

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Химические технологии нефтегазового комплекса»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания к практическим занятиям

Ростов-на-Дону

ДГТУ

2018

© Донской государственный
технический университет, 2018

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 общетехнической подготовке студентов химикотехнологических 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 и их аппараты», «Теплообменные процессы и аппараты», «Массообменные процессы и аппараты», «Механические процессы и аппараты». По каждой из этих частей предусмотрены практические задания для самостоятельного решения. Настоящие методические указания к практическим занятиям издаются 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.

1.1. Основные термодинамические параметры состояния

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

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

$$f(P, V, T) = 0 \quad (1.1)$$

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

$$P V = M R_{\mu} T \quad (1.2)$$

$$P V = G R T \quad (1.3)$$

где P – абсолютное давление, Па;
 V – объем, занимаемый газом, м³;
 M – молекулярная масса данного газа, кг/кмоль;
 R_{μ} – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг К);
 T – абсолютная температура, °С;
 G – расход газа, кг/ч;
 R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К).

Уравнение (1.2) уравнение, отнесенное к одному молу вещества. Уравнение (1.3) 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:

$$R = R_{\mu} / M \quad (1.4)$$

Важно понять, что в уравнении (1.3) P и T 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:

$$T \text{ К} = t \text{ °С} + 273,15 \quad (1.5)$$

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 :

$$P = F / S \quad (1.6)$$

Либо на основе уравнения, отражающего принцип действия жидкостных приборов:

$$P = \rho g h \quad (1.7)$$

где ρ – плотность этой жидкости, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 h – высота столба жидкости в приборе, м.

Внесистемные единицы давления:

$$1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па} = 1 \text{ мм.водн.ст.}$$

$$1 \text{ ат. (техн. атмосфера)} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98,1 \text{ кПа.}$$

$$1 \text{ атм. (физическая атмосфера)} = 101,325 \text{ кПа} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$$

$$1 \text{ ат.} = 0,968 \text{ атм.}$$

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,32 \text{ Па.}$$

$$1 \text{ бар} = 0,1 \text{ мПа} = 100 \text{ кПа} = 10^5 \text{ Па.}$$

Удельный объем, определяемая отношением объема вещества к его массе:

$$x = V / m \quad (1.8)$$

где x – удельный объем газа, м³/кг;
 V – объем, занимаемый газом, м³;
 m – масса газа, кг.

Плотность вещества, определяемая отношением массы к объему вещества.

$$c = m / V \quad (1.9)$$

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 изменяться обратно пропорционально объему.

$$(P_1 / P_2) = (x_1 / x_2) \rightarrow P_1 x_1 = P_2 x_2 = \dots = P_n x_n = \text{const} \quad (1.10)$$

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:

$$(x_1 / x_2) = (T_1 / T_2) \quad (1.11)$$

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.

$$(P_1 / P_2) = (T_1 / T_2) \quad (1.12)$$

4) Закон Авогадро.

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

$$(\rho_1 / \rho_2) = (M_1 / M_2) \quad (1.13)$$

$$(x_2 / x_1) = (M_1 / M_2) \rightarrow M_1 x_1 = M_2 x_2 = \dots = M_n x_n = \text{const} \quad (1.14)$$

Таблица 1.1

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

Газ	He ₂	H ₂	N ₂	CO	CO ₂	O ₂	Воз- дух	SO ₂	H ₂ O
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.

$$P V = m R T \quad (1.15)$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1

Найти мольную массу $M_{\text{см}}$, кг/кмоль, плотность газовой смеси $\rho_{\text{см}}$, кг/м³, указанного состава при температуре t , °C, и избыточном давлении $P_{\text{изб.}}$, ат. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исходные данные к задаче 1

№ вари- анта	Состав газа, % об.						t , °C	$P_{\text{изб.}}$, ат
	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂		
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

Продолжение табл.1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	45	45	5	5	—	—	100	1,6
7	40	—	45	10	5	—	230	2,7
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 молярную массу $M_{\text{см}}$, кг/кмоль, плотность газовой смеси $\rho_{\text{см}}$, кг/м³, указанного состава $y_{\text{H}_2} = 55\%$ об., $y_{\text{CO}} = 20\%$ об., $y_{\text{CO}_2} = 15\%$ об., $y_{\text{N}_2} = 10\%$ об. при температуре $t = 110\text{ }^\circ\text{C}$, и избыточном давлении $P_{\text{изб.}} = 0,3\text{ ат.}$

Решение:

Рассчитаем молярную массу газовой смеси.

$$M_{\text{см}} = y_{\text{H}_2} M_{\text{H}_2} + y_{\text{CO}} M_{\text{CO}} + y_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2} + y_{\text{N}_2} M_{\text{N}_2}$$

$$M_{\text{см}} = 0,55 \cdot 2 + 0,2 \cdot 28 + 0,15 \cdot 44 + 0,1 \cdot 28 = 16,1 \text{ кг/кмоль}$$

Рассчитаем значение давления газовой смеси в системе СИ.

1 ат. (техн. атмосфера) = 98,1 кПа

0,3 ат. (техн. атмосфера) = X кПа

По методу пропорции X = 29,43 кПа

Рассчитаем плотность газовой смеси.

$$\rho_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{22,4} \cdot \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} = \frac{16,1}{22,4} \cdot \frac{273,15 \cdot (101,325 + 29,43)}{(273,15 + 110) \cdot 101,325} = 0,661 \text{ кг/м}^3$$

Задача 2

Определить количество вещества G , кг, находящегося в сосуде объёмом V , м³, если показания манометра (вакуумметра) равны $P_{\text{изб}}$ ($P_{\text{вак}}$), кПа, температура t , °С и показания барометра $P_{\text{атм}}$, кПа равны. Исходные данные для расчёта приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Исходные данные к задаче 2

№ варианта	Род вещества	$P_{\text{вак}}$, кПа	$P_{\text{изб}}$, мПа	t , °С	$P_{\text{атм}}$, 10 ⁵ Па	V , м ³
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 $V = 0,13 \text{ м}^3$, если показания манометра равны $P_{\text{изб}} = 0,40 \cdot 10^6 \text{ Па}$, температура $t = 450^\circ\text{C}$ и показания барометра $P_{\text{атм}} = 0,975 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Решение:

Рассчитаем количество вещества, находящегося в сосуде.

$$P V = G R T$$

$$G = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$$

Найдем значение индивидуальной газовой постоянной

$$R = R_{\mu} / M = 8314 / 29 = 286,689 \text{ Дж/(кг К)}$$

$$T = 450 + 273,15 = 723,15 \text{ К}$$

$$P = P_{\text{изб}} - P_{\text{атм}} = 0,40 \cdot 10^6 - 0,0975 \cdot 10^6 = 0,3025 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

Произведем подстановку найденных величин

$$G = \frac{0,3025 \cdot 10^6 \cdot 0,13}{286,689 \cdot 723,15} = 0,1897 \text{ кг}.$$

Задача 3

Определить значение одного из трех термодинамических параметров состояния: давления P , кПа, температуры t , $^\circ\text{C}$, или удельного объёма x , $\text{м}^3/\text{кг}$, 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 табл. 1.4.

Таблица 1.4

Исходные данные к задаче 3

№ варианта	Род вещества	t , $^\circ\text{C}$	P , мПа	x , $\text{м}^3/\text{кг}$	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

1	2	3	4	5	6
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
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 x , м³/кг кислорода, если известны значения двух других его параметров: давления $P = 0,2 \cdot 10^3$ кПа и температуры $t = 20$ °С, количество $G = 1,5$ кг.

Решение:

Рассчитаем количество вещества, находящегося в сосуде.

$$P x = G R T$$

$$v = \frac{G \cdot R \cdot T}{P}$$

Найдем значение индивидуальной газовой постоянной

$$R = R_{\mu} / M = 8314 / 29 = 286,689 = 0,2867 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$T = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ К}$$

Произведем подстановку найденных величин

$$v = \frac{1,5 \cdot 0,2867 \cdot 293,15}{0,2 \cdot 10^3} = 0,63 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Задача 4

Определить количество газа ΔG , кг, выпущенного из баллона (рисунок 1) в атмосферу в результате снижения давления в нем от P_1 до P_2 , кПа, если ёмкость баллона V , м³, а температура газа равна понижается от значения t_1 , до t_2 , °С. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.5.

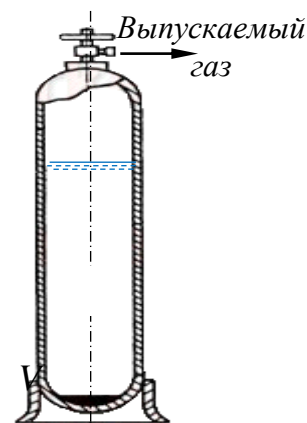


Рис. 1. Газовый баллон

Исходные данные к задаче 4

№ вари- анта	Род вещества	P_1 , мПа	P_2 , кПа	t_1 , °C	t_2 , °C	V , м ³
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	-2	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	0,10	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 ΔG , кг, выпущенного из баллона в атмосферу в результате снижения давления в нем от $P_1 = 550$ до $P_2 = 50$, кПа, если ёмкость баллона $V = 0,05$, м³, температура газа равна $t_1 = 25$ до $t_2 = 5$, °C.

Решение:

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

$$P_1 V = G_1 R T_1$$

и для второго состояния:

$$P_2 V = G_2 R T_2$$

Выразим количество выпущенного кислорода из полученных уравнений:

$$P_1 V - P_2 V = G_1 R T_1 - G_2 R T_2$$

$$V \cdot (P_1 - P_2) = (G_1 - G_2) \cdot R \cdot (T_1 - T_2)$$

$$\Delta G = \frac{(P_1 - P_2) \cdot V}{R \cdot (T_1 - T_2)}$$

Найдем значение индивидуальной газовой постоянной

$$R = R_\mu / M = 8,314 / 32 = 0,2598 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$T_1 = 25 + 273,15 = 298,15 \text{ К}$$

$$T_2 = 5 + 273,15 = 278,15 \text{ К}$$

Произведем подстановку найденных величин

$$\Delta G = \frac{(550 - 50) \cdot 0,05}{0,2598 \cdot (298,15 - 278,15)} = 4,81139 \text{ кг.}$$

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 ΔH , мм, при температуре ртути t , °C, а высота столба воды над ртутью равна h , мм. Атмосферное давление по ртутному барометру $P_{\text{атм}}$, 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	ΔH , мм	h , мм	$t_{\text{рт}}$, °C	$t_{\text{окр}}$, °C	$P_{\text{атм}}$, 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

1	2	3	4	5	6
14	552	164	23	24	752
15	578	170	18	18	754
16	512	148	21	22	760
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 $P_{\text{вак}}$, см рт.ст. Барометрическое давление составляет $P_{\text{атм}}$, мм рт.ст. Определить:

- абсолютное давление в конденсаторе P_k , Па и ат.;
- на какую высоту H , м, поднимется вода в барометрической трубе?;
- найти расход G , кг, жидкости в барометрическом конденсаторе, при проведении измерений;
- найти удельный объем x , м³/кг, газа проходящего, через конденсатор в зависимости от условий задания.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.7.

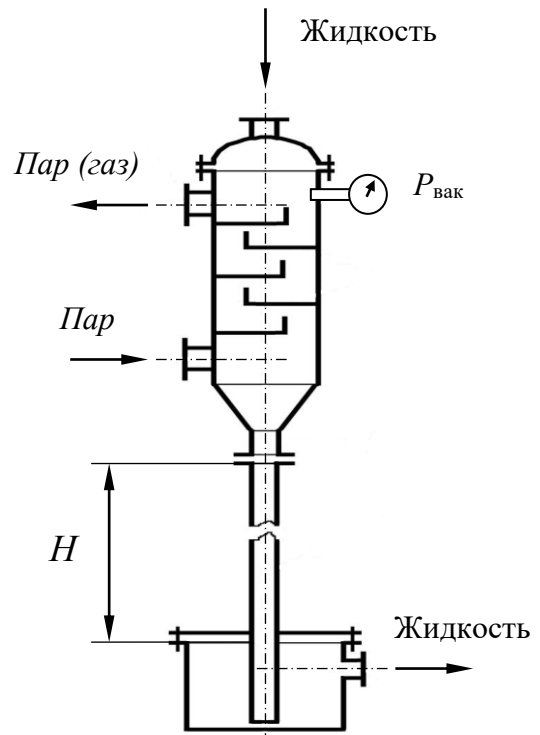


Рис. 2. Барометрический конденсатор

Таблица 1.7

Исходные данные к задаче 6

№ вари- анта	Род жидкого вещества	$P_{\text{вак}},$ см рт.ст.	$P_{\text{атм}},$ мм рт.ст.	$t,$ °C	$V,$ м ³
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
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:

$$\gamma = G / W \quad (2.1)$$

где G – вес однородной жидкости, Н;
 W – объём, занимаемый жидкостью, м³.

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

Плотность ρ есть масса жидкости в единице объёма:

$$\rho = m / W \quad (2.2)$$

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 табл. 2.1 приведены значения плотности воды при разных температурах.

Таблица 2.1

Плотность воды при разных температурах

Температура t , °С	Плотность ρ , кг/м ³	Температура t , °С	Плотность ρ , кг/м ³	Температура t , °С	Плотность ρ , кг/м ³
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

$$G = m \cdot g \quad (2.3)$$

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

Таким образом, между удельным весом и плотностью существует связь

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.4)$$

Плотность смеси $\rho_{см}$ определяется по формуле:

$$\rho_{см} = \frac{m_1 + m_2}{W_1 + W_2} \quad (2.5)$$

или

$$\rho_{см} = \frac{\rho_1 \cdot W_1 + \rho_2 \cdot W_2}{W_1 + W_2} \quad (2.6)$$

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 °С приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Плотность капельных жидкостей (при $t = 20$ °С) и некоторых газов

(при $t = 15$ °С и $p = 0,1$ МПа)

Жидкость или газ	Плотность ρ , кг/м ³	Жидкость или газ	Плотность ρ , кг/м ³
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:

$$\beta_w = \frac{1 \cdot \Delta W}{\Delta p \cdot W} \quad (2.7)$$

где W – первоначальный объём жидкости при атмосферном давлении, м³;
 ΔW – уменьшение объёма жидкости при увеличении давления на Δp .

В гидравлических расчётах коэффициент объёмного сжатия для воды принимают равным $1/(20 \cdot 10^8)$ м²/Н.

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

$$E = 1 / \beta_w \quad (2.8)$$

Для воды объёмный модуль упругости $E \approx 2 \cdot 10^9$ 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:

$$\beta_t = \frac{1 \cdot \Delta W}{\Delta t \cdot W} \quad (2.9)$$

где ΔW – изменение объёма, соответствующее изменению температуры на величину Δt , м³.

Коэффициент температурного расширения капиллярных жидкостей изменяется незначительно, но в практике расчёта отопительных систем его учитывают. В расчётах для воды можно принимать $\beta_t \approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

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:

$$\tau = \pm \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.10)$$

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):

$$1 \text{ П} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с} / \text{см}^2 = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

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

$$\nu = \mu / \rho \quad (2.11)$$

Таблица 2.3

Динамическая и кинематическая вязкость воды при разных температурах

Температура t , $^\circ\text{C}$	Динамическая вязкость μ , Па·с	Кинематическая вязкость ν , $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Температура t , $^\circ\text{C}$	Динамическая вязкость μ , Па·с	Кинематическая вязкость ν , $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
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):

$$1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вязкость жидкости практически не зависит от давления, но значительно

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

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

Таблица 2.4

Кинематическая вязкость некоторых жидкостей (при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
и некоторых газов (при $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 0,1\text{ МПа}$)

Жидкость или газ	Кинематическая вязкость ν , $10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$	Жидкость или газ	Кинематическая вязкость ν , $10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$
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 $^{\circ}E$ – так называемая условная вязкость. Для перехода от условной вязкости в градусах Энглера $^{\circ}E$ к кинематической вязкости в стоксах (Ст) служит эмпирическая формула

$$\nu = (0,0731 \cdot ^{\circ}E - 0,0631) / ^{\circ}E \quad (2.12)$$

Если в задаче не оговариваются температурные условия, то значения кинематической и динамической вязкости принимаются при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 ΔP , действующей на элементарную площадку, к площади этой площадки ΔS , которая, в свою очередь, стремится к нулю:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (2.13)$$

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_a в данной точке по основному уравнению гидростатики равно

$$P_a = P_o + \rho g h_a \quad (2.14)$$

где P_o – поверхностное давление (давление на свободной поверхности жидкости), Па;
 $\rho g h_a$ – весовое давление (вес столба жидкости высотой h_a с площадью поперечного сечения, равной единице);
 ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 h_a – глубина погружения данной точки под свободную поверхность.

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:

$$\Delta P = (P_o + \rho g h_c) S \quad (2.15)$$

где S – площадь данной плоской стенки, смоченная жидкостью, м²; h_c – глубина погружения центра тяжести смоченной плоской стенки под свободную поверхность.

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. (рис. 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 ΔP (точка Д). Местоположение этой точки определяется по формуле:

$$h_d = h_c + \frac{I_c}{h_c S} \quad (2.16)$$

где h_d – глубина погружения центра давления под свободную поверхность жидкости, м; I_c – момент инерции площади щ относительно оси, проходящей через её центр тяжести.

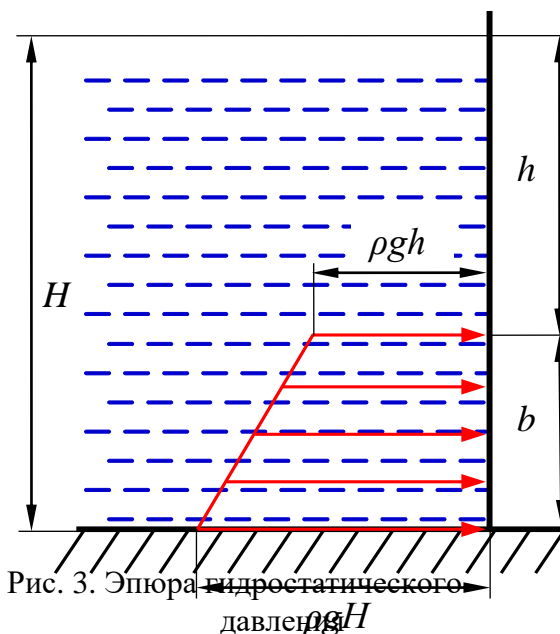


Рис. 3. Эпюра гидростатического давления

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 7

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

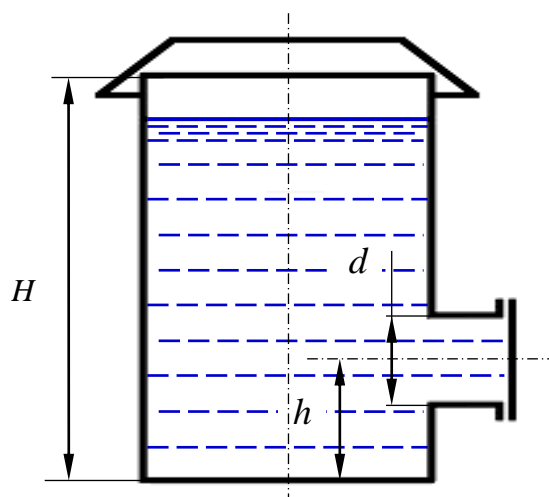


Рис. 4. Жидкость в резервуаре

Таблица 2.5

Исходные данные к задаче 7

№ вари- анта	H , м	Δ	$P_{\text{изб}}$, 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

1	2	3	4	5	6
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 $H = 12,5$ м. Относительная плотность жидкости $\Delta = 0,89$. В резервуаре над жидкостью поддерживается избыточное давление $P_{\text{изб}} = 0,3$ ат. На высоте $h = 1800$ мм, от дна в резервуаре имеется круглый люк – лаз диаметром $d = 600$ мм. Определить давление P , Па, на дно резервуара и силу, действующую на крышку люк – лаза, F , кН.

Решение:

Рассчитаем давление жидкости на люк.

$$P = P_o + \rho \cdot g \cdot h$$

Рассчитаем давление на поверхности жидкости, Па.

$$P_o = 0,3 \cdot 98100 = 29430 \text{ Па}$$

$$\Delta = \rho / \rho_{\text{в}}$$

$$\rho = \Delta \cdot \rho_{\text{в}} = 0,89 \cdot 1000 = 890 \text{ кг/см}^3$$

$$P = 29430 + 890 \cdot 9,81 \cdot 12,5 = 138566,25 = 1,39 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Рассчитаем значение силы действующей на люк

$$F = (P_o + \rho \cdot g \cdot h_c) \cdot S$$

$$h_c = H - h = 12,5 - 1,8 = 10,7 \text{ м}$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,6)^2}{4} = 0,2826 \text{ м}^2$$

$$F = (29430 + 890 \cdot 9,81 \cdot 10,7) \cdot 0,2826 = 34,7 \text{ кН.}$$

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 табл. 2.6.

Таблица 2.6

Исходные данные к задаче 8

№ вари-анта	Тип жидкости	t , °C	№ вари-анта	Тип жидкости	t , °C
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 , °C, и давлении $P_{изб}$, ат. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Исходные данные к задаче 9

№ вари-анта	Газ	t , °C	$P_{изб}$, ат	№ вари-анта	Газ	t , °C	$P_{изб}$, ат
1	2	3	4	5	6	7	8
1	O ₂	-50	2	16	Воздух	-50	2
2	NO	0	1	17	SO ₂	50	2,5
3	CO ₂	50	11	18	CO ₂	40	27
4	HCl	80	0,5	19	NH ₃	500	79
5	Воздух	60	3	20	H ₂	-50	14
6	N ₂	-80	5	21	O ₂	200	4
7	SO ₂	30	0,2	22	NO	300	3
8	CH ₄	80	3,5	23	CH ₄	100	7
9	H ₂ O	300	9	24	H ₂ O	150	4
10	NH ₃	600	49	25	NH ₃	400	13
11	C ₂ H ₆	300	11	26	C ₂ H ₆	250	5
12	H ₂	-100	19	27	H ₂	0	2
13	C ₆ H ₆	200	0,2	28	CO	90	4
14	CO	50	11	29	Cl ₂	-20	3
15	Cl ₂	70	3	30	Воздух	20	5

Задача 10

В середине трубопровода с внутренним диаметром D , мм, (рисунок 5) установлена трубка Пито-Прандтля. Дифференциальный манометр трубки показывает разность уровней H , мм, и заполнен жидкостью, относительная плотность которой Δ . По трубопроводу проходит газ A , абсолютное давление которого $P_{\text{абс}}$, ат, температура t , °С. Определить массовый расход газа G , кг/с. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.8.

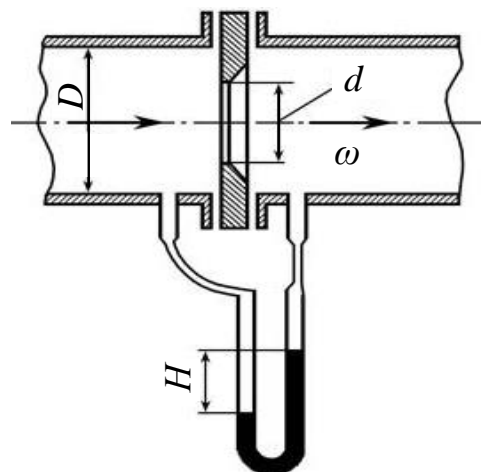


Рис. 5. Устройство трубки Пито-Прандтля

Таблица 2.8

Исходные данные к задаче 10

№ варианта	D , мм	H , мм	Δ	Газ А	$P_{\text{абс}}$, ат	t , °С
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

1	2	3	4	5	6	7
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 $D_{\text{эк}}$, мм, межтрубного пространства кожухотрубчатого теплообменника, состоящего из n , шт, труб диаметром d , мм. Внутренней диаметр кожуха D , мм. Исходные данные для расчета приведены в табл.2.9.

Таблица 2.9

Исходные данные к задаче 11

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

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*Пример*

Определить эквивалентный диаметр $D_{\text{эк}}$, мм, межтрубного пространства кожухотрубчатого теплообменника, состоящего из $n = 1580$ шт, труб диаметром $d = 25 \times 2$ мм. Внутренней диаметр кожуха $D = 1400$ мм.

Решение:

Рассчитаем эквивалентный диаметр межтрубного пространства.

Площадь межтрубного пространства

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{внут}}^2 - n \cdot d^2)$$

Периметр межтрубного пространства

$$P = \pi \cdot (D_{\text{внут}} + n \cdot d)$$

Эквивалентный диаметр будет равен четырем гидравлическим радиусам.

$$D_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot f}{\Pi}$$

$$D_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot (D_{\text{внут}}^2 - n \cdot d^2)}{(D_{\text{внут}} - n \cdot d)}$$

$$D_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot (1400^2 - 1580 \cdot 25^2)}{(1400 - 1580 \cdot 25)} = 95,11 \text{ мм}$$

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 , °C. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Исходные данные к задаче 12

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

1	2	3	4	5	6
24	Хлорбензол	133 x 4	89 x 4	7800	35
25	Хлороформ	219 x 6	159 x 4,5	7650	38
26	Четыреххлористый углерод	108 x 4	76 x 4	8600	30
27	100 %-ный метиловый спирт	159 x 4,5	108 x 4	6400	25
28	100 %-ный этиловый спирт	219 x 6	159 x 4,5	8200	28
29	Толуол	76 x 4	48 x 4	5450	45
30	Вода	108 x 4	57 x 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 табл. 2.11.

Таблица 2.11

Исходные данные к задаче 13

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

1	2	3	4	5	6
26	Гексан	30 x 2,5	750	0,20	40
27	Анилин	32 x 2,5	450	0,92	25
28	50 %-ный глицерин	35 x 1,5	640	0,45	20
29	Четыреххлористый углерод	50 x 3	880	0,48	28
30	Бензол	32 x 2,5	600	0,16	35

Задача 14

По трубопроводу расположенному горизонтально, (рисунок 6) 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 H , мм. Определить скорость жидкости в трубопроводе ω , м/с, и ее расход G , кг/с. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.12.

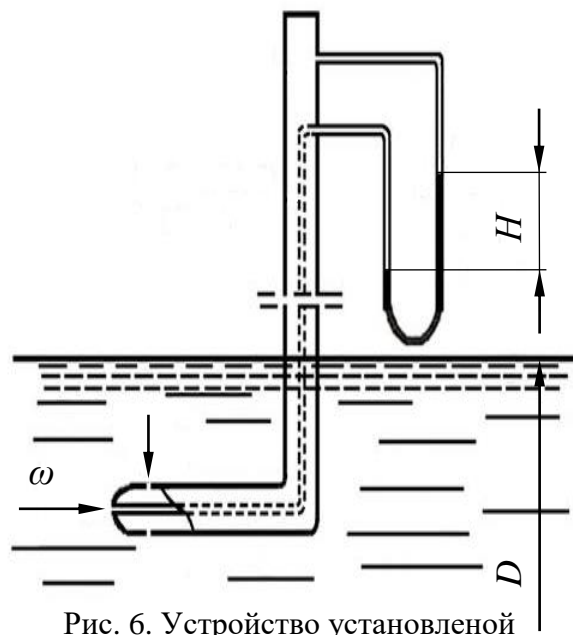


Рис. 6. Устройство установленной диафрагмы

Таблица 2.12

Исходные данные к задаче 14

№ варианта	D , мм	Δ	d , мм	α	H , мм рт.ст.
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

Продолжение табл.2.12

1	2	3	4	5	6
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. Среднее давление в сети P , мм рт.ст., температура газа t , °С. Определить потерю давления на трение ΔP , Па. Газ перекачивается на длину трубопровода. Найти мощность N , кВт, потребляемую насосом, приняв общий КПД насосной установки η . Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.13.

Таблица 2.13

Исходные данные к задаче 15

№ вари-анта	D , мм	L , м	Используемый газ	G , кг/ч	P , мм рт.ст.	t , °С	η , дол.ед
1	2	3	4	5	6	7	8
1	207	1000	Кислород	120	1500	5	0,50
2	125	980	Моноксид 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	Моноксид углерода	135	950	5	0,55

Продолжение табл. 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8
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	1360	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.

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_o \cdot l_o}{\mu} = \frac{\omega_o \cdot l_o}{\nu} \quad (3.1)$$

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 $Re < 2300$ – частицы жидкости движутся параллельно друг другу со стационарной траекторией.

Турбулентный режим $Re > 10000$ – хаотический режим течения с постоянно меняющейся траекторией движения частиц.

Переходный режим $2300 \leq Re \leq 10000$

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.

$$Pe = \frac{\rho \cdot \omega_o \cdot c_p \cdot l_o}{\lambda} \quad (3.2)$$

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:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (3.3)$$

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/с.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (3.4)$$

Названо в честь немецкого физика Людвиг 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.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l_o^3}{\nu^2} \quad (3.5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент объемного расширения (учитывается только для газов), 1/К; Δt – температурный напор, °С; l_o – определяющий размер, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (3.6)$$

Критерий назван в честь выдающегося немецкого механика и машиностроителя 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 критерия подобия, является характеристика отношения термического сопротивления теплопроводности слоя жидкости толщиной l к термическому сопротивлению теплоотдачи.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_o}{\lambda} \quad (3.7)$$

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 .

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_o} \quad (3.8)$$

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:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l_o} \quad (3.9)$$

где a – 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.

$$Fr = \frac{\omega^2}{g \cdot l_o} \quad (3.10)$$

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 P , а его изменение ΔP .

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot \omega^2} \quad (3.11)$$

где ΔP – 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

$$Ar = \frac{g \cdot l_o^3 \cdot \rho_1 \cdot (\rho - \rho_1)}{\mu^2} = \frac{g \cdot l_o^3 \cdot (\rho - \rho_1)}{\rho_1 \cdot \nu^2} \quad (3.12)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; l_o – определяющий линейный размер тела, м; ρ_1 – 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 M , 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_p , м/с. Моделируются одновременно силы трения и силы тяжести. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные к задаче 16

№ вари- анта	Рабочая жидкость	n ,	ω , м/с	№ вари- анта	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 M , 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 u , м/с надо дать воде в модели, если скорость рабочей жидкости в промышленном аппарате $u_p = 0,56$ м/с. Моделируются одновременно силы трения и силы тяжести.

Решение:

Для одновременного подобия сил трения и сил тяжести нужно:

$$Re_1 = Re_2$$

$$Re_1 = \frac{\omega_1 \cdot l_1}{\nu_1} \quad \text{и} \quad Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot l_2}{\nu_2} \Rightarrow \frac{\omega_1 \cdot l_1}{\nu_1} = \frac{\omega_2 \cdot l_2}{\nu_2}$$

где Re_1 – критерий Рейнольдса для промышленного аппарата; ω_1 – скорость рабочей жидкости, м/с; l_1 – определяющий линейный размер, м; ν_1 – 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; ν_2 – коэффициент кинематический вязкости воды, м²/с.

Из равенства критериев Рейнольдса

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\nu_1 \cdot l_2}{\nu_2 \cdot l_1}$$

Критерий Фруда:

$$Fr_1 = Fr_2$$

$$Fr_1 = \frac{\omega_1^2}{g \cdot l_1} \quad \text{и} \quad Fr_2 = \frac{\omega_2^2}{g \cdot l_2}$$

$$\frac{\omega_1^2}{g \cdot l_1} = \frac{\omega_2^2}{g \cdot l_2}$$

Из равенства критериев Фруда

$$\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{g \cdot l_1}{g \cdot l_2} \Rightarrow \frac{\omega_1}{\omega_2} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}$$

Тогда

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Из условия $\frac{\nu_1}{\nu_2} = 158 \Rightarrow \frac{l_1}{l_2} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^{\frac{2}{3}} = (158)^{\frac{2}{3}} = 29,27$

Следовательно l_1 больше l_2 в 29,27 раз, то есть $M = 1 : 29,27$;

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} \Rightarrow \omega_2 = \frac{\omega_1}{\sqrt{l_1/l_2}} = \frac{0,56}{\sqrt{29,27}} = 0,1 \text{ м/с}$$

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 табл. 3.2.

Таблица 3.2

Исходные данные к задаче 17

№ вари- анта	Re_1	Re_2	Re_3	Re_4	Re_5	Ar_1	Ar_2	Ar_3	Ar_4	Ar_5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,0	0,63	0,36	0,23	0,1	36	10,97	6,30	3,98	1,74
2	500	871	1259	1738	3981	83000	251188	501187	$1 \cdot 10^6$	5011870
3	1,26	0,79	0,40	0,20	0,13	31,62	15,85	6,31	2,51	1,26
4	2,0	3,98	12,59	79,43	500	36	200	501	6310	83000
5	631	1000	1585	3162	5495	$1 \cdot 10^5$	251188	630957	2511884	7943279
6	3,98	10,0	39,81	159	398	63	398	2512	15849	63096
7	1,26	0,79	0,40	0,25	0,08	25,12	12,59	7,94	3,98	1,32
8	2,51	6,31	25,12	100	251	50,12	158,5	1000	$1 \cdot 10^4$	31623
9	4,0	16,0	40,0	145	288	100	631	1995	$1 \cdot 10^4$	25119
10	501	1047	1514	2291	3630	109648	501187	$1 \cdot 10^6$	2511884	6309568
11	661	1097	1445	2512	3162	158489	501187	$1 \cdot 10^6$	3981068	7943279
12	2,51	6,31	15,85	79,43	251	63,10	158,5	631	6310	39811
13	1,59	0,79	0,50	0,25	0,16	25,12	15,85	7,94	5,01	1,58
14	1,26	0,79	0,40	0,25	0,1	36,31	19,95	7,94	3,16	1,38
15	500	794	1259	1995	3162	83000	199526	630957	1258925	3981068
16	631	1000	1585	2512	4365	125893	316228	794328	1995261	6309568
17	0,79	0,50	0,25	0,16	0,10	25,12	14,45	6,31	3,47	2,0
18	1,82	5,01	15,85	39,81	159	50,12	199	1000	3981	25119
19	794	1148	1995	3981	5495	158489	316228	$1 \cdot 10^6$	3981068	7943279

Продолжение табл. 3.2

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. Лазинский 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. Лазинский 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ, СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ. ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ.....	4
1.1. Основные термодинамические параметры состояния	4
1.2. Основные газовые законы	5
2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГИДРОСТАТИКИ И ГИДРОДИНАМИКИ. РЕАЛЬНЫЕ И ИДЕАЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ.	15
2.1. Основные понятия гидравлики	15
2.2. Основные понятия гидростатики	18
3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ.	30
3.1. Условия подобия физических процессов	30
3.2. Некоторые из основных критериев подобия и их физический смысл .	30
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	37