*,  оС | №  вари­анта | Тип жидкости | *t*,  оС |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Анилин | 30 | 16 | Четыреххлористый углерод | 40 |
| 2 | Ацетон | 20 | 17 | Этилацетат | 70 |
| 3 | Бензол | 60 | 18 | Этиленхлорид | 15 |
| 4 | Бутиловый спирт | 40 | 19 | 100 % этиловый спирт | 55 |
| 5 | Вода | 40 | 20 | 60 % серная кислота | 80 |
| 6 | 98 % серная кислота | 70 | 21 | 90 % метиловый спирт | 60 |
| 7 | 100 % глицерин | 80 | 22 | 70 % уксусная кислота | 50 |
| 8 | Диэтиловый эфир | 15 | 23 | Фенол | 35 |
| 9 | 100 % метиловый спирт | 50 | 24 | 30 % метиловый спирт | 55 |
| 10 | Нитробензол | 10 | 25 | 40 % этиловый спирт | 30 |
| 11 | Сероуглерод | 35 | 26 | Бензол | 20 |
| 12 | Толуол | 100 | 27 | Толуол | 20 |
| 13 | 100 % уксусная кислота | 80 | 28 | 98 % серная кислота | 15 |
| 14 | Хлорбензол | 30 | 29 | 100 % глицерин | 18 |
| 15 | Хлороформ | 20 | 30 | Вода | 90 |

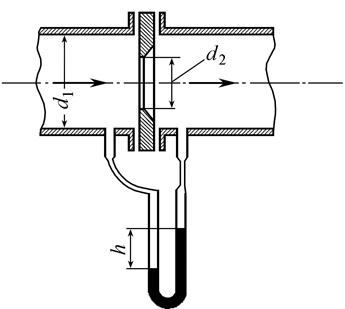
Задача 9

Определить коэффициенты динамической *μ*, Па с, и кинематической ν, м2/с, вязкости газа при температуре *t*, °С, и давлении *Р*изб, ат. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Исходные данные к задаче 9

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Газ | *t*,  оС | *Р*изб,  ат | №  вари­анта | Газ | *t*,  оС | *Р*изб,  ат |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | O2 | -50 | 2 | 16 | Воздух | -50 | 2 |
| 2 | NO | 0 | 1 | 17 | SO2 | 50 | 2,5 |
| 3 | CO2 | 50 | 11 | 18 | CO2 | 40 | 27 |
| 4 | HCl | 80 | 0,5 | 19 | NH3 | 500 | 79 |
| 5 | Воздух | 60 | 3 | 20 | H2 | -50 | 14 |
| 6 | N2 | -80 | 5 | 21 | O2 | 200 | 4 |
| 7 | SO2 | 30 | 0,2 | 22 | NO | 300 | 3 |
| 8 | CH4 | 80 | 3,5 | 23 | CH4 | 100 | 7 |
| 9 | H2O | 300 | 9 | 24 | H2O | 150 | 4 |
| 10 | NH3 | 600 | 49 | 25 | NH3 | 400 | 13 |
| 11 | C2H6 | 300 | 11 | 26 | C2H6 | 250 | 5 |
| 12 | H2 | -100 | 19 | 27 | H2 | 0 | 2 |
| 13 | C6H6 | 200 | 0,2 | 28 | CO | 90 | 4 |
| 14 | CO | 50 | 11 | 29 | Cl2 | -20 | 3 |
| 15 | Cl2 | 70 | 3 | 30 | Воздух | 20 | 5 |

**Задача 10**



*Н*

*d*

*D*

*ω*

В середине трубопровода с внут­ренним диаметром *D*, мм, (рисунок 4) установлена трубка Пито-Прандтля. Диф­ференциальный манометр трубки пока­зывает разность уровней *Н*, мм, и запол­нен жидкостью, относительная плотность которой Δ. По трубопроводу проходит газ *А*, абсолютное давление которого *Р*абс, ат, температура *t*, °С. Определить массовый расход газа *G*, кг/с. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.8.

Рисунок 4 -Устройство трубки Пито-Прандтля

Таблица 2.8 - Исходные данные к задаче 10

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | *D*,  мм | *Н*,  мм | Δ | Газ А | *Р*абс,  ат | *t*,  оС |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 320 | 5,8 | 1,0 | Воздух | 1,0 | 21 |
| 2 | 200 | 20 | 1,83 | Диоксид серы | 1,2 | 30 |
| 3 | 160 | 100 | 0,85 | Углекислый газ | 12,0 | 50 |
| 4 | 450 | 2,5 | 0,80 | Аммиак | 2,5 | 40 |
| 5 | 100 | 45 | 0,97 | Метан | 4,5 | 80 |
| 6 | 42 | 15 | 0,88 | Кислород | 1,3 | 45 |
| 7 | 50 | 4 | 13,6 | Монооксид азота | 2,0 | 27 |
| 8 | 32 | 4 | 13,6 | Азот | 2,0 | 150 |
| 9 | 60 | 25 | 1,27 | Монооксид углерода | 12,0 | 50 |
| 10 | 160 | 12 | 1,04 | Диоксид азота | 2,0 | 50 |
| 11 | 45 | 15 | 0,8 | Водяной пар | 1,5 | 10 |
| 12 | 125 | 8 | 1,15 | Соляная кислота | 1,5 | 80 |
| 13 | 280 | 10 | 0,994 | Этилен | 2,0 | 35 |
| 14 | 150 | 22 | 1,83 | Ацетилен | 1,4 | 40 |
| 15 | 30 | 5 | 1,0 | Водород | 1,8 | 15 |
| 16 | 55 | 18 | 1,27 | Аммиак | 2,0 | 20 |
| 17 | 170 | 6 | 13,6 | Метан | 4,0 | 70 |
| 18 | 100 | 25 | 0,8 | Хлор | 3,0 | 60 |
| 19 | 120 | 12 | 1,5 | Монооксид азота | 1,5 | 30 |
| 20 | 140 | 15 | 1,15 | Аммиак | 5,0 | 40 |
| 21 | 220 | 12 | 0,82 | Кислород | 2,5 | 60 |
| 22 | 70 | 21 | 1,15 | Водяной пар | 2,8 | 40 |
| 23 | 46 | 75 | 1,37 | Монооксид углерода | 10,0 | 85 |
| 24 | 150 | 22 | 1,12 | Этилен | 1,2 | 60 |
| 25 | 28 | 5 | 1,36 | Водород | 2,5 | 25 |
| 26 | 100 | 32 | 1,62 | Диоксид серы | 1,8 | 90 |
| 27 | 520 | 14 | 0,76 | Воздух | 3,2 | 18 |
| 28 | 100 | 92 | 1,18 | Углекислый газ | 3,8 | 22 |
| 29 | 70 | 29 | 1,53 | Хлор | 1,15 | 35 |
| 30 | 80 | 18 | 0,78 | Метан | 1,2 | 23 |

**Задача 11**

Определить эквивалентный диаметр *D*эк, мм, межтрубного пространства кожухотрубчатого теплообменника, состоящего из *n*, шт, труб диаметром *d*, мм. Внутренней диаметр кожуха *D*, мм. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 - Исходные данные к задаче 11

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | *n*,  шт | *d*,  мм | *D*,  мм | №  вари­анта | *n*,  шт | *d*,  мм | *D*,  мм |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 19 | 20 х 2 | 159 | 16 | 240 | 25 х 2 | 600 |
| 2 | 13 | 25 х 2 | 159 | 17 | 717 | 20 х 2 | 800 |
| 3 | 61 | 20 х 2 | 273 | 18 | 690 | 20 х 2 | 800 |
| 4 | 37 | 25 х 2 | 273 | 19 | 465 | 25 х 2 | 800 |
| 5 | 100 | 20 х 2 | 325 | 20 | 442 | 25 х 2 | 800 |
| 6 | 90 | 20 х 2 | 325 | 21 | 1173 | 20 х 2 | 1000 |
| 7 | 62 | 25 х 2 | 325 | 22 | 1138 | 20 х 2 | 1000 |
| 8 | 56 | 25 х 2 | 325 | 23 | 747 | 25 х 2 | 1000 |
| 9 | 181 | 20 х 2 | 400 | 24 | 718 | 25 х 2 | 1000 |
| 10 | 166 | 20 х 2 | 400 | 25 | 1701 | 20 х 2 | 1200 |
| 11 | 111 | 25 х 2 | 400 | 26 | 1658 | 20 х 2 | 1200 |
| 12 | 100 | 25 х 2 | 400 | 27 | 1083 | 25 х 2 | 1200 |
| 13 | 389 | 20 х 2 | 600 | 28 | 1048 | 25 х 2 | 1200 |
| 14 | 370 | 20 х 2 | 600 | 29 | 1580 | 20 х 2 | 1400 |
| 15 | 257 | 25 х 2 | 600 | 30 | 1545 | 25 х 2 | 1400 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

*Пример*

Определить эквивалентный диаметр *D*эк, мм, межтрубного пространства кожухотрубчатого теплообменника, состоящего из *n* = 1580 шт, труб диаметром *d* = 25 х 2 мм. Внутренней диаметр кожуха *D* = 1400 мм.

*Решение:*

Рассчитаем эквивалентный диаметр межтрубного пространства.

Площадь межтрубного пространства



Периметр межтрубного пространства



Эквивалентный диаметр будет равен четырем гидравлическим радиусам.





 мм

**Задача 12**

Определить режим течения теплоносителя в кольцевом пространстве теплообменника типа "труба в трубе". Диаметр наружной трубы *D*, мм, внутренней *d*, мм. Расход теплоносителя *G*, кг/ч, его средняя температура *t*, °С. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 - Исходные данные к задаче 12

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Теплоноситель | *D*,  мм | *d*,  мм | *G*,  кг/ч | *t*,  оС |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Анилин | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 4600 | 25 |
| 2 | Ацетон | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 4050 | 30 |
| 3 | Бензол | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 4150 | 35 |
| 4 | Гексан | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 3900 | 40 |
| 5 | Фенол расплавленный | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 4000 | 50 |
| 6 | 100 %-ный метиловый спирт | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 3600 | 48 |
| 7 | 100 %-ный этиловый спирт | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 4200 | 56 |
| 8 | Толуол | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 4460 | 46 |
| 9 | 100 %-ная уксусная кислота | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 6750 | 15 |
| 10 | Четыреххлористый углерод | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 6800 | 28 |
| 11 | Этилацетат | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 5220 | 32 |
| 12 | 50 %-ный глицерин | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 5800 | 20 |
| 13 | 98 %-ная серная кислота | 89 х 4 | 57 х 3,5 | 8780 | 16 |
| 14 | Бутиловый спирт | 219 х 6 | 159 х 4,5 | 6400 | 30 |
| 15 | Вода | 76 х 4 | 48 х 4 | 6800 | 60 |
| 16 | Анилин | 108 х 4 | 76 х 4 | 6200 | 20 |
| 17 | Бензол | 133 х 4 | 89 х 4 | 3500 | 40 |
| 18 | Гексан | 219 х 6 | 159 х 4,5 | 5000 | 30 |
| 19 | 60 %-ная серная кислота | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 10200 | 20 |
| 20 | Бутиловый спирт | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 8700 | 40 |
| 21 | 50 %-ный глицерин | 219 х 6 | 159 х 4,5 | 6700 | 80 |
| 22 | Сероуглерод | 76 х 4 | 48 х 4 | 7600 | 20 |
| 23 | Нитробензол | 89 х 4 | 68 х 4 | 4850 | 40 |
| 24 | Хлорбензол | 133 х 4 | 89 х 4 | 7800 | 35 |
| 25 | Хлороформ | 219 х 6 | 159 х 4,5 | 7650 | 38 |
| 26 | Четыреххлористый углерод | 108 х 4 | 76 х 4 | 8600 | 30 |
| 27 | 100 %-ный метиловый спирт | 159 х 4,5 | 108 х 4 | 6400 | 25 |
| 28 | 100 %-ный этиловый спирт | 219 х 6 | 159 х 4,5 | 8200 | 28 |
| 29 | Толуол | 76 х 4 | 48 х 4 | 5450 | 45 |
| 30 | Вода | 108 х 4 | 57 х 3,5 | 5400 | 80 |

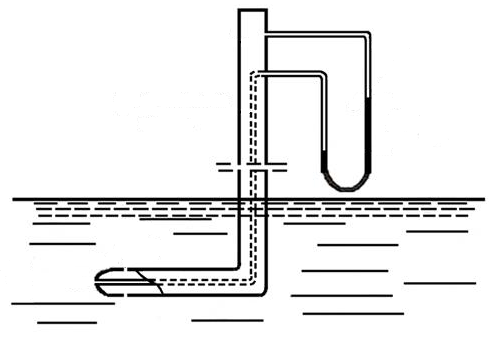
**Задача 13**

Определить режим течения теплоносителя в змеевике, свитом из трубы диаметром *d*, мм. Диаметр витка змеевика *D*, мм. Скорость теплоносителя *ω*, м/с. средняя температура теплоносителя *t*, °С. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Исходные данные к задаче 13

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Теплоноситель | *d*,  мм | *D*,  мм | *ω*,  м/с | *t*,  оС |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Сероуглерод | 27 х 2 | 560 | 0,35 | 45 |
| 2 | Хлороформ | 50 х 3 | 980 | 0,34 | 28 |
| 3 | Вода | 45 х 2,5 | 600 | 0,08 | 80 |
| 4 | Хлорбензол | 35 х 1,5 | 820 | 0,22 | 25 |
| 5 | Нитробензол | 44 х 2,5 | 700 | 0,36 | 30 |
| 6 | Сероуглерод | 44,5 х 2,5 | 820 | 0,06 | 20 |
| 7 | 60 %-ная серная кислота | 38 х 3,5 | 560 | 0,42 | 20 |
| 8 | Бутиловый спирт | 20 х 2 | 800 | 0,45 | 40 |
| 9 | Гексан | 45 х 2,5 | 1200 | 0,48 | 30 |
| 10 | Анилин | 20 х 2 | 800 | 0,62 | 20 |
| 11 | Фенол расплавленный | 25 х 3 | 380 | 0,54 | 50 |
| 12 | Толуол | 48 х 3 | 840 | 0,40 | 45 |
| 13 | 100 %-ная уксусная кислота | 45 х 3 | 650 | 0,34 | 15 |
| 14 | Бензол | 25 х 3 | 580 | 0,25 | 40 |
| 15 | Ацетон | 32 х 2,5 | 500 | 0,14 | 30 |
| 16 | Хлороформ | 38 х 2,5 | 640 | 0,14 | 38 |
| 17 | Вода | 25 х 3 | 620 | 0,16 | 60 |
| 18 | Хлорбензол | 32 х 2,5 | 760 | 0,50 | 35 |
| 19 | Нитробензол | 20 х 2 | 580 | 0,30 | 40 |
| 20 | 98 %-ная серная кислота | 48 х 4 | 1000 | 0,92 | 16 |
| 21 | Бутиловый спирт | 25 х 2 | 900 | 0,35 | 30 |
| 22 | Этилацетат | 38 х 3,5 | 650 | 0,32 | 32 |
| 23 | 100 %-ный этиловый спирт | 42 х 2,5 | 1150 | 0,32 | 56 |
| 24 | 50 %-ный глицерин | 48 х 4 | 1000 | 0,10 | 70 |
| 25 | 100 %-ный метиловый спирт | 38 х 2,5 | 1100 | 0,30 | 48 |
| 26 | Гексан | 30 х 2,5 | 750 | 0,20 | 40 |
| 27 | Анилин | 32 х 2,5 | 450 | 0,92 | 25 |
| 28 | 50 %-ный глицерин | 35 х 1,5 | 640 | 0,45 | 20 |
| 29 | Четыреххлористый углерод | 50 х 3 | 880 | 0,48 | 28 |
| 30 | Бензол | 32 х 2,5 | 600 | 0,16 | 35 |

**Задача 14**



*Н*

*D*

*ω*

По трубопроводу расположенному горизонтально, (рисунок 5) с внутренним диаметром *D*, мм, протекает жидкость относительной плотности Δ. В трубо­проводе установлена диафрагма с остры­ми краями (коэффициент расхода *α*). Диаметр отверстия диафрагмы *d*, мм. Ртутный дифманометр, присоединенный к диафрагме, показывает разность уров­ней *Н*, мм. Определить скорость жид­кости в трубопроводе *ω*, м/с, и ее расход *G*, кг/с. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.12.

Рисунок 5- Устройство установленной диафрагмы

Таблица 2.12 - Исходные данные к задаче 14

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | *D*,  мм | Δ | *d*,  мм | *α* | *Н*,  мм рт.ст. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 200 | 0,9 | 76 | 0,61 | 102 |
| 2 | 170 | 0,92 | 60 | 0,61 | 160 |
| 3 | 60 | 1,5 | 18 | 0,61 | 450 |
| 4 | 40 | 0,76 | 15 | 0,615 | 400 |
| 5 | 70 | 1,83 | 20 | 0,66 | 320 |
| 6 | 20 | 1,15 | 8 | 0,61 | 560 |
| 7 | 120 | 0,87 | 30 | 0,60 | 280 |
| 8 | 100 | 1,06 | 32 | 0,607 | 150 |
| 9 | 320 | 1,01 | 100 | 0,60 | 840 |
| 10 | 150 | 0,9 | 60 | 0,615 | 630 |
| 11 | 240 | 1,195 | 80 | 0,61 | 254 |
| 12 | 30 | 1,63 | 12 | 0,60 | 610 |
| 13 | 35 | 0,85 | 15 | 0,61 | 720 |
| 14 | 20 | 0,81 | 8 | 0,615 | 520 |
| 15 | 110 | 1,5 | 40 | 0,605 | 406 |
| 16 | 25 | 1,2 | 10 | 0,61 | 510 |
| 17 | 40 | 0,9 | 15 | 0,60 | 480 |
| 18 | 30 | 1,13 | 12 | 0,606 | 316 |
| 19 | 50 | 0,8 | 15 | 0,61 | 450 |
| 20 | 40 | 0,85 | 12 | 0,60 | 300 |
| 21 | 35 | 1,32 | 8 | 0,61 | 475 |
| 22 | 80 | 0,93 | 20 | 0,608 | 420 |
| 23 | 170 | 1,5 | 50 | 0,605 | 390 |
| 24 | 30 | 1,42 | 12 | 0,603 | 510 |
| 25 | 100 | 1,09 | 30 | 0,60 | 450 |
| 26 | 40 | 0,86 | 12 | 0,61 | 360 |
| 27 | 240 | 1,25 | 80 | 0,608 | 540 |
| 28 | 120 | 0,75 | 30 | 0,605 | 465 |
| 29 | 50 | 1,16 | 15 | 0,603 | 380 |
| 30 | 90 | 1,06 | 30 | 0,60 | 390 |

**Задача 15**

По стальному трубопроводу диаметром *D*, мм, и длиной *L*, м, передается газ в количестве *G*, кг/ч. Средние давление в сети *Р*, мм рт.ст., температура газа *t*, °С. Определить потерю давления на трение Δ*Р*, Па. Газ перекачивается на длину трубопровода. Найти мощность *N*, кВт, потребляемую насосом, приняв общий КПД насосной установки *η*. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 - Исходные данные к задаче 15

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | *D*,  мм | *L*,  м | Используемый газ | *G*,  кг/ч | *Р*,  мм рт.ст. | *t*,  оС | *η*,  дол.ед |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 207 | 1000 | Кислород | 120 | 1500 | 5 | 0,50 |
| 2 | 125 | 980 | Монооксид азота | 80 | 1480 | 35 | 0,60 |
| 3 | 100 | 620 | Углекислый газ | 65 | 1250 | 15 | 0,65 |
| 4 | 80 | 840 | Воздух | 140 | 950 | 25 | 0,68 |
| 5 | 150 | 780 | Азот | 85 | 1550 | 30 | 0,50 |
| 6 | 207 | 3910 | Диоксид серы | 90 | 1420 | 20 | 0,65 |
| 7 | 80 | 1200 | Метан | 125 | 1520 | 10 | 0,70 |
| 8 | 100 | 900 | Аммиак | 100 | 880 | 35 | 0,50 |
| 9 | 80 | 880 | Этан | 110 | 1400 | 40 | 0,60 |
| 10 | 70 | 1500 | Водород | 95 | 1220 | 27 | 0,50 |
| 11 | 125 | 950 | Бензол (пары) | 105 | 760 | 15 | 0,68 |
| 12 | 68 | 850 | Ацетилен | 140 | 1120 | 18 | 0,50 |
| 13 | 100 | 1050 | Водяной пар | 115 | 1240 | 20 | 0,60 |
| 14 | 80 | 1300 | Монооксид углерода | 135 | 950 | 5 | 0,55 |
| 15 | 150 | 820 | Хлор | 145 | 1460 | 30 | 0,65 |
| 16 | 68 | 940 | Диоксид азота | 90 | 1080 | 10 | 0,60 |
| 17 | 80 | 1080 | Воздух | 120 | 940 | 35 | 0,70 |
| 18 | 100 | 1320 | Ацетилен | 160 | 1250 | 20 | 0,55 |
| 19 | 125 | 820 | Углекислый газ | 100 | 1110 | 15 | 0,65 |
| 20 | 100 | 930 | Диоксид серы | 115 | 1240 | 18 | 0,58 |
| 21 | 68 | 1420 | Метан | 145 | 2420 | 24 | 0,55 |
| 22 | 207 | 860 | Аммиак | 84 | 1120 | 35 | 0,60 |
| 23 | 150 | 1400 | Этилен | 168 | 760 | 42 | 0,70 |
| 24 | 81 | 1220 | Водород | 124 | 1460 | 16 | 0,65 |
| 25 | 100 | 1200 | Бензол (пары) | 118 | 1140 | 20 | 0,70 |
| 26 | 150 | 1320 | Этан | 128 | 1210 | 22 | 0,50 |
| 27 | 81 | 980 | Углекислый газ | 116 | 1380 | 18 | 0,55 |
| 28 | 125 | 1440 | Соляная кислота (пары) | 110 | 1180 | 24 | 0,58 |
| 29 | 100 | 840 | Монооксид азота | 144 | 1280 | 32 | 0,65 |
| 30 | 68 | 900 | Кислород | 100 | 38 |  | 0,70 |

# 3 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

# 3.1 Условия подобия физических процессов

Большинство реальных процессов конвективного теплообмена исследуется на моделях. Модель представляет собой копию реального объекта. Для изучения подобных процессов и вывода закономерностей необходимо соблюдать следующие условия:

1)  подобные процессы должны иметь подобные поля скорости и температуры;

2)  подобные процессы должны иметь одинаковую физическую природу и подчиняться одним и тем же физическим законам;

3)  подобные процессы должны осуществляться в геометрически подобных системах;

4)  поля физических величин, определяющих подобные процессы, должны быть заданы на своих границах подобным образом (подобие граничных условий);

5)  в подобных процессах должны быть равны одноименные критерии подобия.

Числа (критерии) подобия являются одним из центральных понятий теории подобия. Они представляют собой безразмерный комплекс, состав­ленный из наперед заданных параметров изучаемого процесса.

Таким комплексам присваивают имена ученых, которые внесли значи­тельный вклад в развитие гидродинамики и теплообмена.

# 3.2 Некоторые из основных критериев подобия и их физический смысл

Теория подобия позволяет значительно упростить функциональную зави­симость при теплообмене и сделать ее более универсальной. Для этой цели используются критерии подобия. Если найти конкретный вид такой без­размерной зависимости при помощи эксперимента, то она будет справедлива для всех подобных процессов и позволит рассчитать коэффициент теплоотдачи во всех этих случаях. Рассмотрим наиболее часто используемые критерии подобия:

***Критерий Рейнольдса*** это критерий подобия, отражающий соотношение сил инерции и сил вязкости в потоке жидкости. Также он характеризует, отношение нелинейного и диссипативного членов в уравнении Навье – Стокса.

 (3.1)

где *ρ* – плотность жидкости, кг/м3;

*ω*o– определяющая (средняя) скорость потока, м/с;

*l*o – определяющий размер, м;

*μ* – динамический коэффициент вязкости, Н с/м2;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м2/с.

По этому критерию определяется режим движения жидкости.

***Ламинарный режим*** *R*e < 2300 – частицы жидкости движутся парал­лельно друг другу со стационарной траекторией.

***Турбулентный режим*** *R*e > 10000 – хаотический режим течения с пос­тоянно меняющейся траекторией движения частиц.

***Переходный режим*** 2300 ≤ *R*e ≤ 10000

Критерий назван в честь выдающегося английского физика Осборна Рейнольдса, автора многочисленных пионерских работ по гидродинамике.

***Критерий Пекле*** это критерий подобия физический смысл, которого состоит в том, что он определяет соотношение между конвективным тепловым потоком и тепловым потоком теплопроводности, то есть является критерием подобия для процессов конвективного теплообмена.

 (3.2)

где *ρ* – плотность жидкости, кг/м3;

*ω*o– определяющая (средняя) скорость потока, м/с;

*c*p – изобарная массовая теплоемкость, кДж/(кг·К);

*l*o – определяющий размер, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Названо по имени французского физика Ж. К. Пекле.

***Критерий Прандтля*** это критерий подобия тепловых процессов в жидкостях и газах, учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу:

 (3.3)

где *μ* – динамический коэффициент вязкости, Н с/м2;

*c*p – изобарная массовая теплоемкость, кДж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ν – кинематический коэффициент вязкости, м2/с;

*a* – коэффициент температуропроводности, м2/c.

 (3.4)

Названо в честь немецкого физика Людвига Прандтля, изучавшего воп­росы тепло- и массообмена в пограничных слоях.

***Критерий Грасгофа*** это критерий подобия, характеризующий наличие в теплообмене свободной конвекции, а так же является мерой соотношения архимедовой подъемной (выталкивающей) силы, вызванной неравномерным распределением плотности жидкости, газа в неоднородном поле температур, к силам вязкого сопротивления среды.

 (3.5)

где *g* – ускорение свободного падения, м/с2;

*β* – коэффициент объемного расширения (учитывается только для газов), 1/К;

Δ*t* – температурный напор, оС;

*l*o – определяющий размер, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м2/с.

 (3.6)

Критерий назван в честь выдающегося немецкого механика и машиностро-

ителя Франца Грасгофа.

***Критерий Нуссельта*** это один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью тепло­обмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт тепло­проводности (в условиях неподвижной среды). Вторым значением данного критерий подобия, является характеристика отношение термического сопро­тивления теплопроводности слоя жидкости толщиной *l* к термическому сопро­тивлению теплоотдачи.

 (3.7)

где *α* – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м2·К);

*l*o – определяющий размер, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Решение любой задачи сводится к нахождению эмпирической зависимости для конкретного вида теплообмена с определением критерия *Nu*. А затем и

коэффициента температуропроводности *α*.

 (3.8)

Названо в честь немецкого инженера Вильгельма Нуссельта.

***Критерий Фурье*** это критерий подобия, характеризующий нестационар­ные тепловые процессы. Характеризует соотношение между скоростью изме­нения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри рассматриваемой системы (тела), который зависит от размеров тела и коэффициента его температуропроводности:

 (3.9)

где *а* – коэффициент температуропроводности, м2/с;

τ – определенное время, с;

*l*o – определяющий линейный размер тела, м.

Число Фурье является критерием гомохронности тепловых процессов, то есть связывает времена различных эффектов. Критерий назван в честь фран­цузского физика и математика Жана Фурье.

***Критерий Фруда*** это критерий подобия, характеризующий движение жидкостей и газов, является безразмерной величиной. Применяется в случаях, когда существенно воздействие внешних сил. Введено Уильямом Фрудом в 1870 году.

 (3.10)

где *ω* – определяющая скорость потока, м/с;

*g* – ускорение свободного падения, м/с2;

*l*o – определяющий размер, м.

***Критерий Эйлера*** это критерий подобия, характеризующий отношение сил давления и сил инерции. Для несжимаемой жидкости с постоянными физическими параметрами большой интерес представляет не абсолютное давление *Р*, а его изменение Δ*Р*.

 (3.11)

где Δ*Р* – изменение абсолютного давления, кПа;

*ρ* – плотность жидкости, кг/м3;

*ω* – определяющая скорость потока, м/с;

***Критерий Архимеда*** это критерий подобия, характеризующий соотно­шение между архимедовой силой, обусловленной различием плотностей в отдельных областях рассматриваемой системы, и вязкими силами в основном потоке

 (3.12)

где *g* – ускорение свободного падения, м/с2;

*l*o – определяющий линейный размер тела, м;

*ρ*l – плотность среды, кг/м3;

*ρ* – плотность тела, кг/м3;

*μ* – динамическая вязкость среды, Па·с;

*ν* – кинематическая вязкость среды, м2/с.

Был назван в честь древнегреческого учёного Архимеда.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

**Задача 16**

Какой должен быть взят геометрический масштаб модели *М*, если в промышленном аппарате движется рабочая жидкость, а в модели – вода, кинематический коэффициент вязкости которой в *n* раз меньше, чем у рабочей жидкости? Какую скорость *ω*, м/с надо дать воде в модели, если скорость рабочей жидкости в промышленном аппарате *ω*р, м/с. Моделируются однов­ременно силы трения и силы тяжести. Исходные данные для расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Исходные данные к задаче 16

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вари­анта | Рабочая жидкость | *n*, | *ω*,  м/с | №  вари­анта | Рабочая жидкость | *n*, | *ω*,  м/с |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Анилин | 8,66 | 2,00 | 16 | Бензол | 1,32 | 1,75 |
| 2 | Бензол | 1,28 | 3,00 | 17 | Метиловый спирт | 1,15 | 0,80 |
| 3 | Метиловый спирт | 1,10 | 3,40 | 18 | Этиловый спирт | 45,0 | 2,14 |
| 4 | Нефть | 50,0 | 1,00 | 19 | Нефть | 1,8 | 6,06 |
| 5 | Этиловый спирт | 1,72 | 4,80 | 20 | Толуол | 1,18 | 4,12 |
| 6 | Толуол | 1,12 | 1,05 | 21 | Уксусная кислота | 2,78 | 3,82 |
| 7 | Уксусная кислота | 2,67 | 1,60 | 22 | Хлороформ | 1,35 | 5,08 |
| 8 | Тетрахлорметан | 1,21 | 2,40 | 23 | Глицерин | 12,14 | 1,04 |
| 9 | Глицерин | 11,58 | 3,66 | 24 | 98 % Серная кислота | 36,04 | 1,80 |
| 10 | 98 % Серная кислота | 35,87 | 4,12 | 25 | Бутиловый спирт | 6,12 | 2,86 |
| 11 | Бутиловый спирт | 5,99 | 3,86 | 26 | Нитробензол | 2,72 | 3,18 |
| 12 | 60 % Серная кислота | 10,02 | 1,88 | 27 | Хлорбензол | 1,41 | 5,24 |
| 13 | Нитробензол | 2,55 | 1,24 | 28 | Соляная кислота | 9,82 | 1,25 |
| 14 | Хлорбензол | 1,38 | 1,44 | 29 | Тетрахлорметан | 1,50 | 1,14 |
| 15 | Анилин | 9,02 | 3,45 | 30 | Хлористый метилен | 1,28 | 0,9 |

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

*Пример*

Какой должен быть взят геометрический масштаб модели *М*, если в промышленном аппарате движется рабочая жидкость, а в модели – вода, кинематический коэффициент вязкости которой в *n* = 158 раз меньше, чем у рабочей жидкости? Какую скорость *ω*, м/с надо дать воде в модели, если скорость рабочей жидкости в промышленном аппарате *ω*р = 0,56 м/с. Моделируются одновременно силы трения и силы тяжести.

*Решение:*

Для одновременного подобия сил трения и сил тяжести нужно:

*Re*1 = *Re*2

 и 

где *Re*1 – критерий Рейнольдса для промышленного аппарата;

*ω*1– скорость рабочей жидкости, м/с;

*l*1 – определяющий линейный размер, м;

ν1 – коэффициент кинематический вязкости, рабочей жидкости, м2/с;

*Re*2– критерий Рейнольдса для модели, м/с;

*ω*2– скорость воды, м/с;

*l*2 – определяющий линейный размер, м;

ν2 – коэффициент кинематический вязкости воды, м2/с.

Из равенства критериев Рейнольдса



Критерий Фруда:

*Fr*1 = *Fr*2

 и 



Из равенства критериев Фруда



Тогда



Из условия



Следовательно *l*1 больше *l*2 в 29,27 раз, то есть М = 1 : 29,27;

 м/с

**Задача 17**

В результате исследования кинетики осаждения твердых частиц в жидкости получены следующие значения критерия Рейнольдса и Архимеда. Определить постоянные критериального уравнения *Re* = *mAr*n и режим осаждения. Исходные данные для расчета приведены в таблице 3.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Ar*5 | 11 | 1,74 | 5011870 | 1,26 | 83000 | 7943279 | 63096 | 1,32 | 31623 | 25119 | 6309568 | 7943279 | 39811 | 1,58 | 1,38 | 3981068 | 6309568 | 2,0 | 25119 | 7943279 |
| *Ar*4 | 10 | 3,98 | 1 · 106 | 2,51 | 6310 | 2511884 | 15849 | 3,98 | 1 · 104 | 1 · 104 | 2511884 | 3981068 | 6310 | 5,01 | 3,16 | 1258925 | 1995261 | 3,47 | 3981 | 3981068 |
| *Ar*3 | 9 | 6,30 | 501187 | 6,31 | 501 | 630957 | 2512 | 7,94 | 1000 | 1995 | 1 · 106 | 1 · 106 | 631 | 7,94 | 7,94 | 630957 | 794328 | 6,31 | 1000 | 1 · 106 |
| *Ar*2 | 8 | 10,97 | 251188 | 15,85 | 200 | 251188 | 398 | 12,59 | 158,5 | 631 | 501187 | 501187 | 158,5 | 15,85 | 19,95 | 199526 | 316228 | 14,45 | 199 | 316228 |
| *Ar*1 | 7 | 36 | 83000 | 31,62 | 36 | 1 · 105 | 63 | 25,12 | 50,12 | 100 | 109648 | 158489 | 63,10 | 25,12 | 36,31 | 83000 | 125893 | 25,12 | 50,12 | 158489 |
| *Re*5 | 6 | 0,1 | 3981 | 0,13 | 500 | 5495 | 398 | 0,08 | 251 | 288 | 3630 | 3162 | 251 | 0,16 | 0,1 | 3162 | 4365 | 0,10 | 159 | 5495 |
| *Re*4 | 5 | 0,23 | 1738 | 0,20 | 79,43 | 3162 | 159 | 0,25 | 100 | 145 | 2291 | 2512 | 79,43 | 0,25 | 0,25 | 1995 | 2512 | 0,16 | 39,81 | 3981 |
| *Re*3 | 4 | 0,36 | 1259 | 0,40 | 12,59 | 1585 | 39,81 | 0,40 | 25,12 | 40,0 | 1514 | 1445 | 15,85 | 0,50 | 0,40 | 1259 | 1585 | 0,25 | 15,85 | 1995 |
| *Re*2 | 3 | 0,63 | 871 | 0,79 | 3,98 | 1000 | 10,0 | 0,79 | 6,31 | 16,0 | 1047 | 1097 | 6,31 | 0,79 | 0,79 | 794 | 1000 | 0,50 | 5,01 | 1148 |
| *Re*1 | 2 | 2,0 | 500 | 1,26 | 2,0 | 631 | 3,98 | 1,26 | 2,51 | 4,0 | 501 | 661 | 2,51 | 1,59 | 1,26 | 500 | 631 | 0,79 | 1,82 | 794 |
| №  вари­анта | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |

Таблица 3.2 - Исходные данные к задаче 17

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 11 | 1,26 | 1,26 | 50119 | 5011870 | 79433 | 50119 | 7943279 | 1,59 | 79433 | 1,59 | 5011870 |
| 10 | 2,0 | 1,59 | 7943 | 1584891 | 19953 | 15849 | 2511884 | 3,16 | 19953 | 2,51 | 1584891 |
| 9 | 3,16 | 3,16 | 1585 | 398107 | 1585 | 2512 | 1 · 106 | 5,01 | 3981 | 6,31 | 724435 |
| 8 | 10 | 6,31 | 251 | 199526 | 398 | 398 | 251188 | 10 | 398 | 15,85 | 398107 |
| 7 | 31,62 | 15,85 | 63,0 | 1 · 105 | 100 | 63 | 1 · 105 | 19,95 | 63,0 | 31,62 | 173780 |
| 6 | 0,08 | 0,13 | 437 | 5012 | 398 | 398 | 3981 | 0,13 | 251 | 0,063 | 4365 |
| 5 | 0,13 | 0,16 | 126 | 3162 | 159 | 158 | 3020 | 0,25 | 100 | 0,1 | 2512 |
| 4 | 0,16 | 0,32 | 40,0 | 1380 | 25,12 | 38,02 | 1585 | 0,4 | 39,8 | 0,25 | 1585 |
| 3 | 0,55 | 0,63 | 10,0 | 1000 | 10,0 | 9,55 | 1000 | 0,79 | 10,0 | 0,63 | 1148 |
| 2 | 1,58 | 1,59 | 3,98 | 631 | 3,98 | 2,5 | 501 | 1,58 | 3,47 | 1,26 | 692 |
| 1 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

*Продолжение таблицы 3.2*

# 4 ТЕПЛОЕМКОСТЬ

# 4.1 Основные теоретические положения

Теплоемкостью называется отношение количества тепла, полученного или отданного в некотором процессе, и соответствующему приращению темпе­ратуры. Если приращение температуры бесконечно мало, то говорят об истиной теплоемкости

(4.1)

Если же это приращение имеет конечную величину, то говорят о средней теплоемкости в интервале температур *t*1 *÷ t*2

(4.2)

где *C*m – средняя массовая теплоемкость, Дж/(кг К);

*Q* – количество теплоты в термодинамическом процесс, Дж/кг;

*t*1 – начальная температура, оС (К);

*t*2 – конечная температура, оС (К).

Связь между истиной и средней теплоемкостями выражается следующим уравнением:

(4.3)

Теплоемкость, отнесенная к некоторой количественной единицы газа, называется удельной теплоемкостью. В зависимости от выбора количественной единицы различают удельные теплоемкости:

Массовую – *C* , Дж/(кг·К);

Объемную – *С'* , Дж/(м3·К);

Мольную – *Сμ* , Дж/(кмоль·К).

Связь между ними вытекает из отношений между количественными единицами:

(4.4)

Здесь *μ* – масса одного киломоля газа, кг/кмоль;

*ρ* – плотность газа при нормальных условиях, кг/м3

(4.5)

Теплоемкость газов зависит от рода газа,характера процесса и давления. Зависимость теплоемкости от характера процесса означает, что один и тот же газ в одних и тех же условиях будет иметь различную теплоемкость в зависимости от того, какой процесс совершается с газом. Особую роль в термодинамике играют теплоемкости двух процессов – изобарного *Сp* и изохорного *Сυ*. Связь между ними описывается уравнением Майера:

(4.6)

Ориентировочные значения теплоемкостей *Сρμ* и *Сυμ*, вычисленные на основе молекулярно-кинетической теории, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Значение теплоемкости

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Число атомов  в молекуле |  | |  | |
| Ккал/(кмоль\*К) | кДж/(кмоль\*К) |  |  |
| 1 | 5 | 20,93 | 3 | 12,56 |
| 2 | 7 | 29,31 | 5 | 20,93 |
| 3 и более | 9 | 37,68 | 7 | 29,31 |

Значения теплоемкостей в таблице получены без учета их зависимости от температуры, которая в технических расчетах должна обязательно учитываться. Это зависимость может быть принята линейной

*C = a* + bt (4.7)

Причем данное положение удовлетворяется для одно – и двухатомных газов с хорошей точностью, а для трехатомных газов рассматривается как первое приближение.

В таблице 4.2 приведены формулы для наиболее распространенных газов. Помимо этих формул часто приходится пользоваться таблицами, в которых даются значения средней теплоемкости в зависимости от температуры *t*. В этом случае средняя теплоемкость в интервале температур определяется по формуле

(4.8)

где значения ,выбираются из таблиц [1].Табличный способ задания теплоемкости имеет преимущество в том, что позволяет легко найти теплоемкость даже тогда, когда она зависит от температуры нелинейно.

При расчете газовых смесей теплоемкость

Ссм = , (4.9)

где *mi*-массовая доля компонента.

Количество теплоты, сообщаемое газу в данном процессе, определяется из уравнения.

*Q = Gcm(t*2 – *t*1*)=V*0*(t*2 – *t*1*)*  (4.10)

Таблица 4.2 -Значение теплоемкости линейно зависящей от температуры.

|  |  |
| --- | --- |
| Газ | Теплоемкость, кДж/(кг\*К) |
| В пределах 01000 | |
| Кислород | = 0.9127 + 0,000127 t |
| Азот | =1,0258 + 0,0000838 t |
| Оксид углерода | = 1,0304 + 0,0000958 t |
| Воздух | = 0,9952 + 0,0000935 t |

*Продолжение таблицы 4.2*

|  |  |
| --- | --- |
| Сернистый газ | = 0,6314 + 0,000155 t |
| Водяной пар | = 1,8401 + 0,000293 t |
| В пределах 0 | |
| Водород | = 14,2494 + 0,000596 t |
| Углекислый газ | = 0,8725 + 0,0002441 t |

**Задача 18**

Вычислить среднюю теплоемкость газа в заданном интервале температур , если считать теплоемкость:

а) постоянной;

б) линейно зависящей от температуры;

в) нелинейно зависящей от температуры;

Найти – расхождение (в %) результатов вычисления по пунктам .

Исходные данные для расчетов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3- Исходные данные для расчета

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я  цифра  шифра |  |  | 2-я  цифра  шифра | Род  газа | Характер процесса |
| 0 | 50 | 775 | 0 |  | Изохорный |
| 1 | 75 | 800 | 1 |  | Изобарный |
| 2 | 100 | 825 | 2 | *CO* | Изобарный |
| 3 | 125 | 850 | 3 |  | Изохорный |
| 4 | 150 | 875 | 4 |  | Изохорный |
| 5 | 175 | 900 | 5 |  | Изохорный |
| 6 | 200 | 925 | 6 |  | Изобарный |
| 7 | 225 | 950 | 7 |  | Изобарный |
| 8 | 250 | 975 | 8 |  | Изобарный |
| 9 | 275 | 1000 | 9 | воздух | Изохорный |

**Задача 19**

Определить объемный расход газа , необходимый для подогрева , л/мин,воды в газовой колонке, если теплота сгорания газа равна кДж/м3, а температуры воды на входе и выходе равны и соответственно. Теплоемкость воды принять равной =4,19 кДж/(кг К). Исходные данные для расчетов приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные данные для расчёта

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-вая цифра  шифра | Qr,  МДж/м3 | Vb,  л/мин | 2-ая цифра  шифра | t1 | t2 |
| 0 | 40 | 40 | 0 | 10 | 45 |
| 1 | 50 | 50 | 1 | 8 | 40 |
| 2 | 30 | 30 | 2 | 6 | 50 |
| 3 | 20 | 20 | 3 | 4 | 48 |
| 4 | 25 | 25 | 4 | 2 | 46 |

*Продолжение таблицы 4.4*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 35 | 35 | 5 | 3 | 38 |
| 6 | 45 | 45 | 6 | 5 | 40 |
| 7 | 15 | 15 | 7 | 7 | 47 |
| 8 | 55 | 55 | 8 | 12 | 52 |
| 9 | 60 | 60 | 9 | 10 | 50 |

**Задача 20.**

Определить среднюю объемную теплоемкость смеси газов в заданном интервале температур t1 t2 при линейном характере зависимости С=С(t). Исходные данные приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 - Исходные данные для расчёта

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-вая  цифра  шифра | Состав смеси | | | | | | | 2-ая  цифра  шифра | Характер  Процесса | t1 | | t2 |
| Род газа | | | | Объемные доли | | |
| 1 | 2 | 3 | Z1 | | Z2 | Z3 |
| 0 | H2 | O2 | N2 | 0,2 | | 0,4 | 0,4 | 0 | изобарный | 25 | | 1000 |
| 1 | CO | N2 | H2 | 0,1 | | 0,7 | 0,2 | 1 | изохорный | 50 | | 975 |
| 2 | H2 | SO2 | H2 | 0,4 | | 0,6 | 0,2 | 2 | изобарный | 75 | | 950 |
| 3 | O2 | H2 | N2 | 0,3 | | 0,3 | 0,4 | 3 | изохорный | 100 | | 925 |
| 4 | N2 | H2 | N2 | 0,5 | | 0,5 | 0,4 | 4 | изобарный | 125 | | 900 |
| 5 | CO | O2 | H2 | 0,1 | | 0,8 | 0,1 | 5 | изохорный | 150 | | 875 |
| 6 | H2 | N2 | CO2 | 0,25 | | 0,25 | 0,5 | 6 | изобарный | 175 | 850 | |
| 7 | CO | SO2 | CO2 | 0,2 | | 0,8 | 0,5 | 7 | изохорный | 200 | 825 | |
| 8 | CO2 | SO2 | N2 | 0,15 | | 0,35 | 0,5 | 8 | изобарный | 225 | 800 | |
| 9 | H2 | N2 | N2 | 0,3 | | 0,7 | 0,5 | 9 | изохорный | 250 | 775 | |

**Задача 21.**

Определить количество теплоты Q, подведенное (отведенное) к (от) смеси газов в процессе их нагрева ( охлаждения) от температуры t1  до температуры t2, если суммарное сечение каналов теплообменника газов во входном сечении , давление Исходные данные приведены в табл.4.6.

Таблица 4.6 - Исходные данные для расчёта

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-вая цифра  шифра | м/с | М2 | Па | 2-ая  цифра  шифра | t1 | t2 | Состав смеси | | | | | | |
| Род газа | | | Объемные доли | | | |
| m1 | m2 | m3 | | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 10 | 2,0 | 1,5 | 0 | 50 | 250 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | | H2 | O2 | N2 |
| 1 | 7 | 2,5 | 1,4 | 1 | 100 | 800 | 0.1 | 0,7 | 0,2 | | CO | N2 | H2 |
| 2 | 12 | 1,8 | 1,45 | 2 | 70 | 100 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | | O2 | H2 | H2 |
| 3 | 15 | 1,5 | 1,2 | 3 | 150 | 750 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | | H2 | SO2 | N2 |
| 4 | 5 | 3,0 | 1.6 | 4 | 200 | 600 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | | N2 | N2 | N2 |
| 5 | 17 | 1,2 | 1.1 | 5 | 250 | 450 | 0,1 | 0,8 | 0,1 | | CO | O2 | H2 |
| 6 | 20 | 1,0 | 1.05 | 6 | 300 | 700 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | | H2 | N2 | CO2 |
| 7 | 8 | 2,4 | 1,35 | 7 | 100 | 50 | 0,2 | 0,8 | 0,6 | | CO | SO2 | CO2 |
| 8 | 16 | 1,7 | 1,08 | 8 | 150 | 400 | 0,15 | 0,35 | 0,5 | | CO2 | SO2 | N2 |
| 9 | 3 | 0,7 | 1,7 | 9 | 100 | 600 | 0.3 | 0,7 | 0,5 | | H2 | N2 | N2 |

Примерное решение задачи 1.4.

Определить количество теплоты Q, подведенное к смеси газов кислорода О2(m1=0,2), азота N2(m2=0,4) и водорода Н2(m3=0,4)в процессе нагрева от температуры t1=250,если суммарное сечение теплообменника f=1,8\*10-3м2, скорость газов во входном сечении =12 м/с, давление =1,45\*105 Па.

Решение.

1. Средние теплоемкости компонентов смеси по интерполяционной формулам:

= 0,9127 + 0,000127 (t1 + t2) = 0,9127 + 0,000127(50+250) = 0,9508

= 1,0258 + 0,000596(50+250) = 1,0509 кДж (кг\*К)

= 14,2494 + 0,000596(50+250)=14,4282 кДж(кг\*К)

1. Средняя теплоемкость смеси

==

3. Объемный расход смеси.

=f \* = 1,8 \* 10-3 \* 12= 21,6 \* 10-3 м3/с.

4. Молекулярная масса смеси.

= 32 \* 0,2 +28 \* 0,4+2 \* 0,4 = 18,4 кг/кмоль

5. Плотность смеси при нормальных условиях

6. Плотность смеси при давлении Па и температуре t1 = 50

7. Количество теплоты.

Q= V0Cрm(t2-t1) = 1,25 - 0,0216 \* 6,3822(250-50) = 27,205 кВт.

# 5 ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ИДЕАЛЬНЫМ

# 5.1 Основные теоретические положения

Важнейшими понятиями технической термодинамики являются теплота и работа, которые неразрывно связаны с термодинамическим процессом.

Взаимное преобразование теплоты и работы осуществляется в тепловых двигателях, работающих по замкнутым циклам. Циклы тепловых двигателей представляют собой совокупность взаимосвязанных термодинамических процессов.

Целью анализа любого термодинамического процесса является:

- определение термодинамических параметров начального и конечного состояний рабочего тела;

- определение отведенного(подведенного) количества теплоты в процессе;

- расчет работы изменения объема и технической работы.

К основным термодинамическим процессам относятся изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный, а также политропные процессы.

При решении предлагаемых ниже задач необходимо определить величины, входящие в сводные таблицы для: изобарного процесса табл.5.1., изохорного – табл. 5.2., изотермического – табл.5.3., адиабатного – табл.5.4., политропного – табл.5.5.

Для понимания направленности энергии в рассматриваемом процессе, проверке полеченных результатов расчетов рекомендуется построить примерное изображение процесса в PV и TS – диаграммах, проверить баланс энергии по уравнения первого закона термодинамики.

При решении задач с идеальным газом необходимо использовать:

1. Уравнение состояния

V = GRt, (5.1)

где – абсолютное давление, Па.

V – полный объем, м3.

G – масса газа, кг.

R – газовая постоянная, Дж/(кг\*К)

Т – абсолютная температура, К.

Газовая постоянная R для конкретного идеально газа определяется по формуле

R = 8314/ (5.2)

где – молекулярная масса данного газа, кг/моль.

2.Первый закон термодинамики

Dq=du+d=cvdT+pdv (5.3)

Dq=dh+d=cpdT+vdp, (5.4)

q=△u+𝓁,

q=△h+𝓁T.

Таблица 5.1 - Данные для изобарного процесса

|  |  |
| --- | --- |
| **Наименование величины** | **Формулы** |
| Уравнение процесса | P=const |
| Соотношение между начальными и конечными параметрами |  |
| Теплоемкость процесса | Cp= ; Cp=a+bt ;  Cpm |
| Теплота процесса |  |
| Изменение внутренней энергии |  |
| Изменение энтальпии |  |
| Изменение энтропии |  |
| Работа изменеия объема |  |
| Техническая работа процесса | 𝓁T=O |

Таблица 5.2 – Данные для изохорного процесса

|  |  |
| --- | --- |
| **Наименование величины** | **Формулы** |
| Уравнение процесса | V=const |
| Соотношение между начальными и конечными параметрами |  |
| Теплоемкость процесса | Cv=, Cv=a+bt  Cv=Cp-R |
| Теплота процесса | d=Cv(T2-T1) |
| Изменение внутренней энергии | △U=ds=Cv(T2-T1) |
| Изменение энтальпии | △h=Cp(T2-T1) |
| Изменение энтропии | △S=Cv𝓁n |
| Работа изменения объема | 𝓁= O |
| Техническая работа процесса | 𝓁T=V(P2-P1) |

Таблица 5.3 – Данные для изотермического процесса

|  |  |
| --- | --- |
| **Наименование величины** | **Формулы** |
| Уравнение процесса | T= const |
| Соотношение между начальными и конечными параметрами |  |
| Теплоемкость процесса | C= |
| Теплота процесса | D=𝓁= RT𝓁n |
| Изменение внутренней энергии | △𝘶=0 |
| Изменение энтальпии | △h=0 |
| Изменение энтропии | △S==R𝓁n |
| Работа изменеия объема | 𝓁=RT𝓁n= RT𝓁n |
| Техническая работа процесса | 𝓁1=𝓁 |

Таблица 5.4 - Данные для адиабатного процесса

|  |  |
| --- | --- |
| **Наименование величины** | **Формулы** |
| Уравнение процесса | q=0, s=const |
| Соотношение между начальными и конечными параметрами | ,=  = |
| Теплоемкость процесса | C=0, K= |
| Теплота процесса | d=0 |
| Изменение внутренней энергии | △𝘶= |
| Изменение энтальпии | △h= |
| Изменение энтропии | △S=0 |
| Работа изменеия объема | 𝓁=  𝓁= |
| Техническая работа процесса | 𝓁T=k𝓁 |

Таблица 5.5 - Данные для политропного процесса

|  |  |
| --- | --- |
| **Наименование величины** | **Формулы** |
| Уравнение процесса | C= const |
| Соотношение между начальными и конечными параметрами |  |
| Теплоемкость процесса | C=Cv |
| Теплота процесса | d=C(T2-T1) |
| Изменение внутренней энергии | △u=Cv(T2-T1) |
| Изменение энтальпии | △h= |
| Изменение энтропии | △S=Cv 𝓁n |
| Работа изменения объема | 𝓁=  𝓁= |
| Техническая работа процесса | 𝓁T=n𝓁 |

**Задача 22.**

В калорифере установки воздушного отопления воздух с начальной температурой t1нагревается при постоянном давлении до температуры t2. Массовая подача установки G.

Определить недостающие параметры состояния начальной и конечной точек процесса, количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии, работу процесса.

В расчете учитывать линейную зависимость теплоемкости воздуха от температуры. Процесс представить в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Р  МПа | G  Кг/с | 2-я цифра  шифра | t1 | t2 |
| 0 | 0,1 | 0,5 | 0 | -10 | 30 |
| 1 | 0,15 | 1,0 | 1 | -15 | 35 |
| 2 | 0,2 | 0,35 | 2 | -5 | 30 |
| 3 | 0,12 | 0,8 | 3 | 0 | 50 |
| 4 | 0,3 | 0,3 | 4 | 10 | 60 |
| 5 | 0,25 | 1,0 | 5 | 15 | 50 |
| 6 | 0,1 | 0,6 | 6 | 20 | 45 |
| 7 | 0,1 | 0,8 | 7 | 5 | 55 |
| 8 | 0,15 | 1,2 | 8 | 0 | 30 |
| 9 | 0,3 | 1,5 | 9 | -18 | 40 |

**Задача 23.**

Газ из начального состояния 1 изотермически сжимается до состояния 2, а затем в изохорном процессе охлаждается до состояния 3, в котором , Р3=Р1. В точке 3 параметры кислорода Т2 и Р2, в точке 3 температура t3. Определить недостающие параметры в начальных и конечных точках рассматриваемых процессов, удельные значения работы изменения объема, технической работы, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах 1-2, 2-3, и 1-2-3 в целом. Показать процессы в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Р2  МПа | t2 | 2-я цифра  шифра | t3 | Газ |
| 0 | 6 | 1200 | 0 | 200 | Воздух |
| 1 | 8 | 1300 | 1 | 300 | О2 |
| 2 | 5 | 1000 | 2 | 100 | N2 |
| 3 | 7 | 1100 | 3 | 250 | H2 |
| 4 | 4 | 900 | 4 | 350 | CO2 |
| 5 | 4 | 800 | 5 | 400 | Воздух |
| 6 | 5 | 1000 | 6 | 300 | О2 |
| 7 | 7 | 850 | 7 | 200 | H2 |
| 8 | 6 | 900 | 8 | 100 | N2 |
| 9 | 5 | 800 | 9 | 150 | CO2 |

**Задача 24.**

Газ из начального состояния 1 изотермически сжимается до состояния 2, а затем в изобарном процессе расширяется, в котором V3=V1. Параметры воздуха в точке 2 Р2  и t2. Определить : значения t, P и V воздуха в точках 1, 2 и 3; работу, теплоту, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах 1-2, 2-3, и 1-2-3 в целом. Показать процессы в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Р2  МПа | t2 | 2-я цифра  шифра | t3 | Газ |
| 0 | 0,5 | 200 | 0 | 1400 | Воздух |
| 1 | 0,6 | 100 | 1 | 1200 | N2 |
| 2 | 0,4 | 50 | 2 | 1000 | О2 |
| 3 | 0,7 | 250 | 3 | 1300 | H2 |
| 4 | 0,8 | 100 | 4 | 1250 | CO2 |
| 5 | 1,0 | 200 | 5 | 1450 | Воздух |
| 6 | 0,8 | 80 | 6 | 1200 | N2 |
| 7 | 0,7 | 150 | 7 | 1500 | О2 |
| 8 | 1,0 | 180 | 8 | 1000 | Воздух |
| 9 | 0,5 | 200 | 9 | 900 | CO2 |

**Задача 25.**

В турбине газотурбинной установки происходит адиабатное необратимое расширение газа от начальных параметров Р1 , t1 до P2 . Внутренний относительный КПД турбины η=0,85.

Определить недостающие параметры состояния в начальной и конечной точках теоретического и действительно процессов расширения. Определить также теоретическую и действительную работу процесса.

Газ, поступающий в турбину, обладает свойствами воздуха.

По данным построить графики теоретического и действительного процессов расширения газов в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.9

Таблица 5.9 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Р1  МПа | t1 | 2-я цифра  шифра | Р2  МПа | G кг |
| 0 | 0,5 | 600 | 0 | 0,1 | 1 |
| 1 | 0,6 | 700 | 1 | 0,11 | 3 |
| 2 | 0,7 | 750 | 2 | 0,12 | 5 |
| 3 | 0,8 | 800 | 3 | 0,13 | 2,5 |
| 4 | 0,65 | 720 | 4 | 0,15 | 3 |
| 5 | 0,7 | 880 | 5 | 0,135 | 4,5 |
| 6 | 0,75 | 800 | 6 | 0,125 | 5 |
| 7 | 0,8 | 820 | 7 | 0,115 | 5,5 |
| 8 | 0,85 | 830 | 8 | 0,1 | 4 |
| 9 | 0,9 | 850 | 9 | 0,12 | 5 |

**Задача 26.**

Газ, занимающий при давлении 1 и температуре t1 объем V1, сжат (расширен) до давления 2 и объема V2. Определить показатель политропы n, конечную температуру t2 , количество теплоты q, работу 𝓁, изменение внутренней энергии △u, энтальпии △h и энтропии △S в процессе. Теплоемкости Ср, Сv cчитать зависящими от температуры. Представить процессы в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | V1 | Р10-5  Па | t1 | 2-я цифра  шифра | Р210-3  Па | V2 | Газ |
| 0 | 3,91 | 1,5 | 127 | 0 | 3,0 | 6,97 | Воздух |
| 1 | 1,74 | 4,0 | 300 | 1 | 2,0 | 2,46 | Азот |
| 2 | 2,52 | 10,0 | 27 | 2 | 1,0 | 42,1 | Водород |
| 3 | 0,35 | 5,0 | 17 | 3 | 0,5 | 1,24 | Оксид углерода |
| 4 | 1,29 | 1,0 | 60 | 4 | 2,0 | 0,72 | Диоксид углерода |
| 5 | 0,29 | 15,0 | 0 | 5 | 5,0 | 2,61 | Кислород |
| 6 | 1,66 | 2,0 | 227 | 6 | 1,0 | 1,81 | Диоксид серы |
| 7 | 44,0 | 0,4 | 327 | 7 | 2,0 | 5,89 | Воздух |
| 8 | 0,38 | 20,0 | 1000 | 8 | 1,0 | 4,68 | Азот |
| 9 | 1,71 | 1, 5 | 50 | 9 | 5,0 | 0,63 | Кислород |

Пример решения задачи 9.

Газ SO2, занимающий при давлении Р1 = 0,196 МПа и температуре t1 = 227 объем V = 1.66м3, сжат до давления 2 = 0,098 МПа и V2=1.81 м3.

Определить n, t2,Q , L, LT, △u, △H, △S.

Решение .

1. Индивидуальная газовая постоянная

R=Дж/ (кг К).

1. Масса газа

G = =

1. Показатель политропы определяем из уравнения связи между параметрами :

=;

1. Конечная температура

T2= 500, t2= 0.

1. Изобарная теплоемкость

Cpm = 0.6314+0.000155\*(t1+t2) = 0.6314+0.000155\*(227+0) = 0.6666 кДж/(кгК).

1. Изохорная теплоемкость

Сvm Cpm R = 0,6666-0,1298 = 0,5368 кДж/(кгК).

1. Показатель адиабаты

К==1.242/

1. Теплоемкость политропного процесса

С=Cvm = 0.5368=0.5183 кДж/(кгК).

1. Количество теплоты

Q=G\*C\*(t2-t1) = 5\*0.5183\*(0-227)= -588.3 кДж.

10. Изменение внутренней энергии

△u=GCvm(t2-t1)=5\*0.5183\*(0-227) = -609.3 кДж.

11. Изменение энтальпии

△H=GCpm(t2-t1) = 5\*0.6666\*(0-227) = -756.6 кДж.

12. Работа изменения объема

L= Q-△u= -588.3+609.3 = 21 кДж.

𝓁== = 4.2 кДж/кг

13. Техническая работа

Lт=nL = 8\*21 = 168 кДж

𝓁т = = = 33.6 кДж/кг

14. Изменение энтропии

△S= C 𝓁n= 0.5183 𝓁n= - 0.3136 кДж/(кгК).

15. Изображение процесса в Pv – диаграмме

Так как V2V1 и n = 8 (K n), то процесс в PV – диаграмме будет направлен и расположен между адибатой и изохорой (рис.2.1.).

16. Изображение процесса Тs– диаграмме.

Так как порядок следования политроп Pv и Ts – координат одинаков, то и в Тs – диаграмме рассчитываемый процесс (n=8) будет располагаться между изохорой и адибатой, причем в той части диаграммы, где переход от адиабаты к изохоре происходит по часовой стрелки. Так как в Рv – диаграмме процесс направлен вниз, то и в Тs – диаграмме он тоже будет направлен вниз (рис.2.2.)

**Задача 27.**

В процессе изменения состояния V1 газа его температура уменшается (увеличивается) от t1 до Т2. Начальное давление газа 1. Зная , что процесс характеризуется постоянной величиной теплоемкости С, определить работу изменения объема 𝓁, техническую работу 𝓁т , изменение внутренней энергии △u, энтальпии △n и энтропии △S, а также показатель политропы n и конечное давление 2. Теплоемкости Ср и Сv считать зависящими от температуры. Представить процессы в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Газ | V1 | Р10-5  Па | 2-я цифра  шифра | t1 | Т2  К | С  кДж/(кгК) |
| 0 | Воздух | 6,97 | 3,0 | 0 | 127 | 1423 | 0,96 |
| 1 | Воздух | 5,89 | 2,0 | 1 | 327 | 402 | 2,18 |
| 2 | Азот | 2,46 | 2,0 | 2 | 300 | 405 | 0,47 |

*Продолжение таблицы 5.11*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 | Азот | 4,68 | 1,0 | 3 | 1000 | 773 | -0,64 |
| 4 | Кислород | 0,63 | 4,5 | 4 | 50 | 358 | -0,23 |
| 5 | Кислород | 2,61 | 3,0 | 5 | 0 | 819 | 1,00 |
| 6 | Диоксид  углерода | 0,72 | 2,0 | 6 | 60 | 373 | -1,93 |
| 7 | Диоксид  углерода | 2,26 | 5,0 | 7 | 900 | 293 | 1,24 |
| 8 | Оксид  углерода | 1,24 | 0,5 | 8 | 0 | 290 | 1,52 |
| 9 | Диоксид  серы | 1,61 | 1,0 | 9 | 0 | 500 | 1,86 |

**Задача 28.**

Газ занимает объем V1 при температуре t1 и давлении 1 , изменит свое состояние по политропе до температуры t2 , совершая при этом работу L. Определить показатель политропы n , конечное давление 2 и объем V2, количество теплоты Q процесса, изменение внутренней энергии △u , энтальпии △H и энтропии △S газа. Теплоемкости Ср  и Сv  считать зависящими от температуры. Изобразить процесс в РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Р110-3  Па | V1 | t1 | 2-я цифра  шифра | Газ | t2 | L  кДж |
| 0 | 1,47 | 3,91 | 127 | 0 | Воздух | 1150 | 668 |
| 1 | 0,393 | 44 | 327 | 1 | Воздух | 129 | -2890 |
| 2 | 3,92 | 1,74 | 300 | 2 | Азот | 132 | 200 |
| 3 | 19,6 | 0,385 | 1000 | 3 | Азот | 500 | 1485 |
| 4 | 0,98 | 1,29 | 60 | 4 | Диоксид  углерода | 100 | -75,7 |
| 5 | 9,8 | 4,53 | 900 | 5 | Диоксид  углерода | 20 | -1662 |
| 6 | 1,47 | 1,71 | 50 | 6 | Кислород | 85 | -272 |
| 7 | 14,7 | 0,29 | 0 | 7 | Кислород | 546 | 1704 |
| 8 | 9,8 | 2,52 | 27 | 8 | Водород | 227 | 4557 |
| 9 | 1,47 | 7,66 | 0 | 9 | Водород | 100 | -49,5 |

**6 ПОРШНЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ**

# 6.1 Основные теоретические положения

На рис. 6.1. в диаграмме Рv изображены процессы, протекающие в идеальном компрессоре. Линия 4-1 изображает процесс всасывания газа, кривая 1-2 – процесс сжатия и линия 2-3 – процесс нагнетания. Диаграмму 1-2-3-4 называют теоретической индикаторной диаграммой.

Теоретическая работа компрессора 𝓁0 определяется площадью индикаторной диаграммы и зависит от процесса сжатия (рис.6.2.).

Кривая 1-2 изображает процесс изотермического сжатия, кривая 1-2,, -адиабатного сжатия и кривая 1-2, - политропного сжатия.

При изотермическом сжатии теоретическая работа компрессора

𝓁к = P1V1𝓁n= RT𝓁n

Если масса всасываемого воздуха М кг, а объем его V1 , то

Lк = Р1V1𝓁n.

Количество теплоты, которое должно быть отведено при изотермическом сжатии

d=𝓁k или Q=Lk.

При адиабатном сжатии теоретическая работа компрессора

𝓁к=P1V1

Если масса всасываемого воздуха М кг, а объем его V1 м3, то

Lк=P1V1

Температуру газа в конце сжатия можно определить из соотношения параметров адиабатного процесса.

При политропном сжатии теоретическая работа компрессора

𝓁к=P1V1

Если масса всасываемого воздуха М кг, а объем его V1 м3, то

Lк = P1V1

Теоретическая мощность двигателя для привода компрессора

N=

**Задача 29.**

Газ сжимается в одноступенчатом компрессоре по политропе с показателем n от давления 1 = 0,1Мпа до давления 2 . Начальная температура газа t1. Во сколько раз уменьшится теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, если одноступенчатое сжатие заменить двухступенчатым при неизменном показателе политропы? Определить также максимальные температуры газа в обоих случаях и изобразить процессы РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | газ | t1 | 2-я цифра  шифра | n | Р2  МПа |
| 0 | Азот | 0 | 0 | 1,15 | 2,4 |
| 1 | Воздух | 5 | 1 | 1,2 | 2,5 |
| 2 | Диоксид углерода | 10 | 2 | 1,25 | 2,8 |
| 3 | Диоксид углерода | 20 | 3 | 1,18 | 1,0 |
| 4 | Кислород | 15 | 4 | 1,15 | 1,5 |
| 5 | Метан | 10 | 5 | 1,2 | 1,8 |
| 6 | Азот | -5 | 6 | 1,18 | 2,0 |
| 7 | Воздух | -10 | 7 | 1,25 | 2,1 |
| 8 | Кислород | 20 | 8 | 1,3 | 1,4 |
| 9 | Метан | 5 | 9 | 1,2 | 1,2 |

**7 ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

# 7.1 Основные теоретические положения

По характеру подвода теплоты циклы поршневых ДВС делятся на три группы:

1. с изохорным подводом теплоты
2. с изохорным подводом теплоты
3. со смешанным подводом теплоты

Теоретические циклы, представленные в РV и TS – диаграммах, содержат следующие процессы:

1-2 – адиабатное сжатие;

2-31- изохорный подвод теплоты(сгорания топлива)

изобарный подвод теплоты(сгорания топлива)

адиабатное расширение (рабочий ход)

4-1 – изохорный отвод теплоты (выхлоп).

Характеристиками циклов являются:

степень сжатия =;

степень повышения давления λ=;

степень предварительного расширения

; .

Термодинамические анализ цикла ДВС заключается в определении:

1. Основных термических параметров состояния в характерных точках цикла;
2. Работы цикла;
3. Термического КПД цикла.

Параметры в характерных точках цикла определяются из соотношений между ними для каждого рассматриваемого процесса.

Работа цикла 𝓁0=d1-d2,

где d1- количество подведенной теплоты, определяемой для каждой группы по формулам:

для цикла 1-й группы – d=Cv(T3V-T2)

для цикла 2-й группы – d1=Cp(T3P-T2)

для цикла 3-й группы – d1=Cv(T3V-T2)+ Cp(T3V-T3P);

d2- количество отведенной теплоты

d2 = Cv(T4-T1).

Термический КПД цикла ηt=1-.

В частности, для циклов 1-й группы ηt=1 - ,

2-й группы ηt=1-\* ;

3-й группы ηt=1-\*

**Задача 30.**

Для цикла ДВС, работающего на воздухе, определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, если заданы – температура t1 , давление 1 воздуха, его масса G и характеристики цикла ε, λ, Исходные данные для расчетов приведены в таб.7.1.

Таблица 7.1 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | Р1 МПа | G кг | t1 | 2-я цифра  шифра | ε | λ |  |
| 0 | 0,1 | 1,0 | 17 | 0 | 3,0 | 2,0 | 1 |
| 1 | 0,11 | 1,2 | 18 | 1 | 3,0 | 1 | 2,0 |
| 2 | 0,12 | 1,4 | 19 | 2 | 3,0 | 2,0 | 2,0 |
| 3 | 0,13 | 1,6 | 20 | 3 | 3,5 | 2,5 | 1 |
| 4 | 0,14 | 1,8 | 21 | 4 | 3,5 | 1 | 2,5 |
| 5 | 0,15 | 2,0 | 22 | 5 | 3,5 | 2,5 | 2,5 |
| 6 | 0,16 | 1,8 | 23 | 6 | 4,0 | 3,0 | 1 |
| 7 | 0,17 | 1,6 | 24 | 7 | 4,0 | 1 | 3,0 |
| 8 | 0,18 | 1,4 | 25 | 8 | 4,0 | 3,0 | 3,0 |
| 9 | 0,19 | 1,2 | 26 | 9 | 4,5 | 3,5 | 1 |

Пример решения задачи 4.1.

Для выполнения расчетов выбираем данные в табл.4.1.(1-я цифра шифра – 0, 2-я цифра шифра -0). Так как в выбранных исходных данных = 1, то необходимо рассчитать цикл ДВС с изохорным подводом теплоты (рис. 4.1., 4.2.).

Решение.

Параметры в характерных точках цикла:

Точка 1.

Р1= 0,1 МПа; t1 = 17 ;

Т1=t1+273=17+273=290 K;

V1=== 0.832 м3/кг

Здесь R – газовая постоянная, для воздуха R = 287 Дж/(кг\*К).

Точка 2.

Так как ε==3.0 ,

то V2= = = 0,277 м3/кг.

Температура Т2 определяется из соотношений адиабатного процесса

Т2=Т1= 290\*= 450 K

Давление = = = 0,466 МПа.

Точка 3.

Процесс 2-3 изохорный ( V=const)

V3=V2= 0.277 v3/ru;

= = = 2.0;

= 0,2\*0,466 = 0,932 МПа;

Т3=λТ2 = 2,0\*0,450 = 900 К.

Точка 4.

Процесс 3-4 адиабатный, процесс 4-1 изохорный

Т4 = Т3= Т3 = 900 = 580 K;

= 0,1 = 0,2 МПа

2. Количество подведенной теплоты

D=Cv(T3-T2) .

Если считать теплоемкость не зависящей от температуры, то

СV= = = 0.721 кДж/(кгК);

d1 = 0.721(900-450) = 324,5 кДж/(кгК)

3. Количество отведенной теплоты

d2 = CV(T4-T1) = 0,721(580-290) = 209,1 кДж/кг

4. Работа цикла

𝓁0=d1-d2= 324,5-209,1=115,4 кДж/кг.

5. Термический КПД цикла

=0,356

или ηt=1- = 1- = 0,356.

**Задача 31.**

Для цикла ДВС с подводом теплоты в процессе =const определить параметры в характерных точках, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термический КПД цикла Карно в том же интервале температур.

Известны начальное давление 1, температура t1, степень сжатия ε и степень предварительного расширения , объем цилиндра V1.

Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха и его теплоемкость не зависит от температуры.

Представить цикл РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | t1 | V1=103  М3 | 2-я цифра  шифра | ε |  |
| 0 | 0 | 0,5 | 0 | 14 | 1,5 |
| 1 | 5 | 0,8 | 1 | 16 | 2,0 |
| 2 | 10 | 1,0 | 2 | 12 | 1,8 |
| 3 | 15 | 1,2 | 3 | 18 | 2,5 |
| 4 | 20 | 1,5 | 4 | 15 | 2,2 |
| 5 | 25 | 2,0 | 5 | 16 | 1,5 |
| 6 | 17 | 2,5 | 6 | 12 | 2,0 |
| 7 | 27 | 3,0 | 7 | 14 | 2,5 |
| 8 | 30 | 4,0 | 8 | 12 | 3,0 |
| 9 | 27 | 5,0 | 9 | 18 | 2,0 |

**Задача 32.**

Для цикла ДВС с подводом теплоты в процессе =const определить параметры в характерных точках, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термический КПД и сравнить его с термическим КПД цикла Карно в том же интервале максимальной и минимальной температур.

Известны начальное давление 1  = 0,1 МПа и температура t1, степень сжатия ε и степень повышения давления λ. Диаметр цилиндр d, ход поршня h.

Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха и его теплоемкость постоянна. Представить цикл РV и TS – диаграммах. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | t1 | d мм | h1 мм | 2-я цифра  шифра | ε | λ |
| 0 | -5 | 90 | 100 | 0 | 10,0 | 3,0 |
| 1 | 0 | 100 | 110 | 1 | 5,0 | 3,3 |
| 2 | 5 | 130 | 140 | 2 | 7,0 | 3,0 |
| 3 | -10 | 120 | 130 | 3 | 8,0 | 3,2 |
| 4 | 0 | 150 | 200 | 4 | 6,0 | 2,9 |
| 5 | 10 | 250 | 340 | 5 | 4,5 | 3,0 |
| 6 | 15 | 200 | 300 | 6 | 5,5 | 2,8 |
| 7 | 27 | 140 | 160 | 7 | 7,5 | 4,0 |
| 8 | 30 | 110 | 150 | 8 | 8,0 | 4,0 |
| 9 | 17 | 120 | 140 | 9 | 6,5 | 2,0 |

**Задача 33.**

Для циклов ДВС с изобарным, изохорным и смешанным подводом теплоты определить параметры в характерных точках, полученную работу, подведенное и отведенное количество теплоты, термический КПД, если заданы параметры рабочего тела в начальной точке цикла : давление 1  = 0,1 МПа и температура t1 = 30 и объем цилиндра V1.

Количество отведенной теплоты для всех циклов одинаково.

Расчет произвести для всех циклов в двух вариантах:

а) при одинаковых значениях степени сжатия ε;

б) при одинаковой максимальной температуре рабочего тела tmax.

Для варианта (а) дополнительно задана степень повышения давления ДВС с изохорным подводом теплоты λ; для варианта (б) дополнительно задана степень предварительного расширения ДВС с изобарным подводом теплоты .

Для каждого варианта сравнить термический КПД циклов с термическим КПД цикла Карно.

Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Зависимость теплофизических свойств от температуры не учитывать.

По результатам расчета построить в Тs – диаграмме примерное изображение всех циклов для двух вариантов. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4 - Исходные данные для расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1-я цифра  шифра | V1  М3 | Tmak | 2-я цифра  шифра | ε | λ |  |
| 0 | 150 | 500 | 0 | 3.0 | 2.0 | 1.25 |
| 1 | 160 | 520 | 1 | 2.5 | 3.0 | 1.20 |
| 2 | 170 | 540 | 2 | 2.0 | 2.5 | 1.30 |
| 3 | 180 | 560 | 3 | 4.0 | 3.5 | 1.30 |
| 4 | 190 | 580 | 4 | 3.0 | 4.0 | 1.35 |
| 5 | 200 | 600 | 5 | 3.5 | 3.0 | 1.40 |
| 6 | 210 | 620 | 6 | 5.0 | 4.5 | 1.40 |
| 7 | 220 | 640 | 7 | 4.0 | 5.0 | 1.42 |
| 8 | 230 | 660 | 8 | 4.5 | 4.0 | 1.50 |
| 9 | 240 | 680 | 9 | 5.5 | 2.0 | 1.30 |

**ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

В процессе изучения курса «Процессы и аппараты химической технологии» студент-заочник должен выполнить контрольную работу. К выполнению контрольной работы можно приступить только после усвоения теоретической части курса и решения примеров типовых задач. *Каждый студент выполняет вариант заданий, соответствующий двум последним цифрам номера студенческого билета* (таблица). Например, номер студенческого билета 2132614, две последние цифры 14, им соответствует вариант контрольного задания под номером 5 (согласно объяснениям, приведенным ниже таблицы). Контрольная работа должна быть аккуратно оформлена; для замечаний рецензента нужно оставлять широкие поля; писать четко и ясно; *номера и условия задач переписывать полностью и в том порядке, в каком они указаны в задании.* В конце работы следует дать список использованной литературы. Ссылки на используемую литературу оформляют в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008. Пример правильного оформления ссылок на учебники – в библиографическом списке рекомендуемой литературы.

Таблица 8 – Варианты и задачи для контрольной работы

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Последние цифры номера зачетной rнижки\* | № варианта | Номера задач, относящихся к данному варианту | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **Х0** | **1** | 1 | 7 | 11 | 18 | 21 | 22 |
| **Х1** | **2** | 2 | 8 | 12 | 19 | 20 | 23 |
| **Х2** | **3** | 3 | 9 | 13 | 18 | 21 | 24 |
| **Х3** | **4** | 1 | 7 | 11 | 19 | 20 | 25 |
| **Х4** | **5** | 2 | 8 | 12 | 18 | 21 | 26 |
| **Х5** | **6** | 3 | 9 | 13 | 19 | 20 | 22 |
| **Х6** | **7** | 1 | 7 | 11 | 18 | 21 | 23 |
| **Х7** | **8** | 2 | 8 | 12 | 19 | 20 | 24 |
| **Х8** | **9** | 3 | 9 | 13 | 18 | 21 | 25 |
| **Х9** | **10** | 1 | 7 | 11 | 19 | 20 | 26 |
| **Y0** | **11** | 2 | 8 | 12 | 18 | 21 | 22 |
| **Y1** | **12** | 3 | 9 | 13 | 19 | 20 | 23 |
| **Y2** | **13** | 1 | 7 | 11 | 18 | 21 | 24 |
| **Y3** | **14** | 2 | 8 | 12 | 19 | 20 | 25 |
| **Y4** | **15** | 3 | 9 | 13 | 18 | 21 | 26 |
| **Y5** | **16** | 1 | 7 | 11 | 19 | 20 | 22 |
| **Y6** | **17** | 2 | 8 | 12 | 18 | 21 | 23 |
| **Y7** | **18** | 3 | 9 | 13 | 19 | 20 | 24 |
| **Y8** | **19** | 1 | 7 | 11 | 18 | 21 | 25 |
| **Y9** | **20** | 2 | 8 | 12 | 19 | 20 | 26 |

\*- ***где Х*** *– это любая цифра* ***от 0 до 4; а Y*** *– это любая цифра* ***от 5 до 9***

***Контрольная работа, выполненный не по своему варианту, преподавателем не рецензируется и не* *засчитывается .***

**Перечень использованных информационных ресурсов**

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1985. 742 с.

2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи курса «Процессы и аппараты химической технологии». Л.: Химия 1989. 552 с.

3. Поникаров И.И. и др. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки. М.: Альфа-М, 2006. – 606 с.

4. Поникаров И.И. Расчеты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки. М.: Альфа-М, 2008. – 720 с.

5. Лащинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов. – Л.: Альянс, 2008. – 384 с.

6. Машины и аппараты химических производств / Под ред. И.И. Чернобыльского. – М.: Машиностроение, 1975. – 454 с.

7. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. М.: Альянс, 2008. – 752 с.

8. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи. / Под ред. В.Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.

9. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. М.: Альянс, 2007. – 495 с.