



ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ Практикум. Часть 1

Составитель: к.х.н., доцент Ширкин Л.
А.

Содержание

Занятие 1

Занятие 2

Занятие 3

Занятие 4

Занятие 5

Занятие 6

Занятие 7

Занятие 8

Занятие 1

Гидростатика



Повестка дня

- Основные свойства пищевых продуктов и сырья
- Гидростатика

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Все свойства веществ можно разделить на физические (плотность, вязкость и др.) и теплофизические (удельная теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность и др.).
- Многие пищевые продукты представляют собой однородные и неоднородные смеси.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- К однородным смесям относятся растворы, например сахарные, водноспиртовые, соки и т.д.
- Однородные смеси характеризуются концентрацией растворенного вещества.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Способы выражения концентрации и

Массовая доля w_i – отношение массы данного компонента раствора к массе раствора (g_i – количество i -того вещества в г)	$w_i = \frac{g_i}{\sum_i g_i}$
Массовое содержание p_i (процентная концентрация) – масса растворенного i -того вещества (г) в 100 г раствора	$w_i = \frac{g_i}{\sum_i g_i} \cdot 100\%$
Мольная доля x_i – число молей растворенного вещества n_i в 1 моле раствора	$x_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$
Молярность C_i – количество i -того компонента (в молях) в 1 л раствора	$C_i = \frac{n_i}{V}$
Моляльность m_i – количество i -того компонента (в молях) в 1000 г растворителя	$m_i = \frac{n_i}{g_1} \cdot 1000$

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

Формулы пересчета концентраций растворов

Определяемая концентрация	Исходная концентрация			
	ω	C_M	C_N	T
Процентная $\omega, \%$	$\frac{m_{\text{в.в.}}}{m_{\text{р-ра}}} \cdot 100\%$	$\frac{C_M \cdot M}{10 \cdot \rho}$	$\frac{C_N \cdot M \cdot f_{\text{экв}}}{10 \cdot \rho}$	$\frac{T \cdot 100}{\rho}$
Молярная $C_M, \text{ моль/л}$	$\frac{\omega \cdot 10 \cdot \rho}{M}$	моль/л	$C_N \cdot f_{\text{экв}}$	$\frac{T \cdot 1000}{M}$
Нормальная $C_N, \text{ моль экв/л}$	$\frac{\omega \cdot 10 \cdot \rho}{M \cdot f_{\text{экв}}}$	$\frac{C_M}{f_{\text{экв}}}$	моль экв/л	$\frac{T \cdot 1000}{M \cdot f_{\text{экв}}}$
Титр $T, \text{ г/мл}$	$\frac{\omega \cdot \rho}{100}$	$\frac{C_M \cdot M}{1000}$	$\frac{C_N \cdot M \cdot f_{\text{экв}}}{1000}$	г/мл
Примечание	ρ – плотность раствора, г/см ³ ; $f_{\text{экв}}$ – фактор эквивалентности; M – молярная масса вещества, г/моль; m – масса, г			

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- К неоднородным смесям относятся:
 - 1) суспензии – смеси жидкости с твердым веществом, находящемся в тонкораздробленном состоянии;
 - 2) эмульсии – смеси различных нерастворимых одна в другой жидкостей.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

Физические свойства:

- **Плотность** (ρ) – отношение массы вещества к его объёму
$$\rho = \frac{m}{V}$$

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Плотность газов определяют по формуле Клапейрона:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22,4} \frac{273 p}{T p_0}, \quad (1.5)$$

где $\rho_0 = M/22,4$ кг/м³ — плотность газа при нормальных условиях**; M — молярная масса газа, кг/кмоль; T — температура, К.

- Плотность смеси газов:

$$\rho_{\text{см}} = y_1 \rho_1 + y_2 \rho_2 + \dots,$$

где y_1, y_2, \dots — объемные доли компонентов газовой смеси; ρ_1, ρ_2, \dots — соответствующие плотности компонентов.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Плотность смеси жидкостей, при смешении которых не происходит существенных физико-химических изменений:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{\bar{x}_1}{\rho_1} + \frac{\bar{x}_2}{\rho_2} + \dots, \quad (1.3)$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots$ — массовые доли компонентов смеси; $\rho_{см}, \rho_1, \rho_2, \dots$ — плотности смеси и ее компонентов.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Плотность суспензии:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{\bar{x}}{\rho_{тв}} + \frac{1 - \bar{x}}{\rho_{ж}}$$

Здесь \bar{x} — массовая доля твердой фазы в суспензии; $\rho_{тв}$ и $\rho_{ж}$ — плотности твердой и жидкой фаз.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

Задача:

- Определить массовую долю частиц в суспензии плотностью 1050 кг/м^3 . Плотность твердого материала принять 1600 кг/м^3 , а воды 998 кг/м^3 .

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Плотность сахарных сиропов, фруктовых соков, молока с сахаром при 20°C находят

$$\rho_{20} = 10[1,42x + (100 - x)],$$

где x – концентрация сухих веществ, %.

- При температурах, отличных от 20°C,

$$\rho_t = \rho_{20} - 0,5(t - 20),$$

где t – температура продукта.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Плотность томатопродуктов:

$$\rho = 1016,76 + 4,4x - 0,53t.$$

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Для характеристики сыпучих продуктов (зерна, сахарного песка и т.п.) вводится понятие насыпной плотности:

$$\rho_{\text{н}} = (1 - \varepsilon)\rho_{\text{ТВ}}, \quad (1.13)$$

где ε - порозность (пористость) сыпучего материала.

$$\varepsilon = V_{\text{п}}/V_{\text{н}}, \quad (1.14)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем пустот свободно насыпанного материала; $V_{\text{н}}$ – объем свободно насыпанного материала; $\rho_{\text{ТВ}}$ – действительная плотность частиц материала.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Для свободно насыпанных материалов обычно $\varepsilon = 0,38 \dots 0,42$.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- **Вязкость** – это свойство газов и жидкостей сопротивляться действию внешних сил, вызывающих их течение.
- Значения вязкости зависят от температуры.
- Различают динамическую и кинематическую вязкость жидкостей и газов.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Динамический коэффициент вязкости (μ , Па·с):

$$[\mu]_{\text{СИ}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Па} \cdot \text{с} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}};$$

$$[\mu]_{\text{МКГСС}} = \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}}{\text{м}^2};$$

$$[\mu]_{\text{СГС}} = \frac{\text{дин} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}} = \text{П (пуаз)}.$$

- Кинематический коэффициент вязкости (ν , м²/с):

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Многие жидкости, используемые в пищевой промышленности, не подчиняются закону внутреннего трения Ньютона (неньютоновские жидкости). К ним относятся растворы полимеров, дисперсные и пластические системы и др. Подразделяются на три основных типа.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

1. Вязкие или стационарные жидкости, для которых напряжение сдвига не зависит от времени. По виду кривых течения они делятся на:
 - бингамовские (пасты, густые суспензии);
 - псевдопластические (растворы полимеров);
 - дилатантные (суспензия крахмала, клеи).

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

2. Ко второму виду относятся нестационарные жидкости, характеристики которых зависят от времени. Эти жидкости подразделяются на:
 - тиксотропные (простокваша, кефир, сметана и масляные краски);
 - реопенктантные (некоторые коллоидные растворы, например, майонез).

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

3. Вязкоупругие или максвелловские жидкости. К ним относятся вещества тестообразной консистенции. Эти жидкости текут под действием напряжения сдвига, но после снятия напряжения частично восстанавливают свою форму.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

- Динамическая вязкость (мПа·с) соков, сиропов, сгущенного и натурального молока при температуре

$$\mu_t = 12,9\mu/t^{0,85},$$

где μ - вязкость при 20 °С;

для натурального молока: $\mu = 0,7\exp(0,06 + 0,08x)$,

здесь x - концентрация сухих веществ.

Вязкость растительного масла (в мПа·с):

$$\mu_t = \frac{0,175}{10\exp(0,31 + 0,026t)}$$

Вязкость томатопродуктов (в Па·с):

$$\mu_t = 0,0199x^{2,94} t^{-1,17}.$$

Гидростатика

- Гидравлика состоит из гидростатики и гидродинамики.
- Гидростатика изучает поведение покоящейся жидкости, гидродинамика – движущейся жидкости.

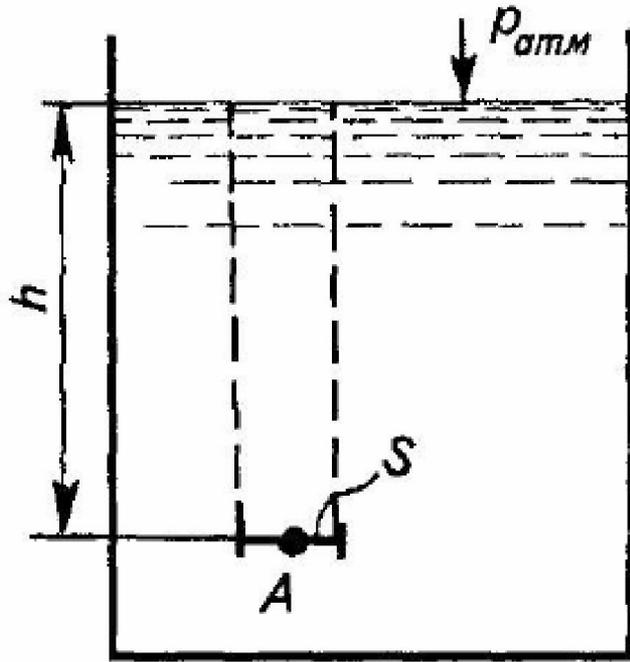
Гидростатика

- ▣ **Свободная поверхность** – поверхность раздела между жидкостью и газовой фазой (в отдельных случаях – другой несмешивающейся жидкостью).

Гидростатика

- ▣ **Внешнее статическое давление** – давление на свободную поверхность жидкости (статическое давление).
- ▣ **Избыточное гидростатическое давление** – давление, создаваемое столбом жидкости (гидростатическое давление).

Гидростатика



- Давление внутри жидкости

Гидростатика

- Абсолютное давление внутри жидкости равно сумме давлений: на свободной поверхности и избыточного, вызванного весом столба жидкости над рассматриваемой точкой.

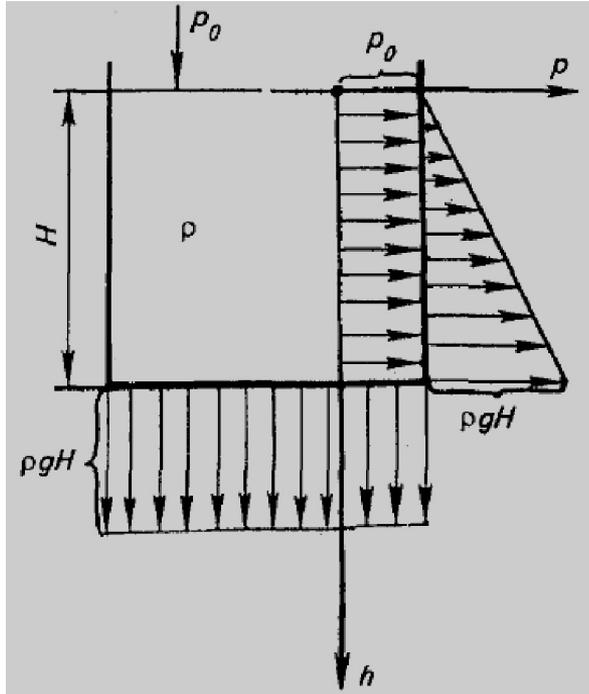
Гидростатика

- Основное уравнение гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.7)$$

где p — гидростатическое давление на глубине h (в м) от поверхности жидкости, Па; p_0 — давление на поверхность жидкости, Па.

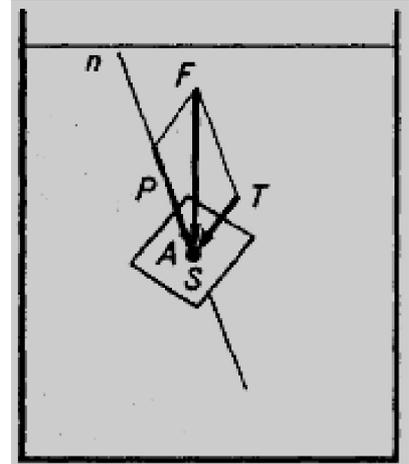
Гидростатика



- Распределение давления на плоскую стенку

Гидростатика

- Свойство 1. Гидростатическое давление направлено по нормали к поверхности, на которую оно действует.



Гидростатика

- Свойство 2. Давление в любой точке поверхности внутри жидкости не зависит от угла наклона этой поверхности (от ее пространственной ориентации), а зависит только от глубины погружения точки.

Гидростатика

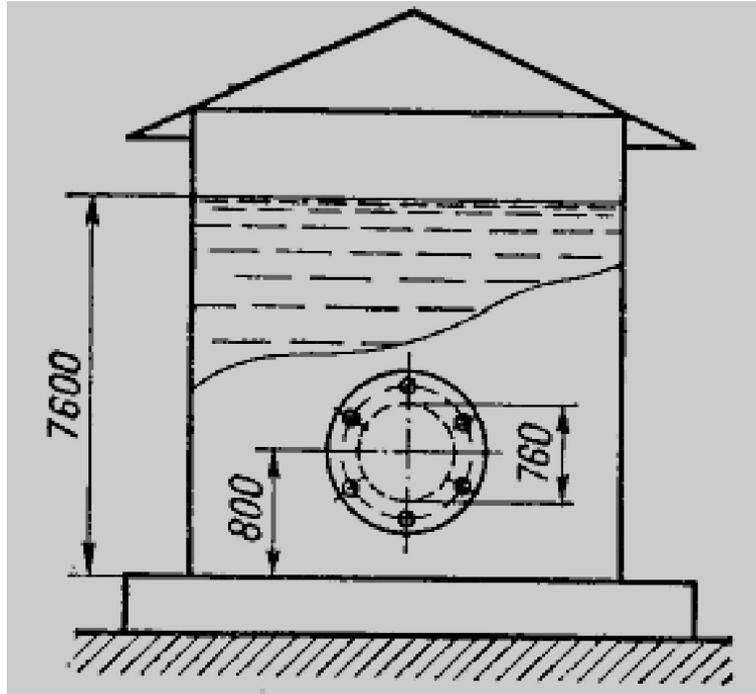
Задача

- Высота уровня жидкости в резервуаре 7,6 м. Плотность жидкости 960 кг/м^3 . На высоте 800 мм от дна в резервуаре имеется круглый лаз диаметром 760 мм, крышка которого прикрепляется болтами диаметром 10 мм.

Гидростатика

- Принимая для болтов допустимое напряжение на разрыв $68,64655$ МПа, определить необходимое число болтов. Определить также давление жидкости на дно резервуара.

Гидростатика



□ Методические указания к задаче

Перед решением задачи необходимо проработать теоретический материал по основам «Гидравлики». Дать схему.

Сила давления жидкости на плоскую стенку $P(H)$.

$P = (p_0 + \rho g h c) F$, H , и определяем силу давления на 1 болт – P_1 .

$$\text{Число болтов } n = \frac{P}{P_1}$$

Давление жидкости на дно резервуара

$$P = \rho g H, \text{ Па.}$$

Гидростатика

Контрольная задача

- Высота уровня жидкости в резервуаре H , м. Относительная плотность жидкости Δ . На высоте h , мм от дна подачи в резервуаре имеется круглый лаз диаметром D , мм, крышка которого прикрепляется болтами диаметром d , мм. Принимая для болтов допустимое напряжение на разрыв σ , кгс/см². Определить необходимое число болтов. Определить давление жидкости на дно резервуара.

Гидростатика

□ Контрольная задача

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H, м	7,6	7,0	8,5	7,1	8,4	7,2	8,2	7,3	8,0	7,8
Δ	0,96	0,95	0,97	0,96	0,95	0,97	0,96	0,95	0,97	0,96
h, мм	800	700	900	720	880	740	860	860	840	820
D, мм	760	700	850	710	840	720	820	730	800	780
d, мм	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
σ , кгс/см ²	700	690	710	700	690	710	700	690	710	700

Занятие 2

Гидродинамика. Режимы течения



Повестка дня

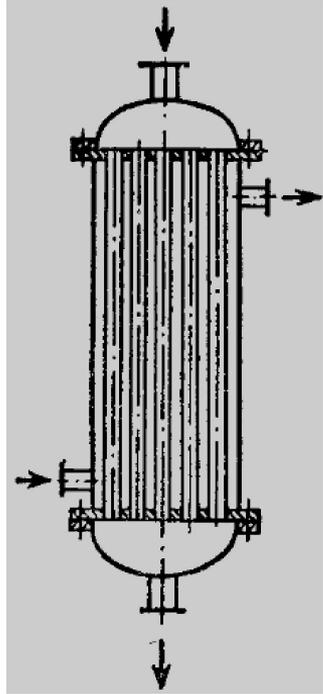
- Расчет эквивалентного диаметра
- Расчет режима течения

Расчет эквивалентного диаметра

□ Задача 1

1.16. Определить эквивалентный диаметр межтрубного пространства кожухотрубчатого теплообменника (рис. 1.21), состоящего из 61 трубы диаметром $38 \times 2,5$ мм. Внутренний диаметр кожуха 625 мм.

Расчет эквивалентного диаметра



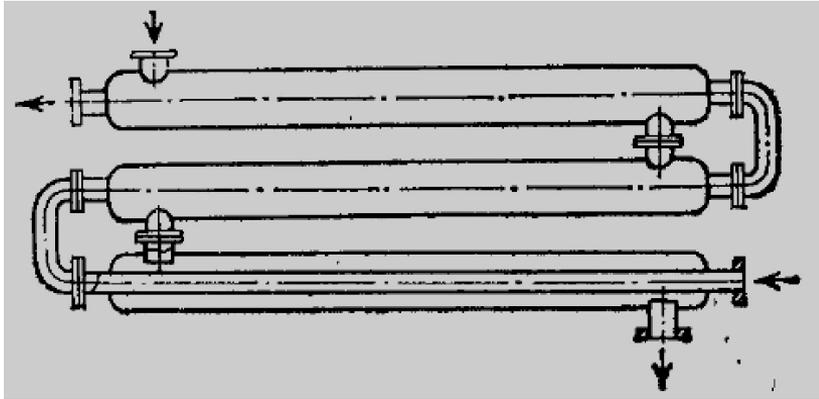
- Кожухотрубчатый теплообменник

Расчет режима течения

□ Задача 2

1.17. Определить режим течения воды в кольцевом пространстве теплообменника типа «труба в трубе» (рис. 1.12). Наружная труба — $96 \times 3,5$ мм, внутренняя — 57×3 мм, расход воды $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, средняя температура воды $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Расчет режима течения



- Теплообменник типа «труба в трубе»

Занятие 3

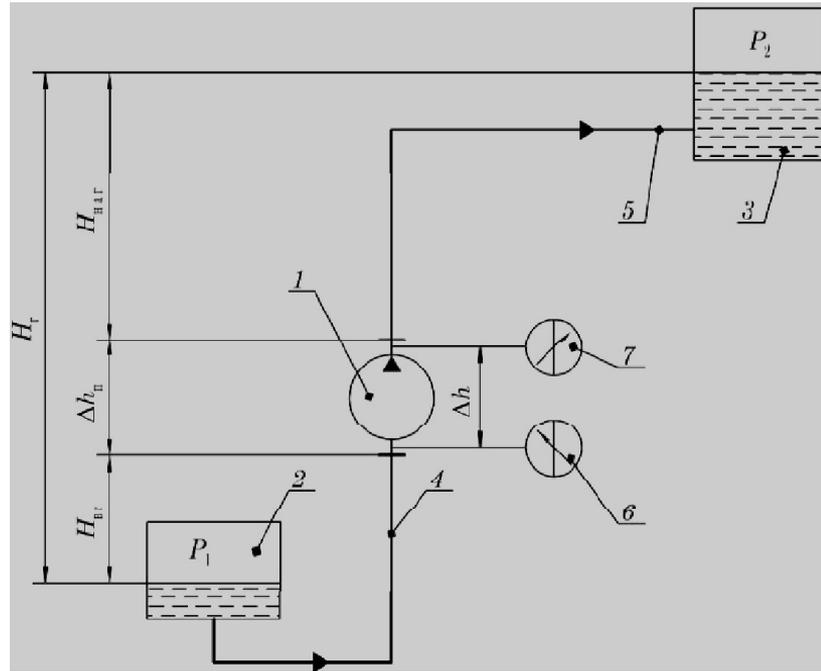
Гидравлические сопротивления в
трубопроводах и каналах



Повестка дня

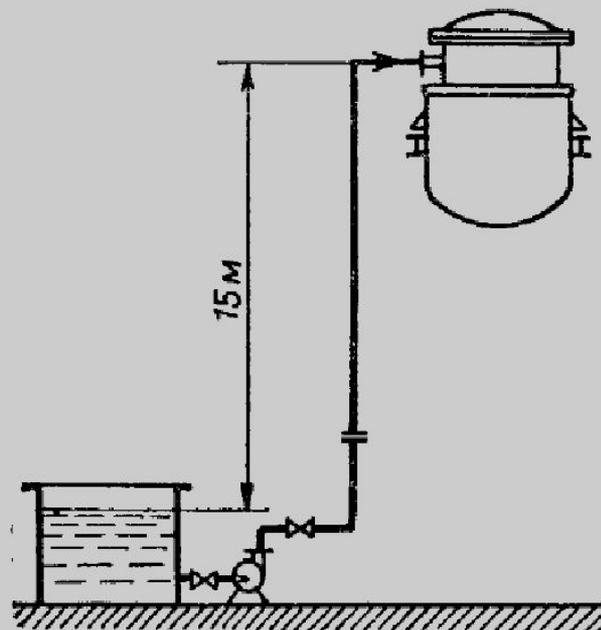
- Гидравлические сопротивления в трубопроводах и каналах
- Контрольное задание № 2

Гидравлические сопротивления...



- Схема перекачивания жидкости насосом:
- 1 – насос; 2 – расходная емкость; 3 – приемная емкость; 4 – всасывающий трубопровод; 5 – нагнетательный трубопровод; 6 – вакуумметр; 7 – манометр

Пример 1.26. 30 т/ч нитробензола при 20 °С перекачиваются насосом из бака с атмосферным давлением в реактор, где поддерживается избыточное давление 0,01 МПа (рис. 1.16). Трубопровод выполнен из стальных труб диаметром 89 × 4 мм с незначительной коррозией. Длина всего трубопровода, включая местные сопротивления, 45 м. На трубопроводе установлены: диафрагма ($d_0 = 51,3$ мм), две задвижки и четыре отвода под углом 90° с радиусом изгиба 160 мм. Высота подъема жидкости 15 м. Найти мощность, потребляемую насосом, приняв общий к. п. д. его равным 0,65.



Высота подъема жидкости 15 м. Найти мощность, потребляемую насосом, приняв общий к. п. д. его равным 0,65.

Решение. Массовый расход нитробензола:

$$M = 30\,000/3600 = 8,34 \text{ кг/с.}$$

Объемный расход:

$$V = M/\rho = 8,34/1200 = 0,00695 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ — плотность нитробензола (табл. IV).

Рис. 1.16 (к примеру 1.26)



Гидравлические сопротивления...

Общее гидравлическое сопротивление трубопровода (сети) по уравнению (1.49):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \frac{\rho w^2}{2} \left(1 + \frac{\lambda L}{d} + \Sigma \zeta \right) + \rho g h_{\text{под}} + \Delta p_{\text{доп}} = \\ &= \frac{1200 \cdot 1,35^2}{2} \left(1 + \frac{0,0257 \cdot 45}{0,081} + 10,35 \right) + 1200 \cdot 9,81 \cdot 15 + \\ &\quad + 0,1 \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 215\,000 \text{ Па.}\end{aligned}$$

Потребляемая насосом мощность по уравнению (1.33):

$$N = \frac{V \Delta p}{1000 \eta} = \frac{0,00695 \cdot 215\,000}{1000 \cdot 0,65} = 2,3 \text{ кВт.}$$

Контрольная задача № 2

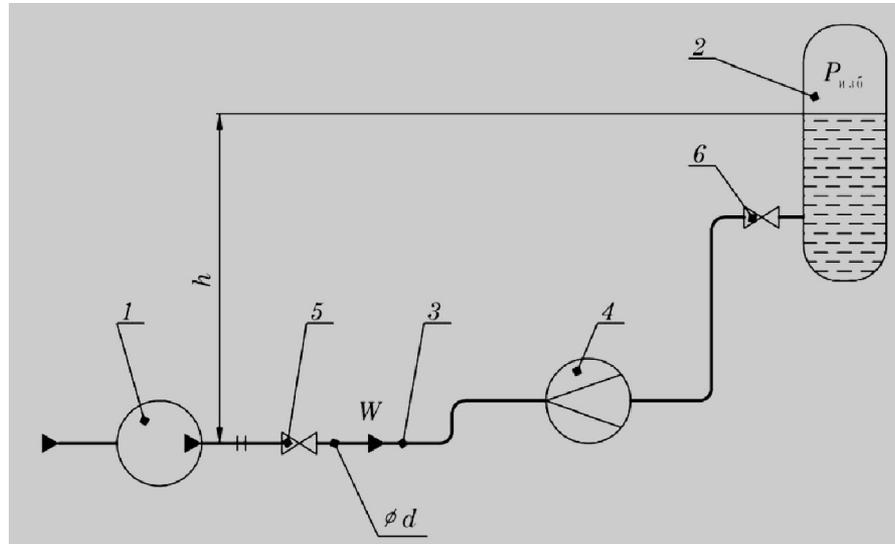
Жидкий компонент реакционной смеси, динамическая вязкость которого μ , а плотность ρ , насосом подается в реактор. Насос и реактор соединяет трубопровод внутренним диаметром d и длиной l . На трубопроводе установлены два нормальных вентиля и измерительная диафрагма. Прямые участки трубопровода соединяют N прямоугольных отводов. Отношение радиуса изгиба по оси отводов к их внутреннему диаметру A . Отношение площади сечения отверстия измерительной диафрагмы к площади поперечного сечения трубопровода m . Относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода ε . Уровень жидкости в реакторе на h выше уровня расположения нагнетательного патрубка насоса. Избыточное давление газовой фазы над поверхностью жидкости в реакторе изб P . Массовая скорость жидкости в трубопроводе w .

Контрольная задача № 2

Определить:

- 1) потери давления на трение в трубопроводе;
- 2) абсолютное давление жидкости в сечении соединения нагнетательного пат-
рубка насоса и трубопровода;
- 3) объемную производительность насоса.

Контрольная задача № 2



- Схема подачи жидкости в реактор:
- 1 – насос; 2 – реактор; 3 – трубопровод; 4 – измерительная диафрагма; 5, 6 – вентили

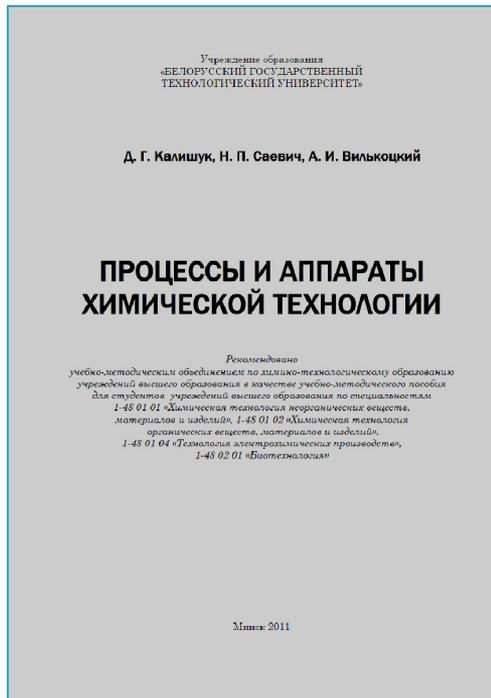
Контрольная задача № 2

Показатель	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
μ , мПа·с	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6
L , м	65	40	58	45	47	50	43	55	38	60
A	1,0	1,5	2,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,5	2,5
$\varepsilon \cdot 10^4$	125	90	80	45	60	70	50	35	100	40
$P_{изб}$, кПа	120	300	150	90	270	180	60	240	210	30
W , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	995	965	905	935	895	855	785	735	675	705

Контрольная задача № 2

Показатель	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ , кг/м ³	850	870	900	970	950	930	990	920	880	860
d , мм	20	33	27	21	40	32	39	22	50	28
N	4	4	5	5	6	6	4	5	6	5
m	0,15	0,19	0,14	0,18	0,11	0,20	0,12	0,16	0,10	0,17
h , м	5,0	7,0	5,5	8,5	7,5	6,0	9,5	9,0	8,0	6,5

Литература



- Калишук Д.Г.
Процессы и
аппараты
химической
технологии, 2011
- С. 177 - 178

Литература



- Материалы курса "Процессы и аппараты пищевой промышленности"

Занятие 4

Уравнение Бернулли и его практическое применение



Повестка дня

- Измерение расхода жидкости
- Истечение жидкости через отверстия
- Примеры решения задач
- Контрольное задание № 3

Измерение расхода жидкости

- Уравнение Бернулли для установившегося потока идеальной жидкости:

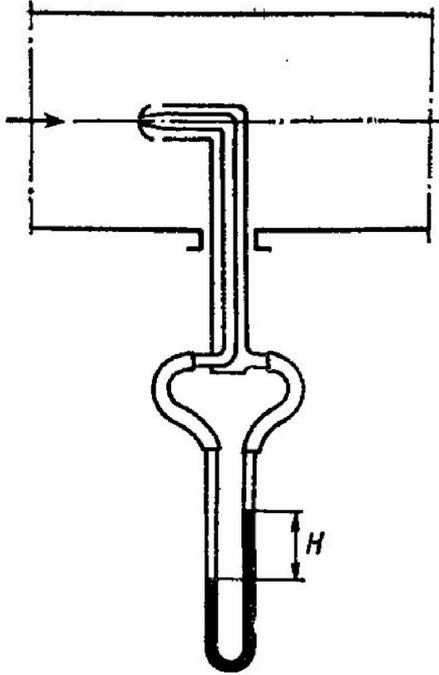
$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = P_2 + \rho g z_2 + \frac{\rho w_2^2}{2}$$

Измерение расхода жидкости

- Трубка Пито (Пито – Прандтля). При помощи данной трубки измеряется динамическое давление в определенной точке сечения потока как разность полного гидродинамического давления $P_{гд}$, Па, и полного статического давления $P_{п}$, Па, в этой точке:

$$P_{дин} = P_{гд} - P_{п}$$

Измерение расхода жидкости



- Схема измерения расхода с помощью трубки Пито (Пито – Прандтля)

Измерение расхода жидкости

Трубку Пито — Прандтля устанавливают точно по оси трубопровода и при помощи присоединенного к ней дифманометра находят величину $\Delta p = H (\rho_m - \rho) g = \Delta p_{ск}$. Затем рассчитывают максимальную (осевую) скорость потока $w_{макс} = \sqrt{2gH (\rho_m - \rho)/\rho}$, определяют величину $Re = w_{макс} d\rho/\mu$ и по графику (рис. 1.2) находят отношение $w/w_{макс}$, из которого вычисляют среднюю скорость w .

Расход жидкости или газа определяют по формуле (1.17):

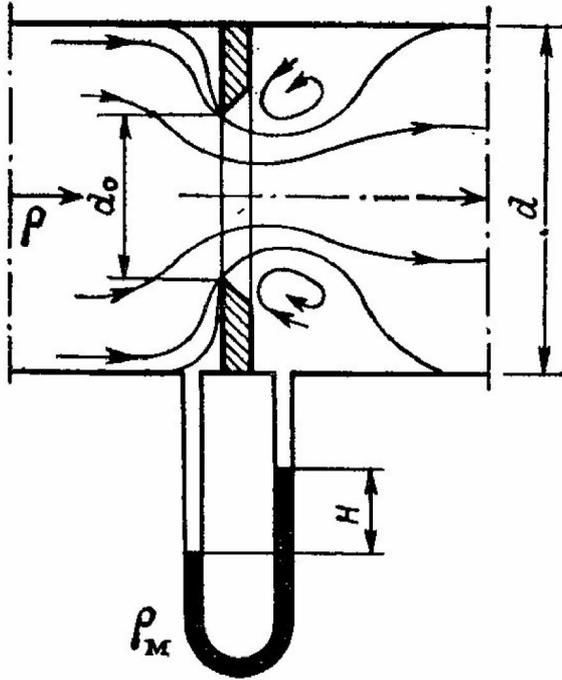
$$V = wf,$$

где f — площадь поперечного сечения трубопровода, m^2 .

Измерение расхода жидкости

- Рассчитывают локальную скорость в указанной точке сечения. Используя данные о режиме движения жидкости и локальную скорость на оси трубопровода, несложно рассчитать среднюю скорость и объемный расход .

Измерение расхода жидкости



- Схема измерения расхода с помощью диафрагмы

Измерение расхода жидкости

Объемный расход жидкости или газа V (в $\text{м}^3/\text{с}$):

$$V = \alpha k f_0 \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} = \alpha k f_0 \sqrt{2gH \frac{\rho_m - \rho}{\rho}}. \quad (1.32)$$

где α — коэффициент расхода нормальной диафрагмы в гладком (нешероховатом) трубопроводе (табл. XV); k — поправочный множитель, учитывающий шероховатость стенок трубопровода (средние значения k для трубопроводов приведены в табл. XVI; для гидравлически гладких трубопроводов $k = 1$); $f_0 = 0,785d_0^2$ — площадь отверстия диафрагмы, м^2 ; d_0 — диаметр отверстия, м ; H — разность уровней жидкости в дифманометре, присоединенном к диафрагме, м ; ρ_m — плотность жидкости в дифманометре, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ — плотность жидкости (или газа), протекающей по трубопроводу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Истечение через отверстия

4.3.4.4. При истечении жидкости через малые отверстия (насадки) из сосудов, емкостей, аппаратов объемный расход жидкости через отверстие V , м³/с, при постоянном уровне жидкости H , м, над отверстием определяется

$$V = \varphi S_0 \sqrt{2g \left(H + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \right)}, \quad (4.56)$$

где φ – коэффициент расхода отверстия (насадка); S_0 – площадь поперечного сечения отверстия (насадка), м²; P_1 и P_2 – статические давления над поверхностью жидкости в сосуде и в месте истечения, соответственно, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Истечение через отверстия

Время истечения жидкости из сосуда постоянного по высоте поперечного сечения S , м^2 , через отверстие (насадок) τ , с, при условии уменьшения уровня в нем от H_1 , м, до H_2 , м:

$$\tau = \frac{2S \left(\sqrt{H_1 + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}} - \sqrt{H_2 + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}} \right)}{\varphi S_0 \sqrt{2g}}. \quad (4.57)$$

Истечение через отверстия

- При условии $P_1 = P_2$ зависимости принимают вид:

$$V = \varphi S_0 \sqrt{2gH};$$
$$\tau = \frac{2S(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\varphi S_0 \sqrt{2g}}$$

Истечение через отверстия

- Время полного опорожнения сосуда тп при $H_2 = 0$:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{2S \left(\sqrt{H_1 + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}} - \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho g}} \right)}{\varphi S_0 \sqrt{2g}}$$

Истечение через отверстия

- При $P_2 = P_1$:

$$\tau_{\Pi} = \frac{2S\sqrt{H_1}}{\varphi S_0\sqrt{2g}}$$

- Значение φ является справочной величиной и в наибольшей мере зависит от формы и исполнения отверстия (насадка).

Истечение через отверстия

14. Скорость истечения жидкости w (в м/с) из малого отверстия в дне или в стенке сосуда при постоянном уровне жидкости в сосуде:

$$w = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (1.28)$$

где φ — коэффициент скорости, безразмерный; g — ускорение свободного падения, м/с²; H — высота уровня жидкости над центром отверстия, м.

Истечение через отверстия

Если давление на поверхности жидкости в сосуде (p_0 , Па) и давление в пространстве, куда вытекает струя (p , Па), неодинаковы, то в формулу (1.28) вместо H надо подставить величину $H' = H + \frac{p_0 - p}{\rho g}$, где ρ — плотность вытекающей жидкости, кг/м³.

Истечение через отверстия

Объемный расход жидкости V (в $\text{м}^3/\text{с}$), вытекающей через отверстие площадью f_0 (в м^2), при постоянном уровне жидкости в сосуде и при $\rho_0 = \rho$ составляет:

$$V = \alpha f_0 \sqrt{2gH}. \quad (1.29)$$

Здесь α — безразмерный коэффициент расхода, представляющий собой произведение коэффициента скорости φ и коэффициента сжатия струи ε :

$$\alpha = \varphi \varepsilon. \quad (1.30)$$

Истечение через отверстия

15. Время опорожнения τ (в с) открытого сосуда, имеющего постоянную площадь поперечного сечения f , через отверстие площадью f_0 может быть подсчитано по уравнению:

$$\tau = \frac{2f \sqrt{H}}{\alpha f_0 \sqrt{2g}}, \quad (1.31)$$

где H — начальный уровень жидкости над отверстием, м.

Примеры решения задач

Пример 1.19. На трубопроводе с внутренним диаметром 200 мм имеется плавный переход на диаметр 100 мм (рис. 1.13). По трубопроводу подается $1700 \text{ м}^3/\text{ч}$ (при нормальных условиях) метана при 30°C . Открытый в атмосферу U-образный водяной манометр, установленный на широкой части трубопровода перед сужением, показывает избыточное давление в трубопроводе, равное 40 мм вод. ст. Каково будет показание такого же манометра на узкой части трубопровода? Сопротивления пренебречь. Атмосферное давление 760 мм рт. ст.

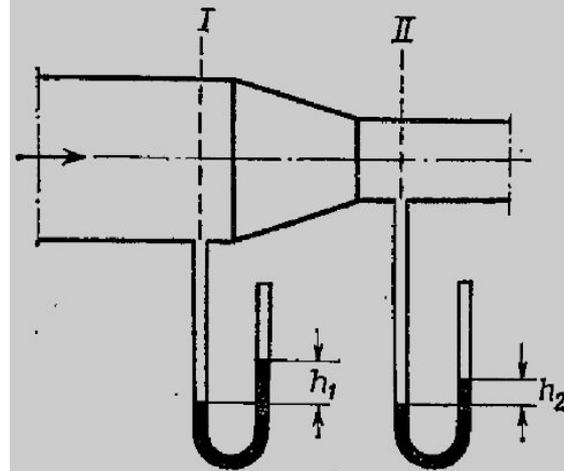
Решение. Считая приближенно плотность метана на участке трубопровода между точками присоединения манометров постоянной (что проверим в конце расчета), составляем уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости:

$$\frac{\rho_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{\rho_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g},$$

откуда находим:

$$\rho_1 - \rho_2 = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \rho.$$

Определяем скорости метана в сечениях I и II, принимая, что давление в трубопроводе приблизительно равняется атмосферному:



$$w_1 = \frac{1700 \cdot 303}{3600 \cdot 273 \cdot 0,785 \cdot 0,2^2} = 16,7 \text{ м/с.}$$

По уравнению (1.20)

$$w_2 = w_1 \frac{f_1}{f_2} = 16,7 \left(\frac{200}{100} \right)^2 = 66,8 \text{ м/с.}$$

Рис. 1.13 (к примеру 1.19).

Вычисляем плотность метана:

$$\rho = \frac{MT_0}{22,4T} = \frac{16 \cdot 273}{22,4 \cdot 303} = 0,645 \text{ кг/м}^3.$$

Находим разность давлений:

$$p_1 - p_2 = \frac{(w_2^2 - w_1^2) \rho}{2} = \frac{(66,8^2 - 16,7^2) 0,645}{2} = 1354 \text{ Па},$$

или $1354/9,81 = 138$ мм вод. ст., откуда

$$p_2 = p_1 - 138 = 40 - 138 = -98 \text{ мм вод. ст.},$$

т. е. давление в сечении II будет меньше, чем в I, на 138 мм вод. ст., и манометр в сечении II будет показывать вакуум, равный 98 мм вод. ст. (961 Па).

Абсолютное давление в сечении I:

$$10\,330 + 40 = 10\,370 \text{ мм вод. ст.} = 1,037 \text{ кгс/см}^2 = 0,1017 \text{ МПа};$$

в сечении II:

$$10\,330 - 98 = 10\,232 \text{ мм вод. ст.} = 1,023 \text{ кгс/см}^2 = 0,1003 \text{ МПа}.$$

Принимая при вычислении скоростей и плотности метана постоянство давления в трубопроводе, мы допустили погрешность, не превышающую

$$\frac{1,037 - 1,023}{1,023} 100 \approx 1,4 \text{ \%}.$$

Пример 1.21. Цилиндрический бак диаметром 1 м наполнен водой на высоту 2 м. Отверстие для истечения в дне имеет диаметр 3 см. Определить время, необходимое для опорожнения бака.

Решение. Воспользуемся формулой (1.31):

$$\tau = \frac{2f\sqrt{H}}{\alpha f_0\sqrt{2g}},$$

где f — площадь сечения сосуда, м^2 ; f_0 — площадь отверстия, м^2 ; H — начальная высота уровня, м; α — коэффициент расхода (для отверстия с незакругленными краями можно принять $\alpha = 0,61$).

Подставляя заданные величины в формулу, находим:

$$\tau = \frac{2 \cdot 0,785 \cdot 1^2 \sqrt{2}}{0,61 \cdot 0,785 \cdot 0,03^2 \sqrt{2 \cdot 9,81}} = 1180 \text{ с} \approx 20 \text{ мин.}$$

Контрольное задание № 3

1.21. Из отверстия диаметром 10 мм в дне открытого бака, в котором поддерживается постоянный уровень жидкости высотой 900 мм, вытекает 750 дм^3 жидкости в 1 ч. Определить коэффициент расхода. Через сколько времени опорожнится бак, если прекратить подачу в него жидкости? Диаметр бака 800 мм.

1.22. В напорный бак с площадью поперечного сечения 3 м^2 притекает вода. В дне бака имеется спускное отверстие. При установившемся течении расход через отверстие равен притоку и уровень воды устанавливается на высоте 1 м. Если прекратить приток воды, уровень ее будет понижаться и через 100 с бак опорожнится. Определить приток воды в бак.

Занятие 5

Изучение процесса
фильтрации
суспензий



Повестка дня

- Фильтрация суспензий
- Кинетика фильтрации
- Примеры решения задач
- Контрольное задание № 4

Фильтрация суспензий

- **Фильтрацией** называют процесс разделения суспензий через пористую (фильтровальную) перегородку, которая задерживает твердую (дисперсную) фазу и пропускает жидкую (дисперсную) среду

Фильтрация суспензий

- Процесс фильтрации подразделяют на два вида: поверхностное фильтрация (с образованием слоя осадка) и глубинное фильтрация (с закупориванием пор фильтровальной перегородки).

Фильтрация суспензий

- Возможен также промежуточный вид фильтрации – **поверхностно-глубинный**. Вид фильтрации определяется взаимосвязью между свойствами суспензии и фильтровальной перегородки.

Фильтрация суспензий

- При разделении маловязких суспензий с концентрацией твердой фазы более 1 %, через фильтровальную перегородку с размерами пор меньше размеров частиц имеет место поверхностное фильтрование. Твердые частицы накапливаются на поверхности фильтровальной перегородки и образует осадок.

Фильтрация суспензий

- При дальнейшем разделении суспензий слой осадка начинает играть роль фильтрующего элемента, задерживая частицы твердой фазы и предотвращая закупоривание пор фильтровальной перегородки.

Фильтрация суспензий

- При разделении вязких суспензий с небольшой концентрацией мелкодисперсных фракций через фильтровальную перегородку с размерами пор больше размеров частиц имеет место глубинное фильтрование.

Фильтрация суспензий

- ❑ Твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и задерживаются в них, не образуя осадка.
- ❑ Закупоривание пор твердыми частицами наблюдается уже в начальный период процесса разделения суспензий, что снижает производительность фильтра.

Фильтрация суспензий

- Глубинное фильтрование используют только в фильтрах периодического действия. При этом необходима периодическая регенерация или замена фильтровальной перегородки.

Фильтрация суспензий

- По целевому назначению процесс фильтрации может быть очистным или продуктовым.

Фильтрация суспензий

- **Очистное фильтрование** применяют для разделения суспензий и очистки растворов от различного рода включений. Целевой продукт – фильтрат. В пищевой промышленности очистное фильтрование используют при осветлении вина, виноматериалов, молока, пива и других продуктов.

Фильтрация суспензий

- Назначение **продуктового фильтрации** – выделение из суспензий, диспергированных в них продуктов в виде осадка. Целевым продуктом является осадок. Примером такого фильтрации является разделение дрожжевых суспензий.

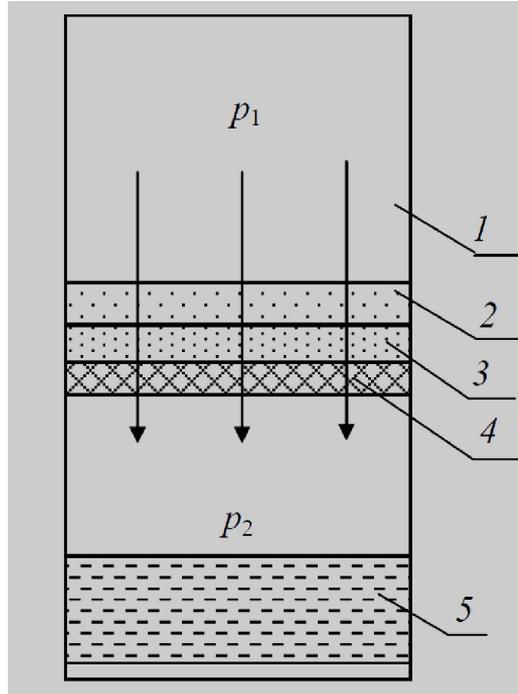
Фильтрация суспензий

- **Движущая сила процесса фильтрации** – разность давлений по абсолютной стороне фильтровальной перегородки.
- Эта разность создается с помощью насоса, компрессора или вакуум насоса. Условия протекания процесса фильтрации зависят от способа создания разности давлений.

Фильтрация суспензий

- Фильтровальные перегородки должны обладать необходимой задерживающей способностью, обеспечивать заданную чистоту фильтрата, не создавать значительного гидравлического сопротивления потоку и иметь высокую механическую прочность.

Фильтрация суспензий



- Схема фильтра для разделения суспензий: 1 – корпус; 2 – суспензия; 3 – осадок; 4 – фильтровальная перегородка; 5 – фильтрат

Фильтрация суспензий

- Существует фильтрация:
 - при постоянной разности давлений $\Delta p = \text{const}$;
 - при постоянной скорости $W = \text{const}$;
 - при переменных разностях давлений и скорости $\Delta p = \text{var}$ и $W = \text{var}$.

Кинетика фильтрования

- Эффективность процесса разделения суспензий характеризуется "эффектом разделения" или степенью очистки η (в %):

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100$$

- где C_1 и C_2 – концентрации дисперсной фазы соответственно в суспензии и фильтрате.

Кинетика фильтрования

- Образующийся в процессе фильтрования осадок должен иметь минимальную влажность. Влажность осадка U (в %) определяют по формуле.

$$U = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{ос}}} \cdot 100$$

Кинетика фильтрования

- где $m_{ж}$ – масса жидкой фазы в осадке; $m_{ос}$ – масса влажного осадка.

Кинетика фильтрования

- При фильтровании с образованием слоя осадка общее сопротивление фильтрованию R определяют как сумму сопротивлений фильтровальной перегородки R_{ϕ} и слоя осадка R_{oc} :

$$R = R_{\phi} + R_{oc}$$

Кинетика фильтрования

- Коэффициент сопротивления (фильтрования)

$$k = \frac{1}{\mu(R_{oc} + R_{\phi})}$$

- где μ – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы суспензии, Па·с.

Кинетика фильтрования

- В каждый момент времени скорость фильтрования прямо пропорциональна разности давлений Δp и обратно пропорциональна сопротивлению R и вязкости жидкости μ :

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{oc} + R_{\phi})}$$

Кинетика фильтрования

- Сопротивление слоя осадка определяют равенством:

$$R_{oc} = r_{oc} h$$

- где r_{oc} – удельное сопротивление слоя осадка, m^{-2} ; h – толщина слоя осадка, м.

Кинетика фильтрования

- Из уравнений можно получить основное уравнение фильтрования:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu (r_{oc} h + R_{\phi})}$$

Кинетика фильтрования

- Решим уравнение для фильтрования с образованием слоя несжимаемого осадка при постоянном перепаде давления.

Кинетика фильтрации

- В этом случае: движущая сила постоянна; осадок несжимаемый; высота слоя осадка увеличивается; концентрация твердых частиц в суспензии постоянна; сопротивление фильтрующей перегородки не изменяется в процессе фильтрации.

Кинетика фильтрации

- После интегрирования в пределах от 0 до V и от 0 до τ , получ

$$V^2 + 2 \frac{R_{\phi}}{r_{oc}\chi} V = 2 \frac{\Delta p}{\mu r_{oc}\chi} \tau$$

- ИЛИ

$$V^2 + 2cV = k\tau$$

где $c = \frac{R_{\phi}}{r_{oc}\chi}$, и $k = \frac{2\Delta p}{\mu r_{oc}\chi}$, c, k – константы фильтрации.

Кинетика фильтрования

- Если продифференцировать уравнение:

$$2VdV + 2cdV = kd\tau$$

- то можно получить формулу для расчета скорости фильтрования:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{k}{2(V + c)}$$

Кинетика фильтрации

- Константы фильтрации c и k в каждом конкретном случае чаще всего определяются экспериментально.

Примеры решения задач

12. При $\Delta p = \text{const}$ объем фильтрата V , прошедшего через 1 м^2 фильтрующей поверхности за время τ , и продолжительность фильтрования τ связаны уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (3.13)$$

где C — константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки (ткани), $\text{м}^3/\text{м}^2$; K — константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и жидкости [см. формулу (3.15)], $\text{м}^2/\text{с}$; τ — продолжительность фильтрования, с.

Примеры решения задач

18. Количество сухого вещества G (в кг) в осадке, получаемом на фильтре, зависит от количества собранного фильтрата V , плотности фильтрата ρ , массовой доли твердой фазы в суспензии x , влажности осадка (выражаемой массовым отношением m) и может быть вычислено по формуле:

$$G = Vc = V \frac{\rho x}{1 - mx} \quad (3.24)$$

Примеры решения задач

19. Концентрация твердой фазы в суспензии x в зависимости от плотности суспензии ρ_c выражается формулой:

$$x = \frac{(\rho_c - \rho) \rho_{ТВ}}{(\rho_{ТВ} - \rho) \rho_c}. \quad (3.25)$$

Плотность суспензии:

$$\rho_c = \frac{n + 1}{\frac{1}{\rho_{ТВ}} + \frac{n}{\rho}} = \frac{\rho (1 + n) \rho_{ТВ}}{\rho + \rho_{ТВ} n}. \quad (3.26)$$

Примеры решения задач

В этих формулах x — массовая концентрация твердой фазы в суспензии, кг/кг; ρ_0 — плотность суспензии, кг/м³; ρ — плотность жидкой фазы, кг/м³; $\rho_{\text{ТВ}}$ — плотность твердой фазы, кг/м³; n — масса жидкой фазы в суспензии на единицу массы твердой фазы (Т : Ж = 1 : n).

Примеры решения задач

Пример 3.12. Определить продолжительность фильтрования 10 дм³ жидкости через 1 м² фильтра, если при предварительном испытании фильтра с 1 м² было собрано фильтрата: 1 дм³ через 2,25 мин и 3 дм³ через 14,5 мин после начала фильтрования.

Примеры решения задач

Решение. По опытным данным находим экспериментальные константы K и C в уравнении фильтрования:

$$V^2 + 2VC = K\tau.$$

Для этого составляем два уравнения с двумя неизвестными:

$$1^2 + 2 \cdot 1 \cdot C = K \cdot 2,25; \quad 3^2 + 2 \cdot 3 \cdot C = K \cdot 14,5,$$

откуда $K = 0,77 \text{ дм}^6/(\text{м}^4 \cdot \text{мин})$ и $C = 0,37 \text{ дм}^3/\text{м}^2$.

Для определения искомой продолжительности фильтрования полученные значения констант и заданный объем фильтрата подставляем в уравнение фильтрования:

$$10^2 + 2 \cdot 10 \cdot 0,37 = 0,77\tau,$$

откуда $\tau = 140 \text{ мин}$ или $2 \text{ ч } 20 \text{ мин}$.

Примеры решения задач

Пример 3.13. В условиях предыдущего примера определить длительность промывки осадка, если количество промывной воды составляет $2,4 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ и промывка идет по линии основного фильтра.

Примеры решения задач

Решение. Пренебрегая различием в динамических коэффициентах вязкости фильтрата и промывной воды, будем считать, что скорость промывки равна скорости фильтрования в конечный момент.

Скорость фильтрования в конечный момент определим по уравнению (3.14) с использованием данных предыдущего примера:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+C)} = \frac{0,77}{2(10+0,37)} = 0,037 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Продолжительность промывки:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{(dV/d\tau)_{\text{пр}}} = \frac{2,4}{0,037} = 65 \text{ мин.}$$

Примеры решения задач

Пример 3.17. Необходимо отфильтровать суспензию на рамном фильтрпрессе и за 3 ч получить 6 м³ фильтрата. Опытное фильтрование этой суспензии на лабораторном фильтрпрессе при том же давлении и той же толщине слоя осадка показало, что константы фильтрования, отнесенные к 1 м² площади фильтра, имеют следующие значения: $K = 20,7 \cdot 10^{-4}$ м²/ч и $C = 1,45 \times 10^{-3}$ м³/м². Определить требуемые размеры фильтрпресса.

Решение. Находим по уравнению фильтрования (3.13) производительность 1 м² фильтрпресса:

$$V^2 + 2 \cdot 0,145 \cdot 10^{-2} V = 20,7 \cdot 10^{-4} \cdot 3,$$

откуда

$$\begin{aligned} V &= -0,145 \cdot 10^{-2} + \sqrt{(0,145 \cdot 10^{-2})^2 + 62,1 \cdot 10^{-4}} = \\ &= -0,145 \cdot 10^{-2} + 7,88 \cdot 10^{-2} = 7,73 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2 \end{aligned}$$

за цикл фильтрования, т. е. за 3 ч.

Следовательно, для заданной производительности необходима поверхность фильтрования:

$$F = 6/0,0773 = 77,5 \text{ м}^2.$$

По каталогу выбираем ближайший больший фильтрпресс с $F = 83 \text{ м}^2$, имеющий 42 рамы размером $1000 \times 1000 \text{ мм}$.

Контрольное задание № 4

3.16. В результате фильтрования водной суспензии с содержанием 20 % (масс.) твердой фазы собрано 15 м³ фильтрата. Влажность осадка 30%. Сколько получено осадка, считая на сухое вещество?

Резюме



Занятие 6

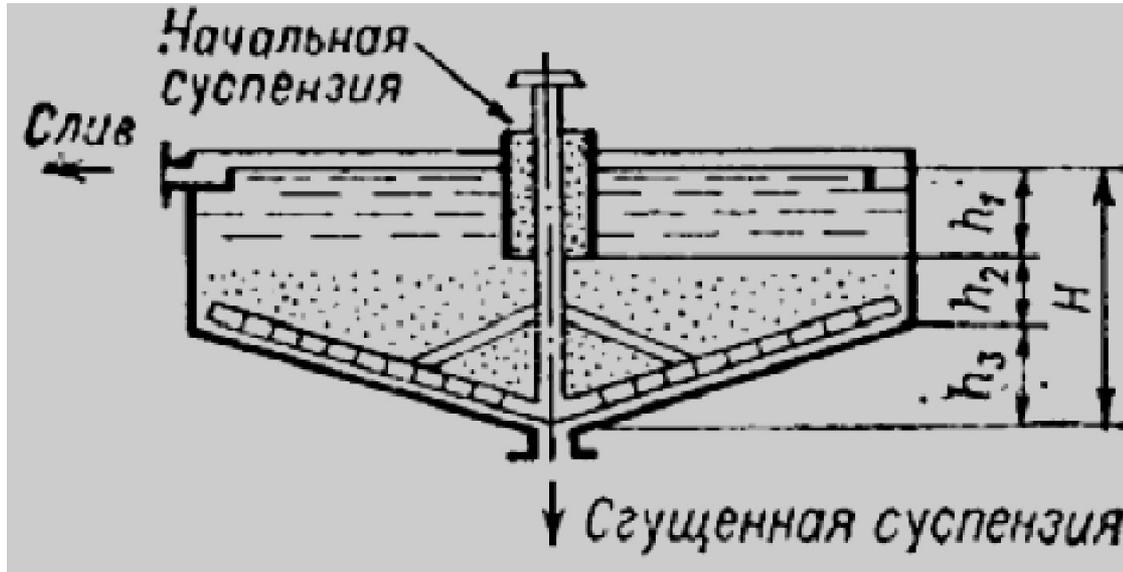
Изучение гравитационного осаждения



Повестка дня

- Расчёт отстойника
- Примеры решения задач
- Контрольное задание № 5

Расчёт отстойника



- Отстойник непрерывного действия

Расчёт отстойника

1. Скорость осаждения шарообразных частиц для ламинарного режима ($Re \leq 2; \xi = \frac{24}{Re}$)

$$\omega_{ос} = g d_{ч}^2 \frac{(\rho_{ч} - \rho_{с})}{18\mu_{ж}}, \quad (1.1)$$

где $d_{ч}$ – эквивалентный диаметр частицы, м; $\rho_{ч}$ – плотность частицы, кг/м³; $\mu_{ж}$ – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с.

Расчёт отстойника

Если плотности смешиваемых компонентов отличаются более чем на 30 %, то плотность смеси по формуле

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{x_c}{\rho_{\text{ч}}} + \frac{1-x_c}{\rho_{\text{ж}}}} \quad (1.2)$$

Объёмная доля твёрдой фазы в суспензии

$$\varphi = \frac{x_c \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}} . \quad (1.3)$$

Расчёт отстойника

2. Проверить режим осаждения, т. е. провести перерасчёт числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_{oc} d_{ч} \rho_c}{\mu_c} \quad (1.4)$$

Если число Рейнольдса меньше двух ($Re < 2$), то $\xi = \frac{24}{Re}$.

Расчёт отстойника

Если число Рейнольдса больше двух ($Re > 2$), то необходимо провести перерасчёт скорости осаждения

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4gd_{ч}(\rho_{ч} - \rho_{с})}{3\xi\rho_{с}}}, \quad (1.5)$$

где ξ – коэффициент сопротивления среды.

Для переходного режима ($2 < Re \leq 500$)

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}. \quad (1.6)$$

Расчёт отстойника

Для турбулентного режима ($Re > 500$)

$$\xi = 0,44. \quad (1.7)$$

Расчёт отстойника

3. Скорость стеснённого осаждения

$$\omega''_{oc} = \lambda \omega_{oc}, \quad (1.8)$$

где λ – поправочный коэффициент, учитывающий объёмную концентрацию φ (в долях),

$$\lambda = \frac{(1 - \varphi)^2}{(1 + 2,5\varphi + 7,35\varphi^2)}. \quad (1.9)$$

4. Массовая производительность по осветлённой жидкости

$$G_{\text{осв}} = G_c - G_{\text{ос}}, \quad (1.10)$$

где G_c – производительность по суспензии; $G_{\text{ос}}$ – производительность отстойника по сгущенной суспензии.

Производительность по твёрдой фазе, поступающей с суспензией

$$G_{\text{т.ф}} = G_c x_c. \quad (1.11)$$

Количество получаемого из суспензии влажного осадка

$$G_{\text{ос}} = \frac{G_{\text{т.ф}}}{1 - U}, \quad (1.12)$$

где U – влажность осадка.

Расчёт отстойника

5. Объёмная производительность отстойника по осветлённой жидкости

$$V_{\text{осв}} = F\omega''_{\text{ос}}, \quad (1.13)$$

где F – площадь осаждения отстойника, м^2

$$F = 1,3G_c \frac{\left(1 - \frac{x_c}{1-U}\right)}{\rho_c \omega''_{\text{ос}}}. \quad (1.14)$$

6. Чтобы устранить перемешивание жидкости у свободной поверхности, высоту зоны свободного осаждения в отстойнике принимают равной $h_1 = 0,45 \dots 0,75$ м, при этом наибольшее значение выбирают для более концентрированных суспензий.

Высота зоны осаждения, м

$$h_2 = \frac{m_{т.ф}}{\rho_{ч}}, \quad (1.15)$$

где $m_{т.ф}$ – масса твёрдой фазы, осаждающейся в единицу времени ($\tau = 1$ ч) на единице свободной поверхности отстойника, кг

$$m_{т.ф} = \frac{G_c x_c \tau}{F}. \quad (1.16)$$

Высоту зоны расположения лопастей мешалки определяют исходя из наклона лопастей, равного приблизительно 0,146 м на 1 м длины.

Высота этой зоны

$$h_3 = 0,146 \frac{D}{2} = 0,073D, \quad (1.17)$$

где D — диаметр отстойника, м

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}. \quad (1.18)$$

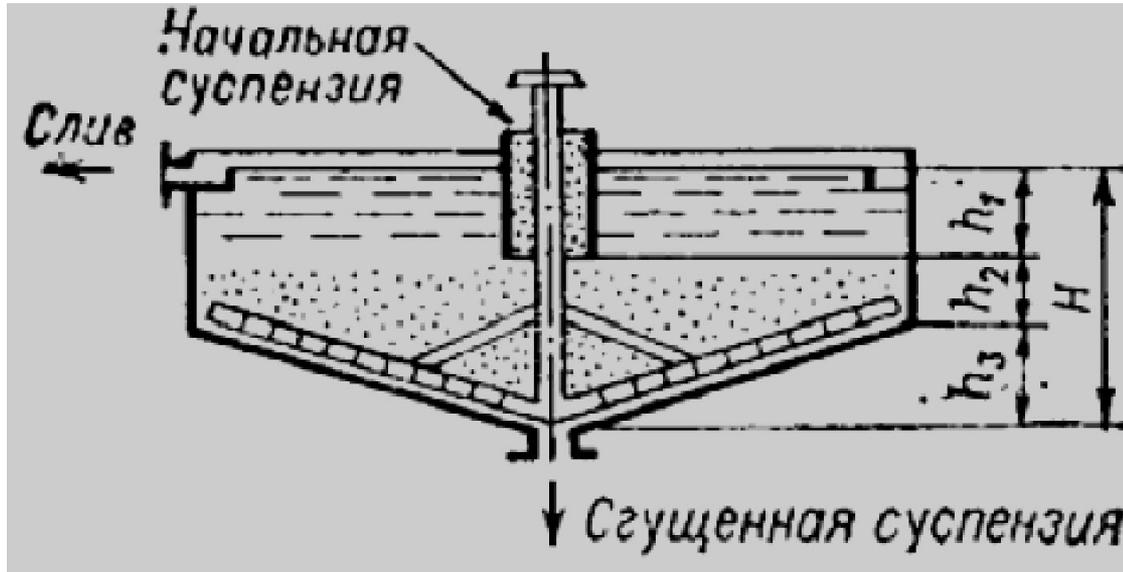
Общая высота отстойника, м

$$H = h_1 + h_2 + h_3. \quad (1.19)$$

Примеры решения задач

Пример 3.8. Определить диаметр отстойника (см. рис. 3.2) для непрерывного осаждения отмученного мела в воде. Производительность отстойника 80 т/ч начальной суспензии, содержащей 8% (масс.) CaCO_3 . Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, 35 мкм. Температура суспензии 15 °С. Влажность шлама 70%. Плотность мела 2710 кг/м³.

Примеры решения задач



- Отстойник непрерывного действия

Р е ш е н и е. Чтобы определить диаметр отстойника, надо вычислить необходимую площадь осаждения по формуле (3.9), для чего предварительно находят скорость осаждения:

$$\omega_{oc} = \frac{d^2 (\rho - \rho_c) g}{18\mu_c} = \frac{3,5^2 \cdot 10^{-10} (2710 - 1000) 9,81}{18 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,001 \text{ м/с,}$$

где $\mu_c = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ (табл. VI).

Проверим значение критерия Re:

$$Re = \frac{\omega_{oc} d \rho_c}{\mu_c} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,0307 < 0,2.$$

Действительная скорость осаждения:

$$\omega'_{oc} = 0,5 \cdot 0,001 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Площадь отстойника:

$$F_{oc} = \frac{G_H \left(1 - \frac{c_H}{c_K}\right)}{3600 \rho_c \omega'_{oc}} = \frac{80 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{8}{30}\right)}{3600 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ м}^2.$$

Диаметр отстойника:

$$D = \sqrt{32,5/0,785} = 6,4 \text{ м.}$$

Контрольное задание № 5

Задача. Рассчитать отстойник непрерывного действия для осаждения твёрдых частиц водной суспензии. Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, $d_{\text{ч}}$, мкм. Производительность отстойника по суспензии, $G_{\text{с}}$, кг/ч. Концентрация суспензии $x_{\text{с}}$. Плотность частиц $\rho_{\text{ч}}$, кг/м³. Температура суспензии t , °С. Влажность осадка U .

Контрольное задание № 5

Определить производительность отстойника по осветлённой жидкости $G_{\text{осв}}$, производительность по твердой фазе $G_{\text{т.ф}}$, площадь осаждения $F_{\text{ос}}$, диаметр отстойника D , общую высоту отстойника H , объёмную производительность $V_{\text{осв}}$. Представить схему отстойника непрерывного действия и описание принципа его работы.

Варианты

№ варианта	$d_{\text{ч}}$, МКМ	$G_{\text{с}}$, КГ/Ч	$x_{\text{с}}$	$\rho_{\text{ч}}$, КГ/М ³	t , ° С	U
1	80	30000	0,05	1300	30	0,7
2	75	30000	0,055	1275	40	0,6
3	70	25000	0,06	1250	25	0,65
4	65	25000	0,065	1225	45	0,7
5	60	20000	0,07	1200	20	0,6
6	55	20000	0,075	1175	30	0,65
7	50	15000	0,08	1150	40	0,7
8	45	15000	0,085	1175	35	0,6
9	40	10000	0,09	1150	40	0,65
10	35	10000	0,095	1175	45	0,6

Резюме



Занятие 7

Изучение осаждения под действием
центробежной силы



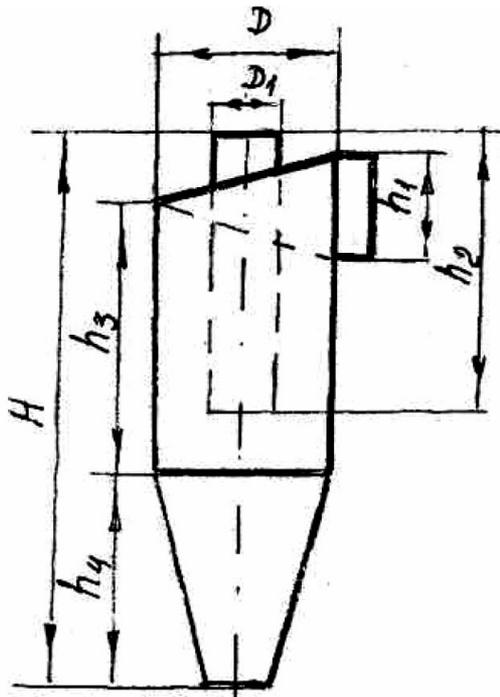
Повестка дня

- Расчёт циклона
- Примеры решения задач
- Контрольное задание № 6

Расчёт циклона

Для расчетов циклонов необходимы следующие исходные данные: количество очищаемого газа при рабочих условиях Q_p , м³/с; плотность газа при рабочих условиях ρ_p , кг/м³; динамическая вязкость газа при рабочей температуре μ_r , Па·с; дисперсный состав пыли (d_m , мкм); массовая концентрация пыли на входе $z_{вх}$ и эффективность очистки η ; плотность частиц пыли $\rho_{ч}$, кг/м³.

Расчёт циклона



- Отличительной особенностью циклонов является наклонный патрубок для поступающего газа.

Расчёт циклона

Широко применяются три типа этих циклонов:

1) с углом 24° (ЦН-24); этот тип обеспечивает повышенную производительность при наименьшем гидравлическом сопротивлении; предназначен для улавливания крупной пыли;

2) с углом 15° (ЦН-15); этот тип обеспечивает хорошую степень улавливания при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении;

3) с углом 11° (ЦН-11); этот тип обеспечивает повышенную эффективность и рекомендуется в качестве унифицированного пылеуловителя.

Таблица

Характеристика циклона	Размерность	Тип циклона		
		ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11
Диаметр выходной трубы, D_1	м	0,6D	0,6D	0,6D
Ширина входного патрубка, b	м	0,26D	0,26D	0,26D
Высота входного патрубка, h_1	м	1,11D	1,11D	1,11D
Высота входного патрубка, h_1 Высота цилиндрической части, h_3	м	2,11D	2.26D	2.08D
Высота конической части, h_4	м	1,75D	2D	2D
Общая высота циклона, H	м	4,26D	4,56D	4,38D
Коэффициент сопротивления, ξ		60	160	250

Расчёт циклона

Диаметр циклона определяется по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega_{ц}}} \quad \text{или} \quad D = \sqrt{\frac{G}{\rho_{г} \cdot 0,785 \cdot \omega_{ц}}},$$

где V - расход воздуха, м³/с;

$\rho_{г}$ - плотность воздуха, кг/м³;

$\omega_{ц}$ - условная скорость воздуха, м/с.

Расчёт циклона

Для нормализованных циклонов НИИОГАЗ типа ЦН значения $D_{\text{ц}}$ (в миллиметрах): 40, 60, 80, 100, 150, 200 и т. д. до 1000 через 50. Полная маркировка циклона НИИОГАЗ, например: ЦН-15-600, где 600 – диаметр корпуса в миллиметрах.

Расчёт циклона

Гидравлическое сопротивление циклона $\Delta P_{\text{ц}}$, Па, рассчитывают по формуле

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi_{\text{ц}} \frac{\rho w_{\text{ц}}^2}{2},$$

где $\xi_{\text{ц}}$ – коэффициент сопротивления циклона; ρ – плотность газа в циклоне при рабочих условиях, кг/м³; $w_{\text{ц}}$ – фиктивная скорость газа в циклоне, м/с.

Расчёт циклона

Условная скорость воздуха в цилиндрической части циклона определяется из уравнения:

$$\frac{\Delta P}{\rho_2} = \xi \frac{\omega_{\text{ц}}^2}{2}, \text{ откуда } \omega_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{\frac{\Delta P}{\rho_2} \cdot 2}{\xi}},$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление (в Па);
 ξ – коэффициент сопротивления циклона.

Расчёт циклона

- Коэффициент сопротивления ξ и другие параметры циклонов определяются по таблице.
- Плотность воздуха может быть определена по формуле

$$\rho_e = 1,293 \cdot \frac{T_0}{T_0 + t}, \quad \text{где } T_0 = 273^\circ \text{К.}$$

Расчёт циклона

Оптимальной областью использования циклонов типа ЦН по достигаемой производительности $V_{\text{ц}}$ и коэффициенту очистки η при приемлемых энергозатратах на очистку является область производительностей, при которых потери напора газа в циклоне $H_{\text{ц}}$, м, составляют от 50 до 100. При этом

$$H_{\text{ц}} = \frac{\Delta P_{\text{ц}}}{\rho g},$$

При подборе циклона типа ЦН (определение его расчетного диаметра $D_{\text{ц}}$) значение $H_{\text{ц}}$ рекомендуется принимать 75 м.

$$\frac{\Delta P_{\text{ц}}}{\rho} = 750$$

Расчёт циклона

Гидравлическое сопротивление циклона (н/м² или м.вод. ст.) определяем из уравнения:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_z \cdot \omega_{\text{ц}}^2}{2}.$$

Степень улавливания пыли η в циклоне зависит, помимо свойств пыли, от диаметра циклона, а также от

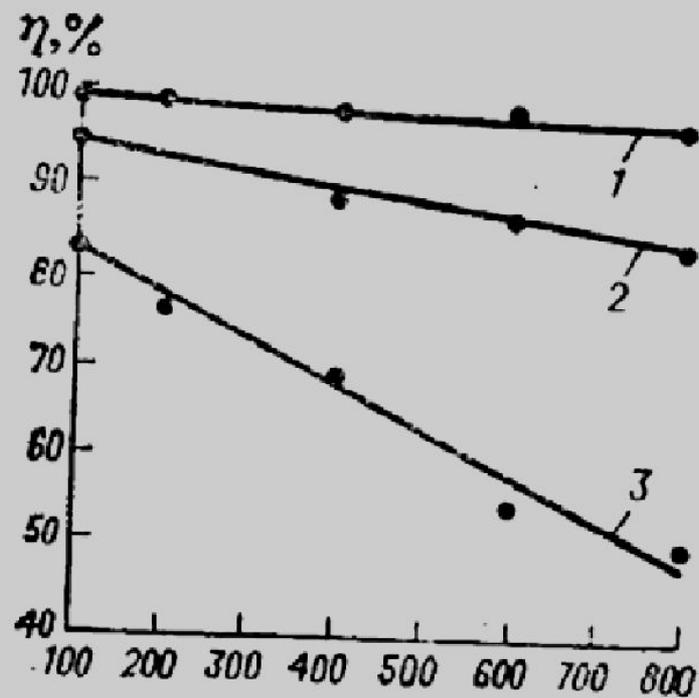


Рис. 3.4. Степень улавливания пыли в циклоне ЦН-15

Значения d (в мкм): 1 — 15; 2 — 10; 3 — 5.

скорости газа $\omega_{\text{ц}}$, т. е. от отношения $\Delta\rho/\rho$ в соответствии с формулой

На рис. 3.4 показана зависимость степени улавливания η от диаметра циклона D при различных диаметрах частиц пыли d . График составлен для пыли с плотностью 2300 кг/м^3 при $\Delta\rho/\rho = 740 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Примеры решения задач

Пример 3.10. Рассчитать циклон для выделения частиц сухого материала из воздуха, выходящего из распылительной сушилки, по следующим данным: наименьший размер частиц 80 мкм, расход воздуха 2000 кг/ч, температура 100 °С.

Примеры решения задач

Решение. Для улавливания частиц материала размером 80 мкм выбираем циклон типа ЦН-15.

Принимая $\Delta\rho/\rho_p = 740$, диаметр циклона найдем по формуле

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785\omega_{\text{ц}}}},$$

предварительно определив условную скорость газа в цилиндрической части циклона $\omega_{\text{ц}}$ из уравнения, $\Delta\rho/\rho_c = \zeta_0\omega_{\text{ц}}^2/2$, где $\zeta_0 = 160$ (стр. 97):

$$\omega_{\text{ц}} = \sqrt{740 \cdot 2/160} = 3,04 \text{ м/с.}$$

Примеры решения задач

Плотность воздуха: $\rho_r = 1,293 (273/373) = 0,95 \text{ кг/м}^3$. Следовательно,

$$D = \sqrt{\frac{2000}{0,95 \cdot 3600 \cdot 0,785 \cdot 3,04}} = 0,496 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр циклона равным 0,5 м.

Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta_0 (\rho_r \omega_{\text{ц}}^2) / 2 = 160 (0,95 \cdot 3,04^2) / 2 = 703 \text{ Па, т. е. } 72 \text{ мм вод. ст.}$$

Примеры решения задач

Для нормализованных циклонов НИИОГАЗ типа ЦН значения $D_{\text{ц}}$ (в миллиметрах): 40, 60, 80, 100, 150, 200 и т. д. до 1000 через 50. Полная маркировка циклона НИИОГАЗ, например: ЦН-15-600, где 600 – диаметр корпуса в миллиметрах.

Контрольное задание № 6

Рассчитать циклон для выделения частиц сухого материала из воздуха, выходящего из распылительной сушилки , по следующим данным:

Контрольное задание № 6

Величины	Размерность	По последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход воздуха, G	кг/с	0,5	0,7	0,6	0,66	0,58	0,75	0,64	0,8	0,83	0,72
Наименьший диаметр частиц, $d \cdot 10^{-6}$	м	80	80	80	100	100	100	90	90	90	100
Отношение, $\Delta P / \rho g$	н · м/кг	720	740	730	700	710	750	740	720	730	750
Температура воздуха, t	°C	100	120	110	100	120	110	100	100	110	120

Резюме

- Отношение гидравлического сопротивления к плотности газа является критерием отражающим соотношение диаметра циклона и условной скорости газового потока.



