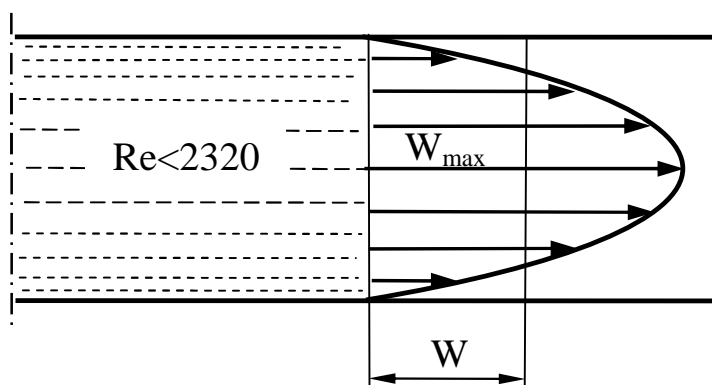


А.С. Кувшинова, А.Г. Липин, Н.А. Маркичев, В.Н. Исаев

**ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ПО КУРСУ “ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ”**

Учебное пособие



Иваново

2008

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Ивановский государственный химико-технологический университет

А.С. Кувшинова, А.Г. Липин, Н.А.Маркичев, В.Н. Исаев

**ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ПО КУРСУ “ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ”**

Учебное пособие

Иваново 2008

УДК 66.021(07)

Основные определения и закономерности по курсу “Процессы и аппараты химической технологии”: Учеб. пособие / А.С. Кувшинова [и др.]; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2008, 96с. - ISBN 978-5-9616-0280-7

В учебном пособии рассматриваются основные определения и закономерности по следующим разделам курса “Процессы и аппараты химической технологии”: гидравлика, перемещение жидкостей, сжатие и перемещение газов, гидромеханические, тепловые и массообменные процессы. По каждому из перечисленных разделов представлены вопросы для самоконтроля.

Пособие позволяет закрепить основные знания и самостоятельно подготовиться к тестовому контролю по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии».

Предназначено для студентов-технологов дневного и заочного отделений, изучающих курс «Процессы и аппараты химической технологии», может быть полезно студентам всех специальностей.

Табл. 6. Библиогр.: 12 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ГОУ ВПО Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра химии Ивановской государственной текстильной академии; доктор технических наук, профессор Е.Г.Авдюнин (Ивановский государственный энергетический университет).

ISBN 978-5-9616-0280-7

© Кувшинова А.С., Липин А.Г.,
Маркичев Н.А., Исаев В.Н., 2008
ГОУ ВПО Ивановский государственный
химико-технологический
университет

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Общие понятия и закономерности курса “Процессы и аппараты химической технологии”	4
Вопросы для самоконтроля.....	9
2. Гидравлика	9
2.1. Основные свойства жидкостей.....	10
2.2. Гидростатика.....	11
2.3. Гидродинамика.....	13
Вопросы для самоконтроля.....	19
3. Перемещение жидкостей	19
Вопросы для самоконтроля.....	22
4. Сжатие и перемещение газов	22
Вопросы для самоконтроля.....	25
5. Гидромеханические процессы	25
5.1. Методы разделения неоднородных систем.....	26
5.2. Процессы образования неоднородных систем.....	36
Вопросы для самоконтроля.....	43
6. Тепловые процессы	44
6.1. Способы передачи теплоты.....	44
6.2. Нагревание (охлаждение) жидкостей и газов.....	52
6.3. Искусственное охлаждение.....	54
6.4. Конденсация паров.....	56
6.5. Выпаривание.....	56
Вопросы для самоконтроля.....	61
7. Массообменные процессы	62
7.1. Основы массопередачи.....	62
7.2. Абсорбция.....	68
7.3. Перегонка.....	70
7.4. Экстракция.....	74
7.5. Адсорбция.....	76
7.6. Ионный обмен.....	79
7.7. Сушка.....	81
7.8. Кристаллизация.....	86
7.9. Выщелачивание.....	89
7.10. Мембранные методы разделения.....	90
Вопросы для самоконтроля.....	92
Список библиографических источников	95

ВВЕДЕНИЕ

Технология получения самых разнообразных химических продуктов и материалов (кислот, щелочей, солей) включает однотипные процессы, характеризующие общими закономерностями. Эти процессы в различных производствах проводятся в аналогичных по принципу действия аппаратах. Таким образом, процессы и аппараты, общие для различных отраслей химической технологии, называются основными процессами и аппаратами.

Цель науки о процессах и аппаратах химической технологии состоит в анализе элементарных технологических приемов (процессов) и функционирования типичных аппаратов как в отдельности, так и в различных сочетаниях друг с другом.

Изучение теории основных процессов, принципов устройства и методов расчета аппаратов составляет **предмет** процессов и аппаратов – науки, определяющей условия практического применения законов естественных наук (физики, химии, механики, термодинамики и др.) для наиболее эффективного проведения разнообразных технологических процессов.

Наука о процессах и аппаратах позволяет решать следующие **задачи**:

1. Производить усовершенствование существующих и разработку новых технологических приемов, создавать новые методики их расчета.
2. Изучать закономерности и математическое описание процессов и их совокупностей, разрабатывать расчетные методы перехода от процесса в лабораторных условиях к промышленным, т.е. перенос данных, полученных на модели, к объекту натуральной величины (моделирование).
3. Выбрать рациональные технологические режимы эксплуатации действующих производств.
4. При проектировании новых производств разрабатывать высокоэффективные и малоотходные технологические схемы и выбирать наиболее рациональные типы аппаратов.

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ КУРСА “ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ”

Процесс – это любое последовательное изменение характеристик предмета, явления, системы в природе, технике или обществе, направленное на достижение определенного результата.

Существуют следующие виды процессов:

- **естественные** – процессы, протекающие в природе самопроизвольно без воздействия человека. Характеризуются большой протяженностью во времени;
- **производственные** (технологические) – осуществляются с целью переработки сырья в полуфабрикаты или продукты потребления. Такие процессы организуются и контролируются человеком, они мелкомасштабны и состоят из большого числа последовательных стадий.

Технология - наука, занимающаяся изучением производственных процессов.

Классификация процессов химической технологии.

I. В зависимости от законов, определяющих скорость их протекания:

1. Гидромеханические процессы, скорость которых определяется законами гидродинамики – науки о движении жидкостей и газов. К этим процессам относятся: перемещение жидкостей, сжатие и перемещение газов, отстаивание (разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле сил тяжести), центрифугирование (в поле центробежных сил), фильтрование (под действием разности давлений при движении через пористый слой) и перемешивание жидкостей.

2. Тепловые процессы, скорость которых определяется законами теплопередачи – науки о способах распространения тепла. Такими процессами являются нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсация паров.

3. Массообменные (диффузионные) процессы, характеризуются переносом одного или нескольких компонентов исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз и описываются законами массопередачи. К этой группе процессов относятся абсорбция, перегонка, ректификация, экстракция из растворов, растворение и экстракция из пористых твердых тел, кристаллизация, адсорбция и сушка.

4. Химические (реакционные) процессы, определяются законами химической кинетики. Химические реакции сопровождаются обычно переносом массы и энергии, соответственно скорость химических процессов зависит от гидродинамических условий. Скорость реакций подчиняется законам макрокинетики.

5. Механические процессы, описываются законами механики твердых тел. К ним относятся измельчение, транспортирование, сортировка (классификация) и смешение твердых веществ. Также к механическим процессам можно отнести процессы переработки химических продуктов в изделия – прессование, литье, экструзия и др.

II. По способу организации:

1. Периодические (все стадии протекают в одном месте, но в разное время).

2. Непрерывные (все стадии протекают одновременно, но разобщены в пространстве).

3. Комбинированные (к ним относятся непрерывные процессы, отдельные стадии которых проводятся периодически или наоборот).

III. В зависимости от изменения параметров (скоростей, температур, концентраций и др.) во времени:

1. Установившиеся (стационарные) – параметры постоянны во времени.

2. Неустановившиеся (нестационарные) – параметры переменны во времени.

По распределению времен пребывания частиц среды, различают следующие теоретические модели аппаратов непрерывного действия:

– **идеального вытеснения ИВ** (все частицы равномерно распределены по площади поперечного сечения аппарата и действуют при движении подобно твердому поршню, время пребывания частиц одинаково);

- **идеального смешения ИС** (частицы сразу же полностью перемешиваются, т.е. равномерно распределяются в объеме аппарата, во всех точках объема мгновенно выравниваются значения характеризующих параметров, время пребывания частиц неодинаково);
- **промежуточного типа** (время пребывания более равномерно, чем в ИС, но никогда не выравнивается, как в ИВ).

Основные цели расчета процессов и аппаратов:

- 1) определение условий предельного, или равновесного, состояния системы;
- 2) вычисление расходов исходных материалов и количеств получаемых продуктов, количеств потребной энергии (тепла) и расхода теплоносителей;
- 3) определение оптимальных режимов работы и соответствующей им рабочей поверхности или рабочего объема аппаратов;
- 4) вычисление основных размеров аппаратов.

Последовательность расчетов:

- расчет и анализ статики процесса (рассмотрение данных о равновесии), исходя из чего определяют направление протекания и возможные пределы осуществления процесса;
- нахождение предельных значений параметров процесса для вычисления его движущей силы;
- составление материальных и энергетических балансов;
- расчет кинетики процесса, определяющей скорость его протекания;
- определение рабочей поверхности или объема аппарата.

Материальный и тепловой балансы – законы сохранения массы и энергии для физико-химических процессов.

Материальный баланс - количество поступающих веществ $\sum G_n$ должно быть равно количеству веществ $\sum G_k$, получаемых в результате проведения процесса, в практических условиях неизбежны необратимые потери веществ $\sum G_p$: $\sum G_n = \sum G_k + \sum G_p$.

Тепловой баланс – количество теплоты $\sum Q_n$, введенной в процесс, равно количеству теплоты $\sum Q_k$, выведенной из процесса, включая необратимые потери в окружающую среду $\sum Q_p$: $\sum Q_n = \sum Q_k + \sum Q_p$.

Движущая сила (разность потенциалов) - для гидромеханических процессов определяется разностью давлений, создаваемой с помощью насосов, компрессорных машин, за счет различия уровней жидкостей или плотностей; для теплообменных – разностью температур поверхностей стенок (при теплопроводности), поверхности стенки и жидкости, или наоборот (при теплоотдаче), теплоносителей, омывающих разделяющую их стенку (при теплопередаче); для массообменных разностью между рабочей и равновесной, или наоборот, концентрациями распределяемого компонента в данной фазе.

Основное уравнение процесса в общем виде:

$$M = KA U \tau,$$

где M – количество перенесенного вещества или тепла; U - движущая сила; A – величина, к которой относят интенсивность процесса (рабочая поверхность,

рабочий объем); K – коэффициент скорости процесса, учитывает все отклонения реального процесса от данной упрощенной зависимости, отражает влияние всех факторов, не учтенных остальными величинами, является мерой интенсивности процесса.

Интенсивность процесса ($M/A\tau$) - результат, отнесенный к единице времени и единице величины A :

$$\frac{M}{A\tau} = KU.$$

Плотность потока – количество рассматриваемой субстанции M (массы вещества, теплоты и т.д.), проходящей в единицу времени τ через единицу площади F произвольной поверхности

$$q = \frac{M}{\tau F},$$

плотность любого потока q , как правило, прямо пропорциональна градиенту движущей силы процесса $q_{\text{grad}} U$:

$$q = -Kq_{\text{grad}} U.$$

Моделирование – метод исследования, при котором вместо непосредственного интересующего нас процесса или явления, протекающего в каком-то объекте (натуре), изучается соответствующий процесс на другом объекте (модели).

Основные задачи моделирования:

- 1) исследование новых процессов;
- 2) проектирование новых производств;
- 3) оптимизация отдельных аппаратов и технологических схем;
- 4) выявление резервов мощности и отыскание наиболее эффективных путей модернизации производств;
- 5) оптимальное планирование действующих производств;
- 6) разработка автоматизированных систем управления проектируемыми и действующими производствами.

Физическое моделирование – исследуемый объект (модель) отличается от природы масштабom, меняются используемые вещества, температурные условия и т.п., однако физическая природа явления остается неизменной.

Математическое моделирование - моделирующий процесс может отличаться от моделируемого по физической природе. Процесс исследуется путем решения систем уравнений, описывающих его. При этом выясняется влияние на него различных технологических параметров: температуры, давления, концентрации. Исследования проводятся на теоретической или идеальной физической модели.

Математическая модель – приближенное описание какого-либо явления или процесса внешнего мира, выраженное с помощью математической символики.

Подобие процессов – основа теории подобия, являющейся теоретической базой курса процессов и аппаратов. Процессы подобны между собой только в том случае, если соблюдается подобие: геометрическое и временное, полей

физических величин, начальных и граничных условий. Подобие характеризуется константами и инвариантами подобия:

а) **константа подобия** $k_1 = \frac{l_1}{l'_1} = \frac{l_2}{l'_2}$ - безразмерный масштабный множитель,

выражающий отношение однородных сходственных величин подобных систем;

б) **инвариант подобия** $inv = \frac{l_1}{l_2} = \frac{l'_1}{l'_2}$ - отношение сходственных величин в

пределах каждой подобной системы.

Симплекс подобия - инвариант подобия, выраженный отношением двух однородных физических величин $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$.

Критерий подобия - инвариант подобия, выраженный отношением двух разнородных физических величин, характеризующих изучаемый процесс, т.е. представляет собой безразмерный комплекс, например, критерий Рейнольдса

$Re = \frac{w d \rho}{\mu}$. Согласно основным теоремам подобия процессы будут подобны,

если они имеют одинаковые критерии подобия и описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями. Эти уравнения путем метода теории подобия преобразуются в обобщенные критериальные уравнения, явный вид которых находится экспериментальным путем.

Процесс термодинамический – любое изменение термодинамического состояния системы (основные виды термодинамических процессов представлены в табл.1).

Таблица 1

Основные термодинамические процессы

Название процесса	Название и уравнение кривой процесса	Показатель степени уравнения кривой процесса	Краткая характеристика процесса
Политропный	Политропа $pV^m = \text{const}$	m	Протекает при изменении температуры, давления и объема системы
Изохорный	Изохора $V = \text{const}$	$m = \pm \infty$	Протекает при постоянном объеме системы
Изобарный	Изобара $p = \text{const}$	$m = 0$	Протекает при постоянном давлении
Изотермический	Изотерма $pV = \text{const}$	$m = 1$	Протекает при постоянной температуре
Адиабатный	Адиабата $pV^k = \text{const}$	$m = k$ $k = \frac{c_p}{c_v}$	Протекает без теплообмена с окружающей средой при постоянной энтропии

Субстанциональная производная – (от слова субстанция, что означает материя) – полная производная, характеризующая изменение величины, как во времени, так и в пространстве, состоит из локального изменения величины во времени и конвективного ее изменения по всем трем координатам:

$$\frac{D\varphi}{d\tau} = \frac{\partial\varphi}{\partial\tau} + w_x \frac{\partial\varphi}{\partial x} + w_y \frac{\partial\varphi}{\partial y} + w_z \frac{\partial\varphi}{\partial z} .$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что является целью, предметом и задачами дисциплины “Процессы и аппараты химической технологии”?
2. Дайте определение процесса и технологии.
3. Как классифицируются основные процессы химической технологии (в зависимости от законов, определяющих скорость их протекания; по способу организации; в зависимости от изменения параметров во времени)?
4. Сформулируйте общие принципы расчета процессов и аппаратов.
5. Запишите материальный и энергетический балансы процесса.
6. Что такое движущая сила, скорость и интенсивность процесса?
7. Представьте основное уравнение процесса в общем виде.
8. Перечислите основные задачи моделирования процессов.
9. Дайте определения физическому и математическому моделированию.
10. Что называют коэффициентом подобия, инвариантом, симплексом и критерием подобия?
11. Перечислите основные термодинамические процессы и дайте их краткую характеристику.

2. ГИДРАВЛИКА

Законы гидромеханики и их практическое применение изучаются в гидравлике, основными разделами которой являются:

гидростатика – рассматривает законы равновесия в состоянии покоя;

гидродинамика – рассматривает законы движения жидкостей и газов.

Жидкости – все вещества, обладающие текучестью при приложении к ним самых незначительных сил сдвига. В гидравлике под понятием жидкость принято понимать жидкости, газы или пары, потому что законы движения жидкостей и газов практически одинаковы, если их скорости значительно ниже скорости звука.

Идеальная жидкость - жидкость, абсолютно несжимаемая под действием давления, не изменяет плотности при изменении температуры и не обладает вязкостью.

Реальные жидкости разделяются:

- **на капельные** (практически несжимаемы и обладают очень малым коэффициентом объемного расширения);
- **упругие** – газы или пары (сильно изменяется объем при изменении температуры или давления).

2.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Плотность - масса единицы объема жидкости:

$$[\rho] = \left[\frac{m}{V} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right],$$

где m – масса жидкости; V – объем жидкости.

Удельный вес - вес единицы объема жидкости:

$$[\gamma] = \left[\frac{G}{V} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \right],$$

$$m = \frac{G}{g} \rightarrow \gamma = \rho g,$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Удельный объем - объем, занимаемый единицей массы газа, или величина, обратная плотности:

$$[\nu] = \left[\frac{V}{M} \right] = \left[\frac{1}{\rho} \right] = \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right].$$

Коэффициент объемного расширения – относительное изменение объема жидкости (газа) при нагревании или охлаждении на 1 градус, характеризует интенсивность теплового расширения:

$$[\beta] = \left[\frac{\Delta V}{V} \frac{1}{T} \right] = \left[\frac{1}{\text{К}} \right].$$

Давление – сила F , действующая на единицу площади S внутри объема покоящейся жидкости и направленная по нормали к ней:

$$[P] = \left[\frac{F}{S} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па}].$$

Давление гидростатическое в точке – предел отношения силы гидростатического давления ΔP к элементарной площадке ΔS при $\Delta S \rightarrow 0$:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta S} \right).$$

Давление атмосферное (барометрическое) – гидростатическое давление атмосферы $p_{\text{атм}}$, действующее у поверхности земли, измеряется барометрами; нормальное атмосферное давление равно давлению столба ртути высотой 760 мм при 0°C и ускорении силы тяжести $9,81\text{м}/\text{с}^2$, такое давление получило название физической атмосферы: 1 атмосфера физическая (1атм) = 760 мм рт. ст. = 10,33 м вод. ст. = $1,033 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 10330 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 101300 \text{ Н}/\text{м}^2$.

Давление абсолютное - давление $p_{\text{абс}}$, измеренное по отношению к абсолютному вакууму.

Давление избыточное - давление $p_{\text{изб}}$, разность между абсолютным и атмосферным давлением, если давление в объеме превышает атмосферное:

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{ат}},$$

измеряется манометрами, часто градуированными в технических атмосферах: 1 атмосфера техническая (1 ат) = 735,6 мм рт. ст. = 10 м вод. ст. = 1 кгс/см² = 10000 кгс/м² = 98100 Н/м² = 10⁵ бар.

Вакуумметрическое давление – разность между атмосферным и абсолютным давлением, если давление в объеме ниже атмосферного:

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{ат}} - P_{\text{абс}},$$

измеряется вакуумметрами, чаще всего в мм рт. ст.

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу, все реальные жидкости обладают определенной вязкостью.

Закон трения Ньютона: напряжение внутреннего трения $\tau_{\text{тр}}$, возникающее между слоями жидкости при ее течении, прямо пропорционально градиенту скорости $\frac{du}{dn}$:

$$\tau_{\text{тр}} = -\mu \frac{du}{dn},$$

знак “-” указывает на то, что касательное напряжение тормозит слой, движущийся с относительно большей скоростью.

Динамический коэффициент вязкости:

$$[\mu] = \left[\frac{\tau_{\text{тр}}}{\frac{du}{dn}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па} \cdot \text{с}].$$

Кинематический коэффициент вязкости:

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right].$$

Поверхностное натяжение – работа, требуемая для образования единицы новой поверхности, σ :

$$[\sigma] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right].$$

2.2. ГИДРОСТАТИКА

Гидростатика – раздел гидравлики, в котором рассматриваются законы равновесия жидкостей и газов в состоянии покоя.

Дифференциальные уравнения Л.Эйлера – выражают связь между массовыми (объемными) и поверхностными силами. Они показывают, что изменение гидростатического давления в объеме неподвижной жидкости обусловлено действием массовых сил:

$$\rho X - \frac{\partial p}{\partial x} = 0;$$

$$\rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} = 0;$$

$$\rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} = 0,$$

где X, Y, Z – проекции ускорения силы тяжести на оси координат; $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z}$ – изменение гидростатического давления в данной точке в направлении осей x, y, z , соответственно.

Основное уравнение гидростатики – интеграл дифференциальных уравнений Эйлера показывающий, что для любой точки покоящейся жидкости сумма пьезометрического $\frac{p}{\rho g}$ и геометрического Z напоров есть величина постоянная, т.е. удельная потенциальная энергия во всех точках покоящейся жидкости постоянна:

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_0}{\rho g} + z_0 = \frac{p}{\rho g} + z.$$

Закон Паскаля: давление, создаваемое в любой точке покоящейся несжимаемой жидкости, передается одинаково всем точкам ее объема:

$$p = p_0 + (z - z_0)\rho g.$$

Практические приложения основного уравнения гидростатики:

1) сила давления на дно аппарата определяется по высоте уровня жидкости в аппарате h :

$$F = (p_0 + \rho gh)F;$$

2) сила давления жидкости на боковую стенку определяется по глубине погружения центра тяжести стенки h_c :

$$F = (p_0 + \rho gh_c)F;$$

3) уровни жидкости в сообщающихся сосудах устанавливаются обратно пропорционально плотностям находящихся в них жидкостей:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1};$$

4) сила давления грузового цилиндра гидравлического пресса $F_{гр}$ прямо пропорциональна отношению квадратов диаметров цилиндров:

$$F_{гр} = F_{раб} \frac{D^2}{d^2},$$

где $F_{раб}$ – сила, приложенная к рабочему цилиндру;

5) при пневматическом измерении количества жидкости в резервуаре ее уровень z_0 и объем V определяются следующим образом:

$$z_0 = \frac{p - p_0}{\rho g};$$

$$V = Sz_0,$$

где S – площадь поперечного сечения резервуара; p - давление сжатого воздуха (сопротивление столба жидкости); p_0 - давление над жидкостью в резервуаре.

2.3. ГИДРОДИНАМИКА

Гидродинамика - раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкостей и газов.

Движущей силой при течении жидкостей является разность давлений, создаваемая насосами или компрессорами, либо разность уровней или плотностей жидкости.

Различают следующие **задачи гидродинамики**:

- **внутренняя задача** связана с анализом движения жидкостей внутри труб и каналов;
- **внешняя задача** связана с изучением закономерностей обтекания жидкостями различных тел;
- **смешанная задача** рассматривает движение жидкостей или газов через пористый слой.

Расход жидкости – количество жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени. Объемный расход Q имеет единицы измерения $\text{м}^3/\text{с}$, массовый G – $\text{кг}/\text{с}$.

Истинная (локальная скорость) – скорость движения в данной точке, в разных точках сечения потока неодинакова.

Средняя (фиктивная) скорость – отношение объемного расхода жидкости к площади поперечного сечения потока:

$$w = \frac{Q}{S}.$$

Уравнение расхода:

- для объемного расхода $Q = wS$;
- массового расхода $G = \rho wS$,

где ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; w – средняя скорость, $\text{м}/\text{с}$.

Для круглого трубопровода и несжимаемой жидкости объемный расход рассчитывается по уравнению:

$$Q = wS = w \frac{\pi d^2}{4} = w \cdot 0,785d^2.$$

Сплошной (неразрывный) поток жидкости – поток, в котором отсутствуют пустоты, движение происходит с непрерывным распространением массы; масса жидкости, проходящая через любое сечение, согласно закону сохранения массы, есть величина постоянная.

Уравнение неразрывности (сплошности) потока в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0 \quad - \quad \text{дифференциальное уравнение}$$

неразрывности потока для неустановившегося движения сжимаемой жидкости;

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0 \quad - \quad \text{дифференциальное уравнение неразрывности}$$

потока для установившегося движения сжимаемой жидкости;

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0 \quad - \quad \text{дифференциальное уравнение неразрывности потока}$$

для установившегося движения несжимаемой жидкости,

где $\frac{\partial w_x}{\partial x}$; $\frac{\partial w_y}{\partial y}$; $\frac{\partial w_z}{\partial z}$ - изменение скоростей вдоль осей координат x,y,z.

Уравнение неразрывности потока в интегральной форме - уравнение постоянства расхода:

$$G = \rho_1 w_1 S_1 = \rho_2 w_2 S_2 = \text{const.}$$

Скорости капельной жидкости в различных поперечных сечениях трубопровода обратно пропорциональны площадям этих сечений:

$$w_1 S_1 = w_2 S_2 \quad \text{или} \quad \frac{w_1}{w_2} = \frac{F_2}{F_1}.$$

Гидравлический радиус – отношение площади S сечения потока к смоченному периметру П, характеризует каналы некруглого сечения:

$$r_r = \frac{S}{\Pi}.$$

Эквивалентный диаметр – геометрическая характеристика канала некруглого сечения, равен отношению учетверенной площади живого сечения, через которое протекает жидкость, к смоченному периметру:

$$d_{\text{экр}} = \frac{4S}{\Pi}.$$

Движение жидкости – перемещение жидкости по трубопроводам, аппаратам, каналам и т.д. Различают установившееся и неустановившееся, свободное и вынужденное, напорное и безнапорное движения. При **установившемся движении** поля давлений и скоростей не изменяются во времени, а при **неустановившемся** – изменяются. **Свободное движение** возникает за счет разности плотностей в различных точках объема жидкости. **Вынужденное движение** вызывается внешними силами, создаваемыми насосами, мешалками, центрифугами и др. При **напорном течении** жидкость заполняет все сечение трубопровода, при **безнапорном** – только часть сечения заполнена жидкостью, имеется свободная поверхность.

Различают **ламинарный** и **турбулентный** режимы движения жидкостей.

Критерий Рейнольдса - единый безразмерный комплекс, по численному значению которого можно судить о режимах течения жидкости, является мерой

соотношения между силами инерции и силами вязкости. Переход от ламинарного режима к турбулентному осуществляется тем легче, чем больше массовая скорость жидкости ρw , чем больше диаметр трубы и чем меньше вязкость жидкости:

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}.$$

Ламинарный режим движения – все частицы жидкости перемещаются равномерно по параллельным траекториям. Наблюдается при значениях критерия Рейнольдса меньше критического $Re_{кр}$ ($Re < Re_{кр} = 2320$) в прямых и гладких трубах постоянного сечения.

Турбулентный режим движения - неупорядоченное движение, при котором отдельные частицы жидкости движутся по замкнутым хаотическим траекториям, в то время как вся масса жидкости перемещается в одном направлении. В турбулентном потоке происходят пульсации скоростей, под действием пульсаций частицы жидкости получают поперечное перемещение, что приводит к интенсивному перемешиванию потока по сечению. При этом сильно возрастают затраты энергии на перемещение по сравнению с ламинарным режимом. Наблюдается при значениях критерия Рейнольдса больше критического ($Re > Re_{кр} = 2320$) в прямых и гладких трубах постоянного сечения. В интервале значений $2320 < Re < 10000$ устанавливается **неустойчиво турбулентный или переходный режим**.

Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера – частный случай закона сохранения энергии для потока идеальной жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} - \rho X + \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= 0; \\ \frac{\partial p}{\partial y} - \rho Y + \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= 0; \\ \frac{\partial p}{\partial z} - \rho Z + \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= 0, \end{aligned}$$

где $\frac{\partial w_x}{\partial \tau}$; $\frac{\partial w_y}{\partial \tau}$; $\frac{\partial w_z}{\partial \tau}$ - проекции ускорения на оси координат.

В движущейся жидкости изменение давления происходит благодаря действию объемных сил, силы тяжести и силы инерции. Примером может служить явление **гидравлического удара** – при внезапном закрытии крана в трубе резко возрастает давление, происходит торможение жидкости, и энергия движения переходит в энергию давления, что может привести к разрыву трубопровода.

Интегральным решением дифференциальных уравнений Эйлера является **уравнение Д.Бернулли** – для любого сечения потока при установившемся движении идеальной жидкости сумма геометрического z , пьезометрического

$\frac{p}{\rho g}$ и скоростного $\frac{w^2}{2g}$ напоров (высот) есть величина постоянная, равная

суммарному (полному) гидродинамическому напору; данное уравнение выражает закон сохранения энергии - для движущейся среды любого сечения потока при установившемся движении идеальной жидкости сумма удельной (отнесенной к 1Н жидкости) потенциальной $z + \frac{P}{\rho g}$ и кинетической $\frac{w^2}{2g}$ энергий есть величина постоянная:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} = \text{const},$$

или для двух поперечных сечений потока

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

Дифференциальные уравнения движения реальной жидкости Навье – Стокса – выражают связь между массовыми, поверхностными, инерционными и вязкостными силами в потоке, характеризуют закон сохранения энергии при движении вязкой жидкости:

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \rho X + \rho \frac{dw_x}{d\tau} - \mu \nabla^2 w_x = 0;$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} - \rho Y + \rho \frac{dw_y}{d\tau} - \mu \nabla^2 w_y = 0;$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \rho Z + \rho \frac{dw_z}{d\tau} - \mu \nabla^2 w_z = 0,$$

где $\nabla^2 w_x$, $\nabla^2 w_y$, $\nabla^2 w_z$ - операторы Лапласа, представляют собой суммы вторых производных по осям координат.

Согласно второй теореме подобия решение уравнений Навье – Стокса можно представить в виде **обобщенного критериального уравнения гидродинамики**:

$$Eu = f(Re, Fr, Ho, \Gamma);$$

для установившегося движения реальной жидкости

$$Eu = f(Re, Fr, \Gamma);$$

где Eu – критерий Эйлера, определяемый критерий; Re, Fr, Ho - критерии Рейнольдса, Фруда, гомотронности, являются определяющими критериями; Γ – симплекс геометрического подобия.

В виде степенной зависимости критериальное уравнение принимает вид:

$$Eu = A Re^m Fr^n Ho^p \Gamma^q,$$

где A, m, n, p, q – постоянные, определяемые опытным путем для группы подобных явлений.

Основные критерии гидродинамического подобия представлены в табл. 2.

Основные критерии гидродинамического подобия

Название и формула критерия	Физический смысл критерия
Гомохронности $Ho = \frac{w\tau}{l}$	Характеризует изменения скорости потока в пространстве и времени при неустановившемся движении жидкости
Рейнольдса $Re = \frac{wl\rho}{\mu}$	Мера отношения сил инерции и сил вязкого трения в потоке; характеризует гидродинамический режим движения жидкости
Фруда $Fr = \frac{w^2}{g \cdot l}$	Мера отношения сил инерции и сил тяжести в потоке
Эйлера $Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}$	Мера отношения сил давления и сил инерции в потоке

Примечание. Где l – линейный размер, м.

Истечение жидкости: различают истечение при постоянном напоре (установившееся движение) и при переменном (неустановившееся движение).

Объемный расход жидкости в случае истечения **при постоянном напоре** ($H = \text{const}$) рассчитывается по формуле:

$$Q = \alpha f \sqrt{2gH},$$

где $\alpha = \varepsilon_{сж} \varphi_{ск}$ – коэффициент расхода при истечении, учитывает уменьшение расхода жидкости за счет сжатия струи (оценивается коэффициентом сжатия струи $\varepsilon_{сж} = \frac{f}{f_0}$) и преодоление гидравлических сопротивлений (оценивается коэффициентом скорости - $\varphi_{ск}$); f, f_0 – площади сжатого сечения струи и отверстия.

Время истечения жидкости **при переменном напоре** ($H = \text{const}$) от уровня H_1 до H_2 :

$$\tau = \frac{2F_0}{\alpha f \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}),$$

где F_0, f – площади сечений резервуара и отверстия, m^2 . Формула справедлива, если F_0 сохраняет постоянное значение по высоте сосуда.

При движении жидкости по трубопроводам различают потери энергии (напора) на трение и на местных сопротивлениях.

1. Потери напора на трение определяются по уравнению Дарси – Вейсбаха:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{W^2}{2g},$$

где λ – коэффициент трения, зависящий в общем случае от режима движения жидкости и шероховатости внутренних стенок трубопровода (табл.3).

Шероховатость абсолютная (e) – средняя высота выступов на стенке трубы.

Шероховатость относительная (ϵ_0) – отношение абсолютной шероховатости e к диаметру трубы d : $\epsilon_0 = \frac{e}{d}$.

Шероховатость гидравлическая – определяется соотношением абсолютной шероховатости e с толщиной пограничного слоя δ :

если $\delta > e$ - трубы называются гидравлически гладкими;

если $\delta < e$ - трубы называются гидравлически шероховатыми.

Таблица 3

Формулы для определения коэффициента трения

Наименование области	Границы области	Формула для расчета
Ламинарная область - гидравлически гладкие трубы	$Re < 2320$	$\lambda = 64/Re$
Турбулентная область - гидравлически гладкие трубы	$10 \frac{d}{e} > Re > 2320$	$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} \right)^{0,25}$
Турбулентная область - гидравлически шероховатые трубы	$500 \frac{d}{e} > Re > 10 \frac{d}{e}$	$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{e}{d} \right)^{0,25}$
Автомодельная (квадратичная) область	$Re > 500 \frac{d}{e}$	$\lambda = 0,11 \left(\frac{e}{d} \right)^{0,25}$

2. Потери напора на местных сопротивлениях обусловлены изменением скорости потока по величине и по направлению. К местным сопротивлениям относятся вход в трубу и выход из нее, внезапное сужение и расширение потока, колена, отводы, краны, вентили, фильтры, клапаны и т.п.

Методы расчета потерь напора на местных сопротивлениях:

а) по коэффициенту **местного сопротивления**, показывающему долю скоростного напора, теряемого на данном сопротивлении:

$$h_{mc} = \zeta_{mc} \frac{W^2}{2g},$$

при расчетах ζ_{mc} выбирается по справочным таблицам;

б) по **эквивалентной длине местного сопротивления** ($l_э = \frac{\zeta_{mc}}{\lambda} d$) – длине такой прямой трубы, потери на трение в которой равны потере напора на местном сопротивлении:

$$h_{mc} = \lambda \frac{l_э}{d} \frac{W^2}{2g}.$$

Гидравлическое сопротивление аппаратов с насадкой определяют по формуле:

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{W^2}{2} \rho,$$

где $W = \frac{w_\phi}{\varepsilon}$ - истинная скорость движения газа в каналах, м/с; w_ϕ - фиктивная или средняя скорость движения газа в полном сечении аппарата, м/с; ε - доля свободного объема аппарата, м³/м³; H - высота слоя насадки, м; $d_3 = \frac{4\varepsilon}{\sigma}$ - эквивалентный диаметр каналов насадки, м; σ - удельная поверхность насадки, м²/м³.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте понятия идеальной и реальной жидкостей.
2. Перечислите основные физические свойства жидкостей.
3. Запишите основное уравнение гидростатики.
4. В чем заключаются практические приложения основного уравнения гидростатики?
5. Сформулируйте внутреннюю, внешнюю и смешанную задачи гидродинамики.
6. Укажите единицы измерения массового и объемного расходов.
7. Что представляет собой сплошной (неразрывный) поток жидкости?
8. Назовите виды режимов движения жидкостей и дайте их характеристику.
9. Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Л.Эйлера.
10. В чем заключается геометрическая и энергетическая интерпретации членов уравнения Д.Бернулли?
11. Представьте вид обобщенного критериального уравнения гидродинамики.
12. Каким образом рассчитывается объемный расход жидкости в случае истечения при постоянном напоре?
13. Как определяется время истечения жидкости при переменном напоре?
14. Напишите выражение для определения потерь напора на трение.

3. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Перемещение жидкостей по трубопроводу происходит при наличии разности полных напоров на его концах.

Самотек – перемещение жидкости при разности напоров, обусловленной более высоким уровнем жидкости в исходной емкости по сравнению с собирающей.

Принудительное течение – обеспечивается созданием дополнительного напора (насосами), для повышения скорости подачи жидкости и для транспортирования жидкости с некоторого уровня на более высокий.

Насосы – гидравлические машины, преобразующие механическую энергию двигателя в энергию транспортируемой жидкости, служащие для перемещения жидкостей и сообщения им энергии.

Классификация насосов.

I. Механические – характеризуются наличием движущихся рабочих органов.

1. Насосы вытеснения:

- а) поршневые (движущимся рабочим органом являются поршень или плунжер);
- б) ротационные (рабочие органы совершают вращательное движение):
 - пластинчатые (рабочий орган – ротор с выдвигными пластинами);
 - шестеренчатые (рабочий орган – шестерни);
 - шланговые (рабочий орган – перемещающиеся прижимы);
 - винтовые (рабочий орган – винты).

2. Лопастные:

- а) центробежные (рабочее колесо при вращении обеспечивает выброс жидкости на периферию);
- б) пропеллерные или осевые (лопасти на вращающемся валу обеспечивают перемещение жидкости в осевом направлении);
- в) вихревые (осуществляют многократный выброс жидкости на периферию).

II. Немеханические – характеризуются отсутствием движущихся механических частей.

1. Газлифт (эрлифт) - обеспечивает создание напора за счет введения в жидкость неподвижного газа.

2. Струйные насосы – перепад давления создается за счет подачи струй газа, жидкости или пара с большой кинетической энергией.

3. Монтежю – напор создается увеличением давления газа на свободную поверхность жидкости в резервуаре.

Основные параметры работы насосов.

1. Подача – объем жидкости, перемещаемой насосом в единицу времени в нагнетательный трубопровод, м³/с.

2. Напор – разность удельных энергий потока на выходе E_2 и входе E_1 в насос, характеризует удельную энергию, сообщаемую насосом единице веса перекачиваемой жидкости $H = E_2 - E_1$:

а) напор для действующей насосной установки

$$H = \frac{p_H - p_{BC}}{\rho g} + \frac{W_H^2 - W_{BC}^2}{2g} + Z,$$

где p_H, p_{BC} - давления во всасывающем и нагнетательном трубопроводах, Па; W_{BC}, W_H – скорости во всасывающей и нагнетательной линиях, м/с; Z – расстояние между центром манометра и точкой присоединения вакуумметра, м;

б) напор по показаниям манометра p_M и вакуумметра p_w , если диаметры всасывающего и нагнетательного трубопроводов равны $d_1=d_2$; $Z=0$;

$p_H=p_{атм}-p_M$; $p_{BC}=p_{атм}-p_w$

$$H = \frac{p_M + p_w}{\rho g};$$

в) напор для проектируемой установки

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} + H_T + \sum h_{\Pi},$$

где Δp - разность давлений в верхнем и нижнем резервуарах; H_T - геометрическая высота подъема жидкости; $\sum h_{\Pi}$ - потери напора во всасывающей и нагнетательной линиях.

3. Высота всасывания (допустимая) – высота, которая зависит от температуры жидкости, т.к. связана с давлением ее насыщенных паров p_{Π} :

$$H_{\text{вс(доп)}} \leq \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} - \left(\frac{p_{\Pi}}{\rho g} + \frac{W_{\text{вс}}^2}{2g} + \sum h_{\text{вс}} + h_{\text{кав}} \right)$$

где $p_{\text{ат}}$ – атмосферное давление; $W_{\text{вс}}$ – скорость во всасывающем трубопроводе; $\sum h_{\text{вс}}$ - потери энергии во всасывающей линии; $h_{\text{кав}}$ – кавитационная поправка, связана с явлением, называемым **кавитация** – процесс вскипания жидкости в областях с пониженным давлением и последующей конденсации пара при повышении давления, приводящий к гидравлическим ударам и разрушению конструкций.

4. Мощность насоса:

а) полезная $N_{\Pi} = QH\rho g$, Вт;

б) на валу насоса $N_{\text{в}} = \frac{QH\rho g}{1000 \cdot \eta}$, кВт.

5. Коэффициент полезного действия насоса – произведение объемного, гидравлического и механического КПД:

$$\eta = \eta_0 \cdot \eta_T \cdot \eta_M \quad \text{или} \quad \eta = \frac{N_{\Pi}}{N_{\text{в}}},$$

где $\eta_0 = \frac{Q}{Q_T}$ - **объемный КПД**, отношение, действительной подачи Q к

теоретически возможной Q_T , учитывает потери энергии, связанные с утечками жидкости через неплотности в насосе;

$\eta_T = \frac{H}{H_T}$ - **гидравлический КПД**, отношение действительного напора,

развиваемого насосом H , к теоретическому H_T , учитывает потерю напора на гидравлические сопротивления в проточной части насоса;

$\eta_M = \frac{N_{\text{вн}}}{N_{\text{в}}}$ - **механический КПД**, отношение внутренней мощности $N_{\text{вн}}$ насоса к

мощности на его валу $N_{\text{в}}$, учитывает потери энергии вследствие механического трения в подшипниках и уплотнения вала.

Способы регулирования параметров работы насоса.

1. Изменение числа оборотов рабочего органа центробежного насоса, соответствующее формулам пропорциональности:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3, \quad \text{при} \quad \frac{n_1}{n_2} < 2.$$

2. Изменение характеристики сети путем снижения или увеличения гидравлического сопротивления.
3. Байпасирование – возвращение части жидкости из нагнетательного трубопровода во всасывающий патрубков.
4. Параллельное включение насосов применяется для увеличения напора.
5. Последовательное включение насосов применяется для увеличения подачи.

Основные параметры, указываемые при выборе типа насоса: подача, напор, температура перекачиваемой жидкости и ее характеристики (химическая активность, загрязненность, вязкость и другие), кавитационный запас, частота вращения рабочего колеса, направление вращения, коэффициент полезного действия, мощность двигателя, габаритные размеры, требования к ресурсу и виброшумовым характеристикам, тип приводного двигателя и его основные характеристики.

Вопросы для самоконтроля

1. Укажите способы перемещения жидкостей по трубопроводу.
2. Дайте классификацию насосам.
3. Перечислите основные параметры работы насосов.
4. Запишите формулу для расчета напора, создаваемого насосом для проектируемой и действующей установки.
5. Каким образом рассчитывается допустимая высота всасывания насоса?
6. Перечислите основные способы регулирования параметров работы насосов.
7. По каким основным параметрам проводится выбор типа насоса?

4. СЖАТИЕ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ГАЗОВ

Компрессорные машины – машины предназначенные, для сжатия и перемещения газов.

Степень сжатия – отношение конечного давления P_2 , создаваемого компрессорной машиной, к начальному давлению P_1 , при котором происходит всасывание газа $a = \frac{P_2}{P_1}$.

В зависимости от необходимой степени сжатия различают следующие **типы компрессорных машин:**

I. Компрессоры ($a > 3$) – служат для создания высоких давлений, имеют искусственное, обычно водяное, охлаждение полостей, в которых происходят сжатия газов: поршневые, центробежные, ротационные, осевые, струйные.

II. Газодувки ($1 < a < 3$) – служат для перемещения газов при относительно высоком сопротивлении газовой сети: ротационные, центробежные.

III. Вентиляторы ($a < 1$) – служат для перемещения больших объемов газа: центробежные, осевые (пропеллерные).

IV. Вакуум – насосы ($p_2 < p_1$) – служат для перемещения газов при давлении ниже атмосферного: поршневые, водокольцевые, ротационные, струйные.

Компрессоры поршневые – являются наиболее распространенными в химической промышленности. Различают компрессоры простого и двойного действия; одноступенчатые и многоступенчатые; низкого, среднего и высокого давления; горизонтальные, вертикальные, угловые, U – образные, W – образные, звездообразные; воздушные, азотные, аммиачные, кислородные, хлорные, фреоновые; стационарные, передвижные.

Степень сжатия – часть компрессорной машины, где газ сжимается до конечного или промежуточного давления.

Основные параметры работы компрессоров.

1. Теоретическая удельная работа – работа, затрачиваемая на сжатие газа в компрессорной машине и **температура газа в конце сжатия**:

а) при изотермическом сжатии

$$A'_{из} = P_1 \nu_1 \ln \frac{p_2}{p_1},$$

$$T_2 = T_1;$$

б) при адиабатическом процессе сжатия

$$A'_{ад} = Z P_1 \nu_1 \frac{K}{K-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{KZ}} - 1 \right],$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{KZ}};$$

в) при политропическом сжатии

$$A'_{пол} = Z P_1 \nu_1 \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{mZ}} - 1 \right],$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{mZ}},$$

где $K = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты; c_p , c_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме, соответственно, кДж/(кг·К); ν_1 – удельный объем, м³/кг; m – показатель политропы; Z – число ступеней сжатия; T_1 – начальная температура газа, К; T_2 – конечная температура газа, К.

2. КПД адиабатический – отношение мощности сжатия изоэнтальной машины $N_{т.ад}$ к мощности N данного компрессора, работающего без охлаждения:

$$\eta_{ад} = \frac{N_{т.ад}}{N}.$$

3. КПД изотермический – отношение мощности изотермического сжатия $N_{т.из}$ к фактической мощности N данной машины, работающей с охлаждением газа:

$$\eta_{\text{из}} = \frac{N_{\text{т.из}}}{N}.$$

4. КПД механический – отношение мощности N , затрачиваемой на сжатие газа, к мощности на валу компрессора $N_{\text{в}}$:

$$\eta_{\text{м}} = \frac{N}{N_{\text{в}}}.$$

5. КПД объемный – отношение объема всасываемого газа $V_{\text{вс}}$ к объему, описываемому поршнем $V_{\text{п}}$:

$$\lambda_{\text{o}} = \frac{V_{\text{вс}}}{V_{\text{п}}}.$$

Объемный К.П.Д. учитывает снижение подачи за счет наличия мертвого пространства и связан со степенью повышения давления и относительным объемом V_{o} мертвого пространства $\varepsilon = \frac{V_{\text{o}}}{V_{\text{п}}}$ уравнением:

$$\lambda_{\text{o}} = 1 - \varepsilon \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right],$$

где m – показатель политропы.

6. Мощность, потребляемая двигателем:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{в}}}{\eta_{\text{пер}} \eta_{\text{дв}}},$$

где $\eta_{\text{пер}}$, $\eta_{\text{дв}}$ - К.П.Д. передачи и К.П.Д. двигателя соответственно.

7. Подача компрессора поршневого простого, или одностороннего, действия – объем газа, всасываемого в компрессор за единицу времени:

$$Q_1 = \lambda F S n i,$$

где $F = \frac{\pi D^2}{4}$ - площадь поперечного сечения поршня, м^2 ; D – диаметр поршня,

m ; S – ход поршня, m ; i – число всасываний за двойной ход поршня; n – частота вращения кривошипа (число двойных ходов поршня в единицу времени), с^{-1} ;

λ – **коэффициент подачи** – отношение объема нагнетаемого газа $V_{\text{прив}}$, приведенного к условиям всасывания, к объему, описываемому поршнем $V_{\text{п}}$:

$$\lambda = \frac{V_{\text{прив}}}{V_{\text{п}}}.$$

Данный коэффициент учитывает потери компрессора за счет наличия вредного пространства (оценивается объемным КПД λ_{o}), утечек газа через неплотности (оценивается коэффициентом герметичности $\lambda_{\text{г}}$) и разогрева цилиндра (оценивается термическим коэффициентом $\lambda_{\text{т}}$):

$$\lambda = \lambda_{\text{o}} \lambda_{\text{г}} \lambda_{\text{т}}.$$

8. Число ступеней сжатия:

$$Z = \frac{\lg P_2 - \lg P_1}{\lg a_1},$$

где a_1 – степень сжатия в одной ступени.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию компрессорных машин в зависимости от необходимой степени сжатия.
2. Что является адиабатическим, изотермическим и механическим КПД компрессора?
3. Как рассчитывается подача поршневого компрессора простого действия?
4. Каким образом определяется мощность, потребляемая двигателем?
5. Дайте определение объемному КПД поршневого компрессора.
6. Что такое число ступеней сжатия?

5. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Гидромеханика изучает равновесие и движение жидкостей, рассматривает взаимодействие между жидкостью и твердыми частицами.

Гидромеханические процессы – процессы, основывающиеся на закономерностях переноса импульса (количества движения), устанавливаемых технической гидравликой.

Неоднородные (гетерогенные) системы – системы, состоящие из двух или нескольких фаз: дисперсной (мелкораздробленной) фазы и дисперсионной (сплошной) фазы.

Классификация неоднородных систем.

I. Жидкие неоднородные системы (сплошная фаза – жидкости):

1. Суспензии – системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней твердых частиц:

- 1) грубые суспензии ($d_q > 100 \text{ мкм}$);
- 2) тонкие суспензии ($d_q = 0,5 \div 100 \text{ мкм}$);
- 3) мути ($d_q = 0,1 \div 0,5 \text{ мкм}$).

2. Эмульсии – системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, которая не смешивается с первой. Под действием силы тяжести эмульсии могут расслаиваться, при диаметре капель $d_k = 0,4 \div 0,5 \text{ мкм}$ эмульсии устойчивы.

3. Пены – системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней пузырьков газа.

II. Газовые неоднородные системы (сплошная фаза – газ):

1. Пыли – системы, состоящие из газа и распределенных в нем частиц твердого вещества ($d_q = 3 \div 70 \text{ мкм}$), образующиеся при проведении механических процессов.

2. Дымы – системы, состоящие из газа и распределенных в нем частиц твердого вещества ($d_q = 0,3 \div 5 \text{ мкм}$), образующиеся при горении.

3. Туманы – системы, состоящие из газа и распределенных в нем капель жидкости ($d_k=0,4 \div 0,5$ мкм), образующиеся при конденсации веществ.

5.1. МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Цели разделения неоднородных систем:

- 1) очистка газовой или жидкой фазы от загрязняющих твердых частиц;
- 2) выделение из газовой или жидкой фазы ценных веществ.

Основные факторы, влияющие на выбор метода разделения: размер частиц твердой фазы, разница плотностей сплошной и мелкодробленой фаз, вязкость сплошной фазы, химическое взаимодействие сплошной фазы с другими телами, агрегатное состояние дисперсной фазы.

Классификация методов разделения.

- I. Разделение под действием силы тяжести (гравитационное осаждение, мокрая очистка газов).
- II. Разделение с помощью фильтрующих перегородок (фильтрование).
- III. Разделение под действием электростатического поля (электроосаждение).
- IV. Разделение под действием центробежных сил (центробежное осаждение, центрифугирование).

Материальный баланс процесса разделения.

1. По общему количеству вещества:

$$G_{см} = G_{оч} + G_{ос},$$

где $G_{см}$, $G_{оч}$, $G_{ос}$ - массовые расходы исходной смеси, очищенной фазы и осадка соответственно, кг/с.

2. По дисперсной фазе:

$$G_{см} X_{см} = G_{оч} X_{оч} + G_{ос} X_{ос},$$

где $x_{см}$, $x_{оч}$, $x_{ос}$ - концентрация (массовые доли) дисперсной фазы в исходной смеси, в очищенной фазе и осадке соответственно.

Расход (производительность) очищенной жидкости и осадка:

$$G_{ос} = G_{см} \frac{X_{см} - X_{оч}}{X_{ос} - X_{оч}} \text{ или } G_{ос} = G_{см} \frac{X_{оч} - X_{см}}{X_{оч} - X_{ос}};$$

$$G_{оч} = G_{см} \frac{X_{см} - X_{ос}}{X_{оч} - X_{ос}} \text{ или } G_{оч} = G_{см} \frac{X_{ос} - X_{см}}{X_{ос} - X_{оч}}.$$

Гравитационное осаждение – процесс разделения неоднородных систем под действием силы тяжести.

Свободное осаждение – осаждение в неограниченном объеме, при низких концентрациях дисперсной фазы, частицы при данном виде осаждения не соприкасаются друг с другом.

В гравитационном поле на шарообразную частицу диаметром $d_{ч}$ действуют три основные силы:

$$G = \frac{\pi d_{ч}^3}{6} \rho_{ч} g \text{ - сила тяжести;}$$

$$F_A = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \rho_{\text{ср}} g - \text{сила Архимеда};$$

$$F_c = \xi \frac{W_{\text{ос}}^2 \rho_{\text{ср}}}{2} \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} - \text{сила сопротивления среды},$$

где $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы, кг/м³; $\rho_{\text{ср}}$ - плотность среды, кг/м³; $d_{\text{ч}}$ - диаметр частицы, м.

При равномерном движении частицы силы уравновешиваются:

$$G = F_c + F_A \text{ или } \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ср}}) g = \xi \frac{W_{\text{ос}}^2 \rho_{\text{ср}}}{2} \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4},$$

скорость свободного осаждения определяется следующим образом:

$$W_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4 d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ср}}) g}{3 \xi \rho_{\text{ср}}}}.$$

Режимы осаждения.

1. Ламинарный режим (область Стокса) – тело окружено пограничным слоем жидкости и плавно обтекается потоком. Потери энергии при движении связаны с преодолением сопротивления трения:

$$Re < 2; \xi = \frac{24}{Re}; W_{\text{ос}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ср}}) g}{18 \mu_{\text{ср}}} - \text{закон Стокса},$$

где ξ - коэффициент сопротивления среды; $Re = \frac{W_{\text{ос}} \rho_{\text{ср}} d_{\text{ч}}}{\mu_{\text{ср}}}$.

2. Переходный режим (область Аллена) - с развитием турбулентности начинают преобладать силы инерции, пограничный слой отрывается от поверхности тела, понижается давление за движущимся телом и образуются беспорядочные завихрения:

$$2 < Re < 500; \xi = \frac{18.5}{Re^{0.6}}; W_{\text{ос}} = 0,78 \frac{d^{0,43} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ср}})^{0,715}}{\rho_{\text{ср}}^{0,285} \mu_{\text{ср}}^{0,43}}.$$

3. Автомодельный режим (область Ньютона) – сопротивлением трения пренебрегают:

$$Re > 500; \xi = 0,44; W_{\text{ос}} = 5,46 \sqrt{\frac{d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ср}}) g}{\rho_{\text{ср}}}}.$$

Если режим неизвестен, то скорость осаждения определяется по методу Лященко:

$$Re^2 \xi = \frac{4}{3} Ar - \text{основное уравнение осаждения};$$

$$Ly = \frac{\pi}{8} \xi Re^2 = \frac{\pi}{6} Ar - \text{функция Лященко}.$$

Алгоритм расчета скорости осаждения:

$(d_{\text{ч}}, \rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{ср}}, \mu_{\text{ср}}) \rightarrow Ar \rightarrow Ly \rightarrow Re \rightarrow W_{\text{ос}}$.

$Ar = \frac{gd_{\text{ч}}^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ср}})}{v^2 \rho_{\text{ср}}}$ - критерий Архимеда, являющийся мерой соотношения

подъемных сил, обусловленных разностью плотностей в различных слоях среды, и сил вязкого трения в потоке.

Граничные значения критерия Архимеда, соответствующие переходу из одной области в другую:

1. Ламинарный режим осаждения:

$$Re = \frac{Ar}{18} < 2; Ar < 36.$$

2. Переходный режим осаждения:

$$Re = 0,152Ar^{0,715}; 36 < Ar < 83000.$$

3. Автомодельный режим осаждения:

$$Re = 1,74\sqrt{Ar}; Ar > 83000.$$

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{W_{\text{ос}}^3 \rho_{\text{ср}}^2}{\mu_{\text{ср}} (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ср}}) g}.$$

Алгоритм расчета скорости осаждения:

$(d_{\text{ч}}, \rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{ср}}, \mu_{\text{ср}}) \rightarrow Ar \rightarrow Re \rightarrow W_{\text{ос}}$.

Стесненное осаждение – осаждение в ограниченных объемах, при этом частицы соприкасаются друг с другом, более крупные увлекают за собой мелкие, при столкновении частиц частично теряется энергия движения, увеличивается коэффициент сопротивления и уменьшается скорость осаждения.

$$W_{\text{с.ос}} = f(W_{\text{ос}}, C_{\text{об}}),$$

где $W_{\text{с.ос}}$ - скорость стесненного осаждения, м/с; $C_{\text{об}}$ – объемная доля жидкости в суспензии.

Скорость стесненного осаждения частиц неправильной формы:

$$W'_{\text{с.ос}} = W_{\text{с.ос}} \Phi_{\text{ч}},$$

где $\Phi_{\text{ч}}$ - коэффициент формы частицы – отношение площади поверхности

частицы $f_{\text{ч}}$ любой произвольной формы к площади поверхности $f_{\text{ш}}$ шарообразной частицы при условии равенства их объемов $\Phi_{\text{ч}} = \frac{f_{\text{ш}}}{f_{\text{ч}}}$.

Действительная скорость стесненного осаждения для инженерных расчетов:

$$W_{с.ос}^Д = 0,5W_{ос}.$$

Классификация конструкций отстойников.

I. Непрерывного действия - суспензия подается непрерывно, осветленная жидкость и шлам также отводятся непрерывно (отстойники с гребковой мешалкой, с коническими полками, для разделения эмульсий): одноярусные, двухъярусные, многоярусные.

II. Полунепрерывного действия – суспензия подается до тех пор, пока в них не накопится определенное количество шлама, после этого подача суспензии прекращается и производится выгрузка осадка, затем операция повторяется вновь (отстойник с наклонными перегородками).

III. Периодического действия – отстойник заполняется суспензией, которая выдерживается в течение определенного промежутка времени, необходимого для оседания частиц. Осветленная жидкость сливается через боковой кран, шлам выгружается через нижний люк. Представляют собой бассейны без перемешивающих устройств.

Целью расчета отстойников является определение поверхности осаждения:

$$F = \frac{G_{оч}}{\rho_{оч} W_{ос}} = \frac{G_{см}}{\rho_{оч} W_{ос}} \frac{x_{ос} - x_{см}}{x_{ос} - x_{оч}},$$

где $\rho_{оч}$ - плотность очищенной фазы, кг/м³.

Целью расчета пылеосадительной камеры является установление связи между расходом запыленного газа, скоростью осаждения и геометрическими размерами камеры.

Объемный расход запыленного газа $V_{г}$ в ячейке и **общая производительность камеры** $V_{об}$ определяются следующим образом:

$$V_{г} = fW_{г} = bHW_{ос} \frac{1}{H} = bW_{ос},$$

где f – площадь поперечного сечения ячейки, м²; b – ширина ячейки, м; l – длина ячейки, м; H – высота ячейки (полки), м; $W_{г}$ - скорость газа, м/с;

$$V_{об} = nbW_{ос},$$

где n – число полок.

Мокрая очистка газов – метод очистки, заключающийся в промывке газов водой или другой жидкостью, происходит под действием сил тяжести или сил инерции.

Способы контакта газа с жидкостью в зависимости от запыленности газа.

1. Контакт запыленного газа с жидкостью, которая движется в виде пленки (осуществляется в пленочных или насадочных скрубберах).
2. Контакт запыленного газа с капельками распыляемой жидкости (осуществляется в полых скрубберах и скрубберах Вентури).
3. Запыленный газ в виде пузырьков пропускается через слой жидкости (осуществляется в барботажных или пенных пылеуловителях).

Целью расчета аппаратов мокрой очистки газов является определение количества уловленной пыли.

Концентрация пыли в очищенном газе определяется по уравнению:

$$c_k = c_n (1 - \eta),$$

где c_n, c_k - концентрации пыли в исходном и очищенном газе, кг/м³; η - степень очистки газа, определяется экспериментально.

Расход уловленной пыли рассчитывается следующим образом:

$$G_{\text{пыли}} = V_n c_n - V_k c_k,$$

где V_n, V_k - объемный расход исходного и очищенного газа, соответственно, м³/с.

Фильтрование – процесс разделения неоднородных систем с помощью пористых фильтрующих перегородок, которые задерживают твердые частицы, но пропускают через себя сплошную фазу (жидкость или газ).

Осадок – твердые частицы, задержанные фильтровальной перегородкой, существуют следующие типы осадков: сжимаемые и несжимаемые, однородные и неоднородные, кристаллические и аморфные.

Сжимаемые осадки – осадки, пористость которых уменьшается при увеличении давления, гидравлическое сопротивление слоя осадка увеличивается.

Несжимаемые осадки – осадки, у которых пористость не зависит от перепада давления

Фильтрат – сплошная фаза, прошедшая через фильтровальную перегородку.

Типы фильтровальных перегородок.

1. Гибкие – выполняются из тканей, плетеных сеток, перфорированных пластин, пленок.

2. Негибкие (жесткие) – выполняются в виде дисков, плиток, пластин, патронов из частиц стекла, металлов, шлама, угольного порошка, жестко связанных между собой. Изготавливаются методом прессования или спекания с образованием пор.

3. Зернистые (негибкие и нежесткие) – образуются слоями различных сыпучих материалов: песка, золы, активированного угля и другими.

Требования, предъявляемые к фильтровальным перегородкам:

1) перегородка должна удерживать твердые частицы, которые легко отделяются от перегородки при выгрузке осадка;

2) перегородка должна обладать высокой механической прочностью, но низким гидравлическим сопротивлением.

Способы осуществления процесса фильтрования.

1. Шламовое фильтрование – фильтрование с образованием осадка на поверхности перегородки без закупорки пор.

2. Закупорочная фильтрация – осадок образуется внутри перегородки:

- с полным закупориванием пор одной частицей;

- постепенным закупориванием пор многими частицами.

3. Промежуточный вид фильтрования – наличие осадка в порах и на поверхности перегородки.

Движущая сила фильтрования – разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки $\Delta p = p_1 - p_2$.

Способы создания разности давлений.

1. За счет гидростатического давления слоя жидкости.
2. За счет вакуума под фильтрующей перегородкой.
3. Под действием избыточного давления.
4. С помощью центробежных сил.

Скорость фильтрования – характеристика процесса, показывающая какой объем фильтрата прошел через единицу поверхности фильтрования за единицу времени, прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости фильтрата и суммарному гидравлическому сопротивлению слоя осадка и фильтровальной перегородки.

Время фильтрования – время, за которое протекают основные операции (фильтрование, промывка и продувка осадка) и вспомогательные операции (подготовка фильтра, загрузка суспензии, удаление осадка, регенерация ткани).

Основное дифференциальное уравнение фильтрования:

$$W = \frac{dV}{Fdt} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{oc} + R_{фп})} = \frac{\Delta p}{\mu(r_{oc}h_{oc} + R_{фп})},$$

где V – производительность фильтра, m^3 ; F – поверхность фильтрования, m^2 ; τ – время процесса фильтрования, s ; Δp – перепад давления на фильтрующей перегородке, Pa ; μ – коэффициент динамической вязкости фильтрата, $Pa \cdot s$;

R_{oc} – гидравлическое сопротивление слоя осадка, m^{-1} ; $h_{oc} = x_0 \frac{V}{F}$ – высота слоя осадка, m ; $x_0 = \frac{V_{oc}}{V}$ – удельный объем осадка, показывает, какой объем осадка образуется при прохождении $1m^3$ фильтрата; V_{oc} – объем осадка, m^3 ;

$R_{фп} = \frac{\Delta p}{W\mu}$ – гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки, m^{-1} – численно равно разности давлений, необходимой для того, чтобы сплошная фаза с вязкостью $1Pa \cdot s$ проходила через фильтровальную перегородку со скоростью $1m/s$;

$r_{oc} = \frac{\Delta p}{W\mu h_{oc}}$ – удельное сопротивление осадка, m^{-2} – показывает какую разность давлений нужно создать, чтобы сплошная фаза с вязкостью $1Pa \cdot s$ фильтровалась со скоростью $1m/s$, через слой осадка толщиной $1m$.

Уравнение фильтрования при постоянной разности давлений:

$$\tau = aq^2 + bq,$$

где $q = \frac{V}{F}$ - удельная производительность по фильтрату, $\text{м}^3/\text{м}^2$; $a = \frac{\mu r_{oc} x_o}{2\Delta p}$,

$b = \frac{R_{фп}\mu}{\Delta p}$ - константы фильтрования, определяемые экспериментально.

Данное уравнение позволяет определить производительность фильтра V за время τ или необходимую поверхность фильтра F при заданной производительности V .

Уравнение фильтрования при постоянной скорости:

$$\Delta p = \mu r_{oc} x_o W^2 \tau + \mu R_{фп} W.$$

В случае постоянной скорости фильтрования разность давлений возрастает с увеличением продолжительности процесса.

Уравнение фильтрования при постоянной разности давлений и постоянной скорости процесса:

$$V = \frac{\Delta p F \tau}{\mu(r_{oc} h_{oc} + R_{фп})}.$$

В данном случае фактически осуществляется процесс промывки осадка, так как чистая жидкость фильтруется через слой осадка неизменной толщины при постоянном перепаде давления.

Классификация конструкций фильтров.

I. По режиму работы:

1. Периодического действия.
2. Непрерывного действия.

II. По способу создания движущей силы:

1. Вакуумные фильтры.
2. Фильтры, работающие под избыточным давлением.

III. По технологическому назначению:

1. Фильтры для разделения суспензий:
 - а) периодического действия: нутч-фильтры, фильтр-прессы, листовые фильтры, патронные фильтры;
 - б) непрерывного действия: барабанные вакуум-фильтры, дисковые вакуум-фильтры, ленточные фильтры, карусельные фильтры.
2. Фильтры для разделения газовзвесей.

Целью расчета периодически действующих фильтров является определение производительности одного фильтра с заданной или выбранной поверхностью фильтрования, с последующим определением числа фильтров, необходимых для обеспечения общей производительности установки.

Объем фильтрата V , получаемого за один цикл работы фильтра:

$$\frac{V^2}{F^2} + 2 \frac{R_{фп}}{r_{oc} x_o} \frac{V}{F} = \frac{2\Delta p}{\mu r_{oc} x_o} \tau,$$

где τ - продолжительность фильтрования, с; F - заданное или выбранное значение площади фильтра, м^2 .

Необходимое число фильтров:

$$N_{\phi} = \frac{n_{\text{общ}}}{n_1},$$

где $n_{\text{общ}}$ - общее число циклов работы фильтра в сутки; n_1 - число циклов работы одного фильтра в сутки.

Целью расчета непрерывно действующих фильтров является определение скорости перемещения поверхности фильтрования и количества фильтров при заданной производительности.

Объем фильтрата, получаемый по всей поверхности фильтра за один оборот (для барабанного вакуум-фильтра):

$$V = \frac{h_{\text{ос}} F}{x_0}.$$

Общая продолжительность цикла:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\phi} + \tau_{\text{об}}^1 + \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{об}}^2 + \tau_{\text{ур}},$$

где τ_{ϕ} - время, необходимое для образования слоя осадка толщиной $h_{\text{ос}}$; $\tau_{\text{об}}^1$, $\tau_{\text{об}}^2$ - продолжительность стадий обезвоживания; $\tau_{\text{пр}}$ - время промывки осадка; $\tau_{\text{ур}}$ - продолжительность стадий удаления осадка и регенерации ткани.

Скорость вращения барабана вакуум-фильтра, об/мин:

$$n = \frac{60}{\tau_{\text{ц}}}.$$

Число фильтров, обеспечивающее общую производительность:

$$N_{\phi} = \frac{Q_{\text{общ}}}{Q},$$

где Q - производительность одного фильтра по фильтрату в сутки, $\text{м}^3/\text{сут}$.

Электроосаждение – очистка газов от пыли и взвешенных в них капель жидкости; широко применяется в производстве серной кислоты, сажи, на тепловых электростанциях, при обжиге руд, получении пигментов и т.д.; принцип действия электроосаждения основан на ионизации газов, содержащих взвешенные частицы, путем создания достаточно высоких (пробивных) напряжений подводимого тока; для воздуха пробивное напряжение составляет 21000 В/см, рабочее напряжение в электроосадителях (электрофильтрах) составляет 35 ÷ 70 кВ, а сила тока $0,3 \div 0,5 \frac{\text{мА}}{\text{погонный метр}}$.

Типы электродов.

1. В виде проволоки, расположенной по оси трубы.
2. В виде проволоки, расположенной между параллельными пластинами.

Классификация электрофильтров.

I. По форме электродов:

1. Трубчатые.
2. Пластинчатые.

II. В зависимости от вида удаляемых частиц из газа:

1. Сухие (улавливается сухая пыль).
2. Мокрые (удаление влажной пыли).

Скорость свободного электроосаждения шарообразной частицы с известным зарядом:

$$W_{oc} = \frac{ne_0E_x}{3\pi\mu_{cp}d_{\text{ч}}} \text{ м/с,}$$

где n – число зарядов, полученных частицей; e_0 – величина элементарного заряда, Кл; E_x – напряженность электрического поля, В/м; μ_{cp} – динамический коэффициент вязкости среды, Па·с; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы, м.

Целью расчета электрофильтров является определение площади рабочего сечения аппарата, учитывая максимальную степень очистки газа и данных о допустимой скорости очищаемых газов; подбор конструкции и числа электрофильтров.

Центробежное осаждение – процесс выделения твердых частиц из жидких или газовых неоднородных систем под действием центробежных сил.

Способы создания центробежной силы.

1. Обеспечение вращательного движения потока в неподвижном аппарате (циклоны и гидроциклоны).
2. Направление потока неоднородной системы во вращающийся аппарат (центрифуги, сепараторы).

Скорость центробежного осаждения:

$$W_{oc} = \sqrt{\frac{4d_{\text{ч}}(\rho_{\text{ч}} - \rho_{cp})w^2}{3\zeta\rho_{cp}r}},$$

где W_{oc} – скорость центробежного осаждения, м/с; ζ – коэффициент сопротивления среды; w – окружная скорость, м/с; r – радиус вращения, м.

Скорость центробежного осаждения при ламинарном режиме:

$$W_{oc} = \frac{d_{\text{ч}}^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{cp})w^2}{18\mu_{cp}r} = W_{oc}Fr,$$

где W_{oc} – скорость свободного осаждения под действием силы тяжести для шарообразной частицы при ламинарном режиме осаждения, м/с; Fr – **фактор разделения** (центробежный критерий Фруда) – отношение центробежного ускорения $a_{\text{ц}}$ и ускорения силы тяжести g , показывает во сколько раз центробежная сила C больше силы тяжести G , оценивает эффективность центробежного разделения:

$$Fr = \frac{C}{G} = \frac{ma_{\text{ц}}}{mg} = \frac{w^2}{rg}.$$

Если режим неизвестен, то скорость центробежного осаждения определяется по методу Лященко:

$$Ly_{\text{ц}} = \frac{\pi}{8}\xi Re^2 = \frac{\pi}{6}Ar \cdot Fr - \text{функция Лященко при центробежном осаждении.}$$

Алгоритм расчета скорости осаждения:

$(d_{\text{ч}}, \rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{ср}}, \mu_{\text{ср}}) \rightarrow \text{Ar}, \text{Fr} \rightarrow \text{Ly}_{\text{ц}} \rightarrow \text{Re} \rightarrow W_{\text{оц}}$.

Целью расчета осадительных центробежных аппаратов (циклонов, гидроциклонов) является определение времени осаждения с последующим расчетом габаритов циклона, обеспечивающего заданную производительность.

Время центробежного осаждения:

$$\tau_{\text{оц}} = \frac{2}{\omega} \sqrt{\frac{3\zeta\rho_{\text{ср}}}{4d_{\text{ч}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ср}})}} (\sqrt{R_2} - \sqrt{R_1}),$$

где R_1, R_2 – начальный и конечный радиусы вращения частицы, м; ω – угловая скорость, рад/с.

Рабочий объем циклона:

$$V_{\text{ц}} = V_{\text{с}} \tau_{\text{оц}},$$

где $V_{\text{с}}$ – объемный расход исходной смеси, м³/с.

Высота цилиндрической части циклона:

$$H_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}}}{0,785(R_2^2 - R_1^2)}.$$

Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta p = \xi \frac{W_{\text{г}}^2 \rho_{\text{ср}}}{2},$$

где $W_{\text{г}}$ – фиктивная скорость газа в циклоне, м/с; ξ – сопротивление циклона.

Центрифугирование – процесс разделения суспензий и эмульсий в поле действия центробежных сил.

Классификация центрифуг.

I. По принципу работы:

1. Непрерывного действия.
2. Периодического действия.
3. Полунепрерывного действия.

II. В зависимости от конструкций стенок барабана:

1. Отстойные (со сплошной стенкой барабана, разделяются как суспензии, так и эмульсии).
2. Фильтрующие (с перфорированной стенкой барабана, разделяются только суспензии).

III. По расположению барабана:

1. Горизонтальные.
2. Вертикальные.
3. Стоячие.
4. Подвесные.

IV. В зависимости от величины фактора разделения:

1. Нормальные центрифуги ($\text{Fr} \leq 3000$).
2. Сверхцентрифуги ($\text{Fr} > 3000$).

V. По способу выгрузки осадка: с ручной, гравитационной, ножевой, шнековой, инерционной, пульсирующей выгрузкой осадка.

Фактор разделения:

$$Fr = \frac{w^2}{rg} = \frac{\omega^2 r^2}{rg} = \frac{\pi^2 n^2 r^2}{900rg} = \frac{n^2 D}{1800},$$

где w – окружная скорость вращения ротора, м/с; r – радиус барабана, м; n – число оборотов ротора, об/мин; ω – угловая скорость, рад/с; D – диаметр ротора, м.

С увеличением n , D возрастает разделяющее действие центрифуги.

Фугат – осветленная жидкость, получаемая в результате процесса центрифугирования.

Сепарация – разделение эмульсий в отстойных центрифугах.

Сепараторы – отстойные центрифуги для эмульсий.

Индекс производительности – величина, характеризующая разделяющую способность отстойных центрифуг, представляет собой поверхность условного отстойника, в котором для данной суспензии достигается такая же производительность, что и в рассматриваемой центрифуге

$$\Sigma = S \cdot Fr,$$

где S – площадь цилиндрической поверхности осаждения в роторе, м².

Центробежное фильтрование – процесс разделения суспензии в фильтрующих центрифугах, складываемый из стадий образования осадка, уплотнения осадка и механической сушки осадка.

Целью расчета центрифуг является определение производительности аппарата.

Теоретическая производительность отстойной центрифуги по осветленной жидкости:

$$Q_T = W_{oc} S = W_{oc} \cdot Fr \cdot S = W_{oc} \Sigma.$$

Теоретическая производительность фильтрующей центрифуги:

$$Q_T = \frac{V}{\tau} = \frac{\Delta p_{ц} S}{\mu r_{oc} h_{oc}},$$

при $R_{фп}=0$, выгрузка осадка осуществляется непрерывно, $\Delta p_{ц}$ – разность давлений, создаваемая с помощью центробежных сил, Па.

Действительная производительность центрифуг:

$$Q_d = Q_T \eta_{ц},$$

где $\eta_{ц}$ – коэффициент эффективности центрифуги.

5.2. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Перемешивание в жидких средах – процесс, осуществляемый с целью получения однородных гомогенных и гетерогенных систем или для интенсификации теплообмена, массообмена и химических превращений.

Способы перемешивания.

1. Механическое – с помощью механических мешалок различных конструкций, получившее наибольшее распространение в химической промышленности;

2. **Пневматическое (барботажное)** – барботажем газа через слой жидкости;
3. **Циркуляционное** – перекачиванием жидкости насосами по замкнутому контуру;
4. **Перемешивание в потоке (в трубопроводах)** – при помощи размещения в потоке неподвижных турбулизирующих устройств: поперечных полуперегородок, диафрагм со смещенными отверстиями, винтовых вставок, инжекторов.

Интенсивность перемешивания – количественная характеристика, определяется временем достижения заданного результата, характеризуемого количеством энергии (E), вводимой в единицу объема перемешиваемой жидкости (V) за единицу времени (τ):

$$I = \frac{E}{V\tau} = \frac{N}{V},$$

где N – мощность, потребляемая перемешивающим устройством (Вт), которая и определяет интенсивность перемешивания.

Эффективность перемешивания – качественная характеристика, выражается по-разному в зависимости от назначения (цели) процесса, например, при получении суспензии оценивается равномерностью распределения твердой фазы в объеме аппарата, при проведении тепловых и диффузионных процессов характеристика оценивается отношением коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в процессе перемешивания и до него.

Классификация механических мешалок.

I. В зависимости от вида движения:

1. Мешалки с вращательным движением от электродвигателя.
2. Мешалки с возвратно-поступательным движением от механического вибратора.

II. По характеру создаваемого течения потока различают мешалки, обеспечивающие:

1. Тангенциальное течение – жидкость в аппарате движется по концентрическим окружностям, параллельным плоскости вращения мешалки.
2. Радиальное течение – направленное движение жидкости от мешалки к стенке аппарата перпендикулярно оси вращения мешалки.
3. Осевое течение – движение жидкости направлено параллельно оси вращения мешалки.
4. Комбинированное (смешанное) – включает в себя комбинацию из выше названных течений потока.

III. По устройству лопастей мешалок различают:

1. Лопастного типа (лопастные: однорядные и многорядные, листовые, якорные и рамные).
2. Пропеллерные (однорядные, многорядные).
3. Турбинные (открытые, закрытые).
4. Специальные (дисковые, вибрационные, барабанные, шнековые, ленточные).

IV. По скорости вращения:

1. Тихоходные ($w=1$ м/с).
2. Быстроходные ($w=10$ м/с).

Рабочая мощность N_p – подводимая энергия, затрачиваемая при работе перемешивающих устройств на преодоление сил сопротивления среды:

$$N_p = K_N \rho n^3 d_M^5,$$

$$N_p = A d_M^{5-2m} n^{3-m} \rho^{1-m} \mu^m,$$

где K_N - **критерий мощности мешалки**, соответствующий критерию Эйлера для перемешиваемой среды, характеризует затраты энергии на перемешивание; A , m – константы, определяемые экспериментально и учитывающие особенности движения различных типов мешалок, наличие в аппарате вспомогательных устройств, шероховатость стенок и глубину погружения мешалки.

Основное критериальное уравнение гидродинамики перемешивания с модифицированными критериями подобия:

$$K_N = Eu_M = f(Re_M, Fr_M, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots),$$

где $Re_M = \frac{w d_M \rho}{\mu} = \frac{(n d_M) d_M \rho}{\mu} = \frac{n d_M^2 \rho}{\mu}$ - **модифицированный критерий Рейнольдса** (характеризует движение жидкости в процессах перемешивания чисто формально);

$Fr_M = \frac{w^2}{g d_M} = \frac{n^2 d_M}{g}$ - **модифицированный критерий Фруда** (учитывает влияние

силы тяжести на процесс перемешивания, проявляющийся в образовании воронок и волн на поверхности жидкости);

$Eu_M = \frac{N_p}{\rho n^3 d_M^5}$ - **модифицированный критерий Эйлера** (критерий мощности мешалки);

$\Gamma_1 = \frac{h}{d_M}$; $\Gamma_2 = \frac{D_{ап}}{d_M}$ - симплексы геометрического подобия,

где h – высота расположения перемешивающего устройства над дном, м; d_M - диаметр мешалки, м; $D_{ап}$ - диаметр аппарата, м; n – частота вращения мешалки, c^{-1} .

Основное критериальное уравнение гидродинамики при описании развитого устойчивого перемешивания:

$$Eu_M = f(Re_M) = \frac{A}{Re_M^m}.$$

Режимы перемешивания.

I. Ламинарный режим – жидкость плавно обтекает лопасти мешалки, захватывается ими и вращается вместе с ними за счет действия сил вязкости. При этом перемешиваются слои, непосредственно примыкающие к лопасти $Re < 100$.

II. Турбулентный режим – с возрастанием числа оборотов мешалки, образуется турбулентный кормовой след за движущимися лопастями, что приводит к интенсивному перемешиванию $100 < Re < 10^5$.

III. Автомодельный режим – расход энергии определяется только силами инерции и дальнейшее увеличение числа оборотов мешалки оказывается нецелесообразным. Возрастание мощности перемешивания не компенсируется возрастанием эффекта смещения $Re > 10^5$.

Пусковая мощность $N_{\text{п}}$ - энергия, расходуемая на преодоление сил инерции жидкости и сил сопротивления среды:

$$N_{\text{п}} = N_{\text{р}} \left(1 + \frac{K_1}{K_N} \right),$$

где $K_1 = 3,87 \frac{h_{\text{м}}}{d_{\text{м}}}$ - коэффициент, учитывающий преодолеваемые мешалкой при пуске силы инерции; $h_{\text{м}}$ - высота мешалки, м.

Мощность двигателя:

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{р}} (1 + \sum N_{\text{доп}}),$$

где $\sum N_{\text{доп}}$ - сумма дополнительных затрат мощности на преодоление сопротивления, вызванного шероховатостью стенок аппарата, сопротивления приборов в аппарате, сопротивления передач от двигателя к мешалке.

Псевдооживление – способ взаимодействия газа или слоя сыпучего мелкозернистого материала, при котором входящий поток газа, продуваемый через слой, приводит зернистый материал в легкоподвижное состояние, подобное кипящей жидкости.

Применение процесса псевдооживления:

- химические процессы (каталитический крекинг нефтепродуктов, гетерогенные каталитические реакции);
- физические и физико-химические процессы (сушка материалов, сублимационная очистка веществ, абсорбция и адсорбция, растворение и кристаллизация);
- механические процессы (гранулирование, смешение, транспортировка зернистых материалов).

Преимущества метода псевдооживления.

1. Интенсивное перемешивание твердой фазы, приводящее к выравниванию полей температур.
2. Высокие значения коэффициентов теплообмена и массообмена.
3. Возможность организации непрерывных процессов.
4. Простота конструкций аппаратов.

Недостатки метода псевдооживления.

1. Невозможность повышения скорости газа сверх значения, соответствующего верхней границе существования кипящего слоя.
2. Выравнивание температур и концентраций в слое приводит к снижению движущей силы процесса.
3. Изменение свойств твердых частиц (истирание, раскалывание, слипание).

4. Эрозия аппаратуры, вследствие истирания стенок аппарата.
5. Возникновение в слое заряда статического электричества.

Типы зернистых слоев.

I. Неподвижный слой - псевдооживленный агент фильтруется через слой неподвижного материала. Скорости оживляющего агента невелики, зернистый слой лежит на решетке. С увеличением скорости газа увеличивается сила трения газа о твердые частицы, давление слоя на решетку уменьшается. Гидравлическое сопротивление слоя увеличивается, высота слоя не изменяется.

II. Псевдооживленный слой (кипящий слой) – при дальнейшем увеличении скорости газа уменьшаются силы сцепления между частицами. Частицы приобретают хаотическое движение. Гидравлическое сопротивление слоя не изменяется, высота слоя увеличивается. Пределы существования кипящего слоя строго ограничены.

1. Однородный кипящий слой – возможен при псевдооживлении твердых частиц в потоке капельной жидкости. Частицы равномерно распределены по объему аппарата. При увеличении скорости газа увеличивается только высота слоя. Жидкость движется в свободном объеме между частицами сплошным потоком.

2. Неоднородный кипящий слой – возникает в системе газ-твердое, при этом газ движется через слой в виде пузырей.

3. Кипящий слой с поршнеобразованием – возникает по мере увеличения скорости в неоднородном слое. При этом газовые пузыри сливаются и перекрывают все сечение аппарата, частицы двигаются слоями.

4. Кипящий слой с каналообразованием – возникает при больших скоростях газа и малом соотношении высоты аппарата и диаметра аппарата, либо при малых диаметрах частиц, склонных к слипанию. В слое образуются сквозные каналы, по которым движется большая часть газа.

5. Фонтанирующий слой – поток газа или жидкости прорывается по одному каналу, возникающему вблизи оси аппарата, является предельным случаем каналообразования.

III. Пневмотранспорт – при достижении второй критической скорости (скорости уноса) материал начинает выноситься из слоя вместе с несущим потоком.

Кривые псевдооживления – зависимости гидравлического сопротивления и высоты зернистого слоя от фиктивной скорости оживляющего

агента $\Delta p = f(w_{\phi})$, $H = f(w_{\phi})$, характеризующие состояние двухфазной

системы псевдооживленного слоя.

Основные характеристики псевдооживленного слоя.

1. Гидравлическое сопротивление кипящего слоя – отношение веса слоя G к единице площади решетки F_p :

$$\Delta p = \frac{G}{F_p} = H(1 - \varepsilon)(\rho_r - \rho_g)g = H_0(1 - \varepsilon_0)(\rho_r - \rho_g)g$$

$$\text{или } \Delta p = \lambda \frac{H w_k \rho}{d_3^2},$$

где H_0 и ε_0 - высота (м) и порозность неподвижного слоя (для насыпного

слоя $\varepsilon_0 = 0,38 \div 0,42$); H и ε - высота (м) и порозность кипящего слоя; λ -

коэффициент гидравлического сопротивления слоя, оценивает

сопротивление вследствие трения о поверхность твердых частиц,

сужений, расширений и извилистости каналов; $d_3 = \frac{4\varepsilon}{\sigma}$ - эквивалентный

диаметр каналов кипящего слоя, м; σ - удельная поверхность слоя

материала, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $w_k = \frac{w_\phi}{\varepsilon}$ - скорость газа в каналах между частицами,

м/с; $w_{\phi} = \frac{V_{\Gamma}}{F_{\text{сл}}}$ - фиктивная скорость оживающего агента, м/с; V_{Γ} -

объемный расход оживающего агента, м³/с; $F_{\text{сл}}$ - площадь поперечного

сечения слоя, м².

2. Порозность – доля свободного объема в слое, при образовании кипящего

слоя и его развитии возрастает, в условиях пневмотранспорта стремится к

единице.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{сл}} - V_{\text{ТВ}}}{V_{\text{сл}}} = \frac{V_{\text{СВ}}}{V_{\text{сл}}} \text{ или } \varepsilon = \left(\frac{18\text{Re} + 0.36\text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0.21},$$

где $V_{\text{сл}}, V_{\text{ТВ}}, V_{\text{СВ}}$ - объем слоя, твердых частиц и свободный объем (объем

пустот между частицами в кипящем слое), соответственно, м³;

$Ar = \frac{gd_{тэ}^3}{\nu^2} \frac{\rho_t - \rho_g}{\rho_g}$ – критерий Архимеда; ρ_g - плотность ожижающего агента,

кг/м³; ρ_t - плотность твердых частиц, кг/м³; ν - кинематический

коэффициент вязкости газа, м²/с; $d_{тэ}$ – эквивалентный диаметр твердых

частиц, м.

3. Высота кипящего слоя:

$$H = H_0 \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon},$$

где $H_0 = \frac{M}{\rho_{нас} S}$ - высота неподвижного слоя, м; M – масса твердого

материала, кг; $\rho_{нас}$ - насыпная плотность материала, кг/м³; S – площадь

поперечного сечения аппарата, м².

4. Первая критическая скорость псевдооживления – скорость начала

псевдооживления $w_{пс}$, определяется из критического значения критерия

Рейнольдса $Re_{пс}$:

$$Re_{пс} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \rightarrow w_{пс} = \frac{\mu_{г} \cdot Re_{пс}}{d_{тэ}\rho_{г}},$$

где $\mu_{г}$ - динамический коэффициент вязкости оживляющего агента, Па·с; $d_{тэ}$ - эквивалентный диаметр твердых частиц, м.

5. Вторая критическая скорость псевдооживления – скорость уноса $w_{ун}$,

определяется из критического значения критерия Рейнольдса $Re_{ун}$:

$$Re_{ун} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \rightarrow w_{ун} = \frac{\mu_{г} \cdot Re_{ун}}{d_{тэ}\rho_{г}}.$$

6. Рабочая скорость – скорость существования кипящего слоя $w_{пс} < w_{р} < w_{ун}$:

$$Re_{р} = \frac{Ar \cdot \epsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4,75}}} \rightarrow w_{р} = \frac{\mu_{г} \cdot Re_{р}}{d_{тэ}\rho_{г}}.$$

Определить критические и рабочую скорости можно также с помощью зависимости $Lu=f(Ar, \epsilon)$ – график Лященко.

Критерий Лященко характеризует соотношение сил инерции, тяжести и подъемной силы:

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{w_{\phi}^3 \rho_{\Gamma}^2}{\mu_{\Gamma} (\rho_{\Gamma} - \rho_{\Gamma}) g}$$

7. Число псевдооживления - отношение рабочей скорости к первой критической скорости:

$$K_w = \frac{w_p}{w_{пс}}$$

K_w изменяется в следующих пределах $K_w = 1 \div \frac{w_{ун}}{w_{пс}}$.

8. Коэффициент раздутия слоя – отношение объемов псевдооживленного $V_{кc}$ и неподвижного V_0 слоя твердого материала:

$$K_v = \frac{V_{кc}}{V_0}$$

коэффициент раздутия с порозностью слоя связан соотношением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_0}{K_v}$$

9. Коэффициент формы частицы – отношение площади поверхности частицы f_{ϕ} любой произвольной формы к площади поверхности $f_{ш}$ шарообразной частицы при условии равенства их объемов:

$$\phi_{\phi} = \frac{f_{ш}}{f_{\phi}}$$

Классификация конструкций аппаратов псевдооживления.

I. По способу действия:

1. Периодического действия.
2. Непрерывного действия.

II. По числу секций в аппарате:

1. Односекционные.
2. Многосекционные (с горизонтальным и вертикальным расположением секций).

III. По форме корпуса:

1. Цилиндрические (например, аппараты с мешалками).
2. Цилиндрикоконические (например, аппарат с фонтанирующим слоем).

Целью расчета аппаратов кипящего слоя является определение основных габаритных размеров аппарата: диаметра D и высоты $H_{ап}$, при

заданных характеристиках материала (ρ_T, d_T), ожижающего агента (ρ_G, μ_G, V_G) и

производительности аппарата:

$$D = \sqrt{\frac{V_G}{0,785w_p}};$$
$$H_{\text{ап}} = H + H_{\text{сеп}},$$

где $H_{\text{сеп}} \approx 4H$ – высота сепарационного пространства, м.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте понятие неоднородной системы.
2. Приведите классификацию неоднородных систем.
3. Перечислите основные цели процесса разделения неоднородных систем.
4. Дайте классификацию методам разделения неоднородных систем.
5. Запишите материальный баланс процесса разделения по общему количеству вещества.
6. Как определяется скорость свободного осаждения твердых частиц?
7. Каков порядок расчета скорости осаждения по методу Лященко?
8. Что является целью расчета отстойников?
9. Какие существуют способы контакта запыленного газа с жидкостью?
10. Дайте понятия фильтрата и осадка.
11. Что является движущей силой процесса фильтрования и какие существуют способы ее создания?
12. Запишите дифференциальное уравнение фильтрования и сформулируйте физический смысл входящих в него величин.
13. Приведите классификацию конструкций фильтров.
14. Что является целью расчета периодически действующих фильтров?
15. Что является целью расчета непрерывно действующих фильтров?
16. В чем заключается сущность метода электроосаждения?
17. Как определить скорость свободного электроосаждения?
18. Напишите формулу, по которой определяется скорость центробежного осаждения при ламинарном режиме.
19. Что является целью расчета циклонов?
20. Что такое фактор разделения процесса центробежного осаждения?
21. Перечислите основные способы перемешивания.
22. Дайте определения интенсивности и эффективности процесса перемешивания.
23. Назовите типы механических мешалок.
24. Каким образом проводится расчет рабочей и пусковой мощностей механической мешалки?

25. Запишите основное критериальное уравнение процесса перемешивания с модифицированными критериями подобия.
26. Перечислите достоинства и недостатки кипящего слоя.
27. Какие существуют разновидности псевдооживленного слоя?
28. Как рассчитать критические и оптимальную рабочие скорости процесса псевдооживления?
29. Что является целью расчета аппаратов с псевдооживленным слоем?

6. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

6.1. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОТЫ

Тепловыми называются **процессы**, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты (нагревание, охлаждение, испарение, конденсация и др.).

Движущей силой тепловых процессов является разность температур более нагретого и менее нагретого тела.

Теплообменные аппараты – аппараты, в которых протекают тепловые процессы.

Различают **три способа переноса теплоты**: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность – перенос тепла вследствие беспорядочного (теплого) движения микрочастиц, непосредственно соприкасающихся друг с другом.

Температурное поле – совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемого пространства. Если температура изменяется лишь в пространстве и не изменяется во времени $t = f(x, y, z)$ или $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, то температурное поле будет **стационарным**, в случае изменения температуры, как в пространстве, так и во времени $t = f(x, y, z, \tau)$ температурное поле называется **нестационарным**.

Изотермическая поверхность – поверхность равных температур.

Температурный градиент – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный частной производной от температуры по этому направлению:

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} .$$

Тепловой поток – количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность

$$Q' = \frac{Q}{\tau} ,$$

где Q – количество теплоты, Дж; τ – время, с; Q' – тепловой поток, Вт.

Плотность теплового потока (удельный тепловой поток) - количество теплоты, прошедшее через единицу поверхности в единицу времени:

$$q = \frac{Q}{F\tau} = \frac{Q'}{F},$$

где F – площадь поверхности, м^2 ; q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Закон Фурье - количество тепла dQ , передаваемое посредством теплопроводности через элемент поверхности dF , перпендикулярный тепловому потоку, за время $d\tau$ прямо пропорционально температурному градиенту $\frac{\partial t}{\partial n}$ поверхности dF и времени $d\tau$:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau \quad \text{или} \quad q = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}.$$

Знак «-» в уравнении указывает на то, что направление теплового потока противоположно вектору температурного градиента.

Коэффициент теплопроводности λ показывает, какое количество тепла проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на 1 град на единицу длины нормали к изотермической поверхности:

$$[\lambda] = \left[\frac{dQ \partial n}{\partial t dF d\tau} \right] = \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{град} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right].$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности в неподвижной среде в случае неустановившегося процесса определяет распределение температур в любой точке тела, через которое тепло передается теплопроводностью:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad \text{или} \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t.$$

Коэффициент температуропроводности a характеризует теплоинерционные свойства тела: при прочих равных условиях быстрее нагреется то тело, которое обладает большим коэффициентом температуропроводности:

$$[a] = \left[\frac{\lambda}{c\rho} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right].$$

Уравнение теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплообмена:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}) F \tau,$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала стенки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; δ – толщина стенки, м ; $t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}$ - разность температур поверхностей стенки, $^{\circ}\text{C}$; F – поверхность стенки, м^2 ; τ – время, с .

Если плоская стенка состоит из n -слоев с различной теплопроводностью и толщиной, то при установившемся процессе через каждый слой пройдет одно и то же количество тепла:

$$Q = \frac{(t_{ct1} - t_{ct2})F\tau}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

где i – порядковый номер слоя; n – число слоев; $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – сумма термических сопротивлений отдельных слоев стенки, $m^2 \cdot K/Вт$.

Уравнение теплопроводности цилиндрической стенки при установившемся процессе теплообмена:

а) однослойной

$$Q = \frac{2\pi l \tau (t_{ct1} - t_{ct2})}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}};$$

б) многослойной

$$Q = \frac{2\pi l \tau (t_{ct1} - t_{ct2})}{\sum \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}},$$

где l – длина стенки, м; d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м; i – номер слоя.

Конвекция – перенос теплоты, осуществляемый за счет перемещения потоков жидкости или газа в объеме. В зависимости от причины, вызывающей это перемещение, различают свободную и вынужденную конвекцию. Свободная **конвекция** предполагает перемещение жидкости или газа, вызванное разностью плотностей в различных точках пространства вследствие различия температур. При **вынужденной конвекции** перемещение потоков жидкости или газа происходит вследствие затраты механической энергии.

Конвективный теплообмен – теплообмен, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности.

Теплоотдача – конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью (стенкой).

Количество тепла, переданное в процессе теплоотдачи, определяется по **уравнению Ньютона**: количество теплоты Q , отдаваемое за время τ поверхностью стенки F , имеющей температуру t_{ct} , жидкости с температурой $t_{ж}$, прямо пропорционально разности температур стенки и жидкости, поверхности теплообмена и времени:

$$Q = \alpha(t_{ct} - t_{ж})F\tau.$$

Коэффициент теплоотдачи α – характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 градус (К):

$$[\alpha] = \left[\frac{Q}{F(t_{ct} - t_{ж})} \right] = \left[\frac{Дж}{m^2 \cdot c \cdot K} \right] = \left[\frac{Вт}{m^2 \cdot K} \right].$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов: вида и режима движения жидкости, ее физических свойств, размеров и формы стенки, шероховатости стенки. Определение α является основной задачей расчета теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют из критериальных уравнений, полученных преобразованием дифференциальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена методами теории подобия.

Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена Фурье—Кирхгофа, выражает распределение температур во всех точках движущейся среды:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_y \frac{\partial t}{\partial y} + W_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \nabla^2 t,$$

где $\frac{\partial t}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_y \frac{\partial t}{\partial y} + W_z \frac{\partial t}{\partial z}$ - субстанциальная производная температуры

по времени, включает локальную $\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)$ и конвективную

$\left(W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_y \frac{\partial t}{\partial y} + W_z \frac{\partial t}{\partial z}\right)$ составляющие.

В неподвижной среде при установившемся тепловом режиме вся левая часть уравнения обращается в нуль, и оно принимает вид:

$$\nabla^2 t = 0 \text{ или } \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) = 0.$$

Интегрированием последнего выражения можно получить картину распределения температур в твердом теле.

Обобщенное критериальное уравнение конвективного теплообмена имеет вид:

$$Nu = f(Fo, Re, Pr, Gr, \Gamma, \dots),$$

выбирается с учетом гидродинамических условий протекания данного процесса.

$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ - **критерий Нуссельта**, характеризующий подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости;

$Fo = \frac{a\tau}{l^2}$ - **критерий Фурье**, равенство критериев Фурье в сходных точках является необходимым условием подобия неустановившихся процессов теплообмена;

$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{wl\rho}{\mu}$ - **критерий Рейнольдса**, который характеризует гидродинамический режим потока при вынужденном движении и является мерой соотношения сил инерции и вязкого трения;

$Pr = \frac{v}{a} = \frac{c\mu}{\lambda}$ - **критерий Прандтля**, который характеризует физико – химические свойства теплоносителя и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке;

$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ - **критерий Грасгофа**, характеризующий соотношение сил вязкого трения и подъемной силы, описывает режим свободного движения теплоносителя;

$\Gamma_i = \frac{l_i}{l}$ - **безразмерный геометрический симплекс**, характеризующий геометрическое подобие системы.

В выражении этих критериев: $\nu = \mu/\rho$ - кинематический коэффициент вязкости теплоносителя, м²/с; w - скорость движения теплоносителя, м/с; a – коэффициент теплопроводности, м²/с; g – ускорение свободного падения м/с²; l – определяющий размер, м; l_i - характерный размер, м; β – коэффициент температурного расширения, 1/К; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; $\Delta t = t_{ст} - t_{ж}$ – температурный напор между стенкой и теплоносителем, °С; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; τ – время процесса, с.

Определяющий размер – характерный геометрический размер системы, входящий в критерии подобия (чаще всего высота вертикальной поверхности теплообмена или эквивалентный диаметр канала).

Определяющая температура – температура, по которой находятся все физические константы жидкости, входящие в критерии подобия. Обычно это средняя по поверхности теплообмена температура жидкости или средняя температура пограничного слоя.

Частные случаи конвективного теплообмена

1. Свободное движение теплоносителя (естественная конвекция)

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n (Pr/Pr_{ст})^{0,25},$$

где $Pr_{ст}$ - критерий Прандтля для теплоносителя при температуре стенки.

Значение коэффициента C и показатель стенки " n " зависит от режима и определяется из таблицы 4.

Таблица 4

Значение коэффициента C и показателя стенки n

Режим	$Gr \cdot Pr$	C	n
Ламинарный	$1 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Переходный	$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентный	$2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{12}$	0,185	0,33

2. Вынужденное движение жидкости в прямых трубах и каналах.

а) ламинарный режим $Re \leq 2320$

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25};$$

б) турбулентный режим $Re \geq 10000$

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25};$$

в) переходный режим $2320 \leq Re < 10000$

$$Nu = C \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}.$$

Коэффициент C находится из таблиц или графиков в зависимости от величины критерия Рейнольдса.

3. Теплоотдача при конденсации пара.

Конденсация – процесс фазового перехода из парообразного состояния в жидкое. В теории теплообмена важное значение имеет конденсация водяного пара и паров органических растворителей на поверхностях. Наиболее часто на практике встречается случай, когда образующийся конденсат стекает по поверхности в виде пленки - **пленочная конденсация**. Если конденсат не смачивает поверхность, а покрывает ее в виде отдельных капель – **капельная конденсация**.

Коэффициент теплоотдачи в случае пленочной конденсации может быть рассчитан из уравнения:

$$Nu = C(Ga \cdot Pr \cdot K)^n.$$

$K = \frac{r}{c\Delta t}$ - **критерий конденсации**, характеризует изменение агрегатного состояния теплоносителя и является мерой соотношения теплового потока, затрачиваемого на фазовое превращение, к теплоте перегрева или переохлаждения фазы при температуре ее насыщения $t_{нас}$;

$Ga = \frac{g l^3 \rho^2 g^2}{\mu^2}$ - **критерий Галилея**, является мерой отношения сил тяжести и сил вязкого трения в потоке.

Постоянные C и n зависят от расположения греющей поверхности (горизонтальная или вертикальная) и режима стекания конденсатной пленки. Для горизонтальной одиночной трубы уравнение принимает вид:

$$\alpha = 0,72 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r q}{\mu \Delta t d}} \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К},$$

для вертикальных труб:

$$\alpha = 1,15 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r q}{\mu \Delta t H}} \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К},$$

где λ , ρ , μ – теплопроводность, плотность, динамическая вязкость конденсата при средней температуре конденсатной пленки, соответственно; r – теплота парообразования при температуре насыщения; d – диаметр трубы; H – высота трубы; $\Delta t = t_{\text{нас}} - t_{\text{ст}}$.

Кипение – процесс образования пара внутри всей массы жидкости. Кипение может быть пузырьковым или пленочным. **Пузырьковое** кипение наблюдается при небольших температурных перепадах и сопровождается образованием пузырьков пара в отдельных участках стенок аппаратов. При увеличении температурного перепада число паровых пузырьков увеличивается, они сливаются между собой и кипение переходит в **пленочное**.

Переход пузырькового кипения в пленочное называют **кризисом кипения**, а соответствующее значение температурного перепада – **критическим**.

Тепловое излучение – процесс распространения электромагнитных колебаний с различной длиной волн, обусловленный тепловым движением атомов или молекул излучающего тела.

Абсолютно черное тело – тело, которое полностью поглощает все падающие на него лучи.

Абсолютно белое тело – тело, отражающее все падающие на него лучи.

Абсолютно прозрачное тело – тело, пропускающее все падающие на него лучи.

Закон Стефана – Больцмана: количество энергии, излучаемой телом, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры его поверхности

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

ε – степень черноты тела, $\varepsilon = \frac{C}{C_0}$; C – коэффициент излучения данного тела.

Закон Кирхгофа: отношение лучеиспускательной способности любого тела к его лучепоглощательной способности при той же температуре является величиной постоянной, равной лучеиспускательной способности абсолютно черного тела:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_n}{A_n} = \frac{E_0}{A_0} = E_0 = f(T).$$

Количество тепла $Q_{\text{л}}$, передаваемого посредством излучения от более нагретого твердого тела, к менее нагретому телу определяется следующим образом:

$$Q_{\text{л}} = C_{1-2} F \tau \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \phi,$$

где C_{1-2} – коэффициент взаимного излучения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; F – площадь поверхности излучения, м^2 ; T_1 , T_2 – абсолютные температуры поверхностей более нагретого и менее нагретого тел, К ; ϕ – средний угловой коэффициент,

который определяется формой и размерами участвующих в теплообмене поверхностей, их взаимным расположением в пространстве и расстоянием между ними.

Теплопередача – процесс перехода теплоты от нагретой жидкости (газа, пара) к холодной через разделяющую их стенку.

Основное уравнение теплопередачи:

для стационарного режима

$$Q = KF\Delta t_{cp};$$

нестационарного режима

$$Q = KF\Delta t_{cp} \tau,$$

где Q – количество теплоты, переданное в процессе теплопередачи, Вт (Дж); F – поверхность теплообмена, m^2 ; Δt_{cp} – движущая сила процесса теплопередачи, $^{\circ}C$; τ – время, с; K – коэффициент теплопередачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество тепла переходит в единицу времени от более нагретого к менее нагретому теплоносителю через разделяющую их стенку поверхностью $1 m^2$ при разности температур между теплоносителями $1K$.

При передаче тепла через **однослойную плоскую стенку**, коэффициент теплопередачи рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Для **многослойной стенки**, состоящей из n слоев:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, горячего теплоносителя к разделяющей стенке и от стенки к холодному теплоносителю,

$Вт/(m^2 \cdot K)$; $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \left(r_{заг.1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + r_{заг.2} \right)$ – сумма термических сопротивлений,

$m^2 \cdot K/Вт$; $r_{заг.1}$, $r_{заг.2}$ – термические сопротивления загрязнений внутренней и наружной стенки теплообменной трубки, $(m^2 \cdot K)/Вт$; $\delta_{ст}$ – толщина стенки теплообменной трубки, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки теплообменной трубки, $Вт/(m \cdot K)$.

Средняя движущая сила процесса теплопередачи при прямоточном и противоточном движении теплоносителей:

$$\text{если } \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}} \leq 2, \quad \text{то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\mu}}{2},$$

$$\text{если } \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}} < 2, \quad \text{то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln(\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\mu})}.$$

где Δt_{δ} и Δt_m – разность температур теплоносителей на концах теплообменника.

Средняя движущая сила процесса теплопередачи при перекрестном и смешанном токе теплоносителей:

$$\Delta t'_{cp} = \Delta t_{cp} \varepsilon_{\Delta t},$$

где $\varepsilon_{\Delta t} < 1$ – поправочный множитель, учитывающий соотношение перепадов температур теплоносителей и степень нагрева более холодного теплоносителя.

Целью расчета теплообменного аппарата является определение поверхности теплопередачи и выбор типа аппарата.

Поверхность теплопередачи определяется из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t'_{cp}}.$$

Тепловая нагрузка Q определяется из уравнений теплового баланса:

$$Q = G_1(I_{1н} - I_{1к}) = G_2(I_{2н} - I_{2к})$$

где G_1, G_2 – расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с; $I_{1н}, I_{1к}$ – начальная и конечная энтальпии горячего теплоносителя, Дж/кг; $I_{2н}, I_{2к}$ – начальная и конечная энтальпии холодного теплоносителя, Дж/кг.

Если теплообмен протекает без изменения агрегатного состояния теплоносителей, то уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2н} - t_{2к}),$$

где c_1, c_2 – удельные теплоемкости теплоносителей, отвечающие среднеарифметическим температурам, Дж/(кг·К); $t_{1н}, t_{1к}$ – начальная и конечная температуры горячего теплоносителя, К; $t_{2н}, t_{2к}$ – начальная и конечная температуры холодного теплоносителя, К.

В случае использования перегретого пара его энтальпия складывается из тепла, отдаваемого паром при охлаждении от температуры t_p до температуры насыщения $t_{нас}$, тепла конденсации пара и тепла выделяющегося при охлаждении конденсата:

$$Q = G(I_{1п} - I_{1к}) = G c_p (t_p - t_{нас}) + Gr + G c_k (t_{нас} - t_k),$$

где $I_{1п}$ – энтальпия перегретого пара, Дж/кг; G – расход пара, кг/с; r – теплота конденсации, Дж/кг; c_p, c_k – удельные теплоемкости пара и конденсата, Дж/(кг·К); t_k – температура конденсата на выходе из аппарата, °С.

Тепловая изоляция – покрытие из теплоизоляционных материалов, способствующее уменьшению потерь тепла (или холода) от горячих (или сильно охлажденных стенок в окружающую среду).

Теплоизоляционные материалы – материалы, обладающие низкими [ниже 0,2 Вт/(м·К)] коэффициентами теплопроводности (пробка, асбест, шлаковая вата, совелит, зонолит, вермикулит и другие).

6.2. НАГРЕВАНИЕ (ОХЛАЖДЕНИЕ) ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Процессы нагревания (охлаждения) жидкостей и газов осуществляются в разнообразной **теплообменной аппаратуре**.

Теплообменники – аппараты для передачи теплоты от одних сред (горячих теплоносителей) к другим (холодным теплоносителям).

Классификация теплообменников

I. Поверхностные теплообменники – перенос теплоты между теплоносителями происходит через разделяющую их стенку:

1. Кожухотрубчатые теплообменники – состоят из пучка труб, помещенного внутрь цилиндрического корпуса (обечайки). Трубы завальцованы в трубных решетках или приварены к ним. Кожухотрубчатые теплообменники бывают одно – и многоходовые (по пути движения теплоносителя в трубах), выполняются с перегородками в трубном пространстве или без них. Для **компенсации температурных деформаций**, возникающих вследствие различного температурного удлинения труб и корпуса, применяют теплообменники с **плавающей головкой** (одна трубная решетка свободно перемещается в корпусе, другая жестко закреплена) с **U – образными трубками**, с **линзовыми компенсаторами**.

2. Спиральные теплообменники, состоящие из двух спиральных каналов, навитых из рулонного металла вокруг центральной перегородки (керна). Спирали образуют каналы прямоугольного сечения, боковыми стенками которых служат торцевые крышки.

3. Пластинчатые теплообменники состоят из набора гофрированных пластин, разделенных (гофрированными) прокладками. Пластины и прокладки образуют изолированные герметичные каналы для встречного движения двух теплоносителей.

4. Оребренные теплообменники имеют оребренную поверхность со стороны теплоносителя с низким значением коэффициента теплоотдачи (газы, жидкости с высокой вязкостью), что позволяет значительно повысить тепловые нагрузки аппаратов.

5. Теплообменники типа «труба в трубе» состоят из ряда последовательных элементов, образуемых двумя соосными трубами разных диаметров. Один из теплоносителей движется по внутренней трубе, а второй в кольцевом пространстве между трубами.

II. Теплообменники смешения – теплота передается от одной среды к другой при непосредственном их соприкосновении.

III. Регенеративные теплообменники – нагрев жидких сред происходит за счет их соприкосновения с ранее нагретыми твердыми телами.

IV. Специальные типы теплообменников: оросительные и погружные теплообменники, теплообменные аппараты со встроенными змеевиками и аппараты с рубашками, блочные и шнековые теплообменники.

Выбор **греющих агентов** обусловлен требуемой температурой нагрева холодной среды (табл.5).

Таблица 5

Греющие агенты и температура нагреваемой среды	
Интервалы температур, °С	Способ нагрева

до 200	Горячая вода, водяной пар (глухой и острый)
200 – 500	Высокотемпературные теплоносители, индукционный обогрев
500 – 1000	Дымовые газы
1000 – 3000	Электрические печи сопротивления, дуговые печи

Промежуточные теплоносители – вещества, циркулирующие в замкнутом контуре и служащие для переноса тепла (холода) от источника тепла (холода) нагреваемой (охлаждаемой) системе (табл.6).

Таблица 6

Классификация промежуточных теплоносителей

Назначение	Тип теплоносителя
Охлаждение до -20°C	Холодильные рассолы
Нагревание до 200°C	Вода, водяной пар
Нагревание от 200 до 400°C	Высокотемпературные органические теплоносители, высокотемпературные неорганические теплоносители
Нагревание до температуры выше 400°C	Жидко – металлические теплоносители

Холодильные рассолы – растворы хлоридов натрия, кальция или магния различной концентрации, имеющие температуру затвердевания от -20 до 45°C . Применяются для переноса холода от испарителя холодильной установки к охлажденному объекту.

Высокотемпературные органические теплоносители (ВОТ) представляют собой органические соединения и их смеси с высокими (до 400°C) температурами кипения, ВОТ используют обычно в жидком виде с принудительной циркуляцией вдоль поверхности нагрева. Наиболее распространенными ВОТ являются дифенил, дифениловый эфир и смесь этих соединений.

Высокотемпературные неорганические теплоносители могут применяться в жидком, реже в парообразном виде. Это соли и их эвтектические смеси (например, $53\% \text{KNO}_3 + 40\% \text{NaNO}_2 + 7\% \text{NaNO}_3$ – нитрит-нитратная смесь), кремний-органические жидкости и др.

Жидкометаллические теплоносители – легкоплавкие металлы и их сплавы, применяемые в жидком или парообразном состояниях. К ним относятся щелочные металлы (Na, K) и их сплавы на основе свинца и олова.

6.3. ИСКУССТВЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Процессы искусственного охлаждения условно подразделяются на две группы: умеренное охлаждение (до температуры -100°C) и глубокое охлаждение (до температуры ниже -100°C).

Умеренное охлаждение – осуществляют с помощью компрессионных и реже абсорбционных холодильных машин. В **компрессионных холодильных**

машинах в качестве холодильных агентов используют низкокипящие жидкости (аммиак, фреоны, углекислоту, этилен и т.д.), способные интенсивно испаряться при температурах ниже 0°C , а затем, после предварительного сжатия, снова превращаться в жидкость при обычных температурах (например, при охлаждении воздухом или водой). Сжатие паров холодильного агента производят в поршневых компрессорах или турбокомпрессорах.

В основе работы компрессионных машин лежат холодильные циклы. Обычно холодильный цикл включает следующие термодинамические процессы: адиабатическое сжатие влажных, насыщенных или перегретых паров холодильного агента в компрессоре, изобарное охлаждение, конденсацию паров и переохлаждение конденсата в конденсаторе, дросселирование холодильного агента до начального давления, испарение его в испарителе с отнятием теплоты у охлаждаемой среды. Степень совершенства холодильного цикла определяется удельной холодопроизводительностью и холодильным коэффициентом.

Удельная холодильная мощность q_0 - количество теплоты, отнятое одним килограммом холодильного агента у охлаждаемой среды в испарителе.

Холодильный коэффициент – величина, показывающая, какое количество теплоты отбирается у охлаждаемой среды на единицу затраченной работы:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l}$$

В абсорбционных холодильных машинах роль компрессора выполняют два аппарата: кипятильник и абсорбер. Раствор аммиака в воде кипит в кипятильнике при повышенном давлении P_2 . Выделяющийся аммиак используют для получения холода, как и в компрессионных машинах, но после испарителя пары аммиака поглощаются при низкой температуре и давлении P_1 в абсорбере. Концентрированный раствор из абсорбера насосом подается в кипятильник. Холодильный коэффициент равен отношению холодопроизводительности к теплоте, подводимой к кипятильнику:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q_k}$$

Достоинством абсорбционных холодильных установок является возможность утилизации дешевой тепловой энергии, например отработанного водяного пара.

Глубокое охлаждение используется для сжижения газов и разделения газовых смесей (получение жидких газов, разделение воздуха на азот и кислород методом низкотемпературной ректификации). Рабочими телами в процессах глубокого охлаждения служат сами сжижаемые газы. Понижение температуры достигается либо изохорно (дросселирование), либо адиабатическим расширением с отдачей внешней работы или сочетанием обоих методов.

Дросселирование – изоэнтальпийное расширение газа без совершения работы при прохождении через специальное устройство (дроссельный клапан, дроссельная шайба).

Дифференциальный дроссельный эффект – изменение температуры газа при бесконечно малом изменении его давления:

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_{i=\text{const}} .$$

Если температура газа при дросселировании понижается, α_i считают положительным, если повышается – отрицательным. Изменение температуры газа при его дросселировании от давления P_1 до давления P_2 определяется по формуле:

$$T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \alpha_i dP .$$

При **адиабатическом расширении** холодильный агент совершает работу за счет внутренней энергии, и его температура понижается. Изменение температуры при дросселировании и адиабатическом расширении легко определить используя диаграммы состояния (T - S , i - S , P - i) рабочих тел. По этим же диаграммам удобно проводить расчет холодильных процессов.

Циклы глубокого охлаждения, применяемые в промышленности, можно разделить на три группы: 1) циклы с дросселированием газа; 2) циклы с адиабатическим расширением газа; 3) комбинированные циклы. Наиболее экономичными являются комбинированный цикл высокого давления Гейландта и цикл Капицы низкого давления с турбодетандером.

6.4. КОНДЕНСАЦИЯ ПАРОВ

Конденсацию паров часто используют в основных химико-технологических процессах (например: при выпаривании, вакуум-сушке и др.) для создания разрежения. Пары, подлежащие конденсации, обычно отводят из аппарата, где они образуются, в отдельный аппарат – **конденсатор**, охлаждаемый водой или воздухом. По способу охлаждения различают **конденсаторы смешения и поверхностные конденсаторы**.

В **конденсаторах смешения** пар непосредственно соприкасается с охлаждающей водой, а конденсат смешивается с ней. Конденсаторы смешения делятся на **сухие** и **мокрые**. В мокрых конденсаторах вода, конденсат и газы откачиваются одними и теми же вакуум-насосами. В сухих **барометрических конденсаторах** вода и конденсат удаляются совместно самотеком через барометрическую трубку, столб жидкости в которой уравнивает барометрическое давление, а газы откачиваются отдельно с помощью сухого вакуум-насоса. Достоинствами барометрических конденсаторов являются простота устройства и экономичность в эксплуатации.

В **поверхностных конденсаторах** теплота отнимается у конденсирующегося пара через стенку. Получаемый конденсат и охлаждающий

агент отводят из конденсатора отдельно, и конденсат, если он представляет ценность, может быть использован.

6.5. ВЫПАРИВАНИЕ

Выпаривание – термический процесс концентрирования жидких растворов нелетучих веществ путем частичного удаления растворителя из всего объема раствора при кипении жидкости.

Области применения процесса выпаривания: в химической промышленности для концентрирования водных растворов щелочей (NaOH, KOH), солей (NaCl, Na₂SO₄, NH₄NO₃ и др.), некоторых высококипящих жидкостей (концентрированной серной кислоты и др.), в пищевой промышленности для выпаривания сахарных растворов.

Классификация выпарных установок.

I. По выбору давления:

1. Под разрежением.
2. Под атмосферным давлением.
3. Под повышенным давлением.

II. По числу корпусов:

1. Однокорпусные – установка состоит из одного аппарата, в котором в виде греющего агента выступает первичный пар, вторичный пар образуется при выпаривании кипящего раствора.

2. Многокорпусные - установка состоит из нескольких выпарных аппаратов, в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса направляется в качестве греющего в последующий корпус, первичным паром обогревается только первый корпус.

III. По относительному движению греющего пара и выпариваемого раствора:

1. Прямоточные – для растворов, обладающих высокой температурной депрессией.
2. Противоточные – для растворов с быстрорастущей вязкостью при повышении их концентрации, с самостоятельным питанием корпусов, со смешанным питанием корпусов.

IV. По наличию отборов вторичного пара из аппаратов:

1. Без отбора вторичного пара.
2. С отбором пара на подогрев раствора в самой установке или для отпуска вторичного – **экстра-пара** постороннему потребителю.

V. Выпаривание с использованием тепловых насосов (компрессоров, эжекторов), которые служат для увеличения давления и температуры вторичного пара, что позволяет использовать его повторно в качестве греющего пара в том же аппарате. Такие установки нашли применение для выпаривания растворов с низкой температурной депрессией (обессоливание морской воды, концентрирование фруктовых соков и т.д.).

Классификация выпарных аппаратов.

I. По расположению поверхности нагрева: вертикальные, горизонтальные, наклонные.

II. По конфигурации поверхности нагрева: рубашечные, кольцевые, змеевиковые, трубчатые, ребристые.

III. По режиму циркуляции: с естественной и принудительной циркуляцией.

IV. По способу обогрева: с паровым, газовым и электрическим обогревом.

Выбор выпарных аппаратов обусловлен различием производительности, физико – химических свойств выпариваемых растворов и их коррозионным воздействием на аппаратуру, наличием в них различных примесей.

Первичный пар – греющий агент в виде водяного пара (с давлением от 0,1 до 1,2 МПа).

Вторичный пар – пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора.

Движущая сила процесса выпаривания – разность между температурой греющего пара t_{Γ} и температурой кипения раствора $t_{\text{кип}}$:

$$\Delta t_{\text{пол}} = t_{\Gamma} - t_{\text{кип}}.$$

Общая разность температур - разность между температурами первичного t_{Γ} и вторичного пара $t_{\text{вп}}$ на выходе из аппарата:

$$\Delta t_{\text{общ}} = t_{\Gamma} - t_{\text{вп}}.$$

Общая разность температур многокорпусной установки – разность между температурой первичного пара t_{Γ} и температурой вторичного пара $t_{\text{нв.п}}$, поступающего из последнего n-го корпуса в конденсатор:

$$\Delta t_{\text{общ}} = t_{\Gamma} - t_{\text{нв.п}}.$$

Общая полезная разность температур многокорпусной установки – разность между температурой первичного пара t_{Γ} и температурой вторичного пара $t_{\text{нв.п}}$, выходящего из последнего n-го корпуса в конденсатор, за вычетом суммы температурных потерь $\sum \Delta t_{\text{общ}}$ во всех корпусах:

$$\sum \Delta t_{\text{пол}} = t_{\Gamma} - t_{\text{нв.п}} - \sum \Delta t_{\text{общ}}.$$

Температурные потери – разность между общей разностью температур $\Delta t_{\text{общ}}$ и полезной разностью температур $\Delta t_{\text{пол}}$:

$$\sum \Delta t = \Delta t_{\text{общ}} - \sum \Delta t_{\text{пол}} \quad \text{или} \quad \sum \Delta t = \Delta t_{\text{тд}} + \Delta t_{\text{гд}} + \Delta t_{\text{гс}},$$

где $\Delta t_{\text{тд}}$, $\Delta t_{\text{гд}}$, $\Delta t_{\text{гс}}$ - температурная, гидростатическая и гидравлическая депрессии, соответственно, °С.

Температурная депрессия – разность между температурой кипения раствора $t_{\text{кип}}$ и температурой вторичного пара $t_{\text{вп}}$ (температура кипения чистого растворителя $t_{\text{р}}$), $\Delta t_{\text{тд}}$ имеет наибольшее значение из всех депрессий, зависит от физических свойств растворенного вещества и его концентрации в растворе:

$$\Delta t_{\text{тд}} = t_{\text{кип}} - t_{\text{р}} \quad \text{или} \quad \Delta t_{\text{тд}} = t_{\text{кип}} - t_{\text{вп}}.$$

Нормальная температурная депрессия – температурная депрессия, вычисленная при атмосферном давлении.

Уравнение Тищенко позволяет определить величину температурной депрессии $\Delta t_{\text{ТД}}^{\text{P}}$ при любом давлении:

$$\Delta t_{\text{ТД}}^{\text{P}} = f \frac{T^2}{r} \Delta t'_{\text{ТД}},$$

где T – температура кипения чистого растворителя, К; r – теплота испарения растворителя при данном давлении, кДж/кг; $\Delta t'_{\text{ТД}}$ – нормальная температурная депрессия, °С; f – поправочный коэффициент, является опытной величиной $f = \varphi(t_{\text{ВП}})$.

Гидростатическая депрессия – разность температур кипения раствора в середине слоя $t_{\text{Кип}}^{\text{CP}}$ и на его поверхности $t_{\text{Кип}}^{\text{ПОВ}}$, обусловленная гидростатическим давлением столба жидкости в аппарате (гидростатический эффект):

$$\Delta t_{\text{ГД}} = t_{\text{Кип}}^{\text{CP}} - t_{\text{Кип}}^{\text{ПОВ}}.$$

Гидравлическая депрессия – разность температур вторичного пара над раствором в выпарном аппарате $t_{\text{ВП}}$ и на входе в следующий аппарат $t'_{\text{ВП}}$, обусловленная потерей давления пара при движении его через аппарат и паропровод:

$$\Delta t_{\text{ГС}} = t_{\text{ВП}} - t'_{\text{ВП}},$$

при расчете однокорпусной установки $\Delta t_{\text{ГС}} = 0$.

Температура кипения раствора:

$$t_{\text{Кип}} = t_{\text{ВП}} + \Delta t_{\text{ТД}}^{\text{P}} + \Delta t_{\text{ГД}} + \Delta t_{\text{ГС}}.$$

Материальный баланс однокорпусной выпарной установки.

1. Общий материальный баланс:

$$W = G_{\text{Н}} - G_{\text{К}},$$

где $G_{\text{Н}}$ – расход исходного раствора, кг/с; $G_{\text{К}}$ – расход упаренного раствора, кг/с; W – производительность аппарата по испаряемой воде (расход вторичного пара), кг/с.

2. Баланс по растворенному веществу:

$$G_{\text{Н}} x_{\text{Н}} = G_{\text{К}} x_{\text{К}},$$

где $x_{\text{Н}}$ – начальная концентрация раствора, масс. %; $x_{\text{К}}$ – конечная концентрация раствора, масс. %.

Уравнение для расчета количества удаляемого растворителя:

$$W = G_{\text{Н}} \left(1 - \frac{x_{\text{Н}}}{x_{\text{К}}} \right).$$

Тепловой баланс однокорпусной выпарной установки:

$$Q = G_{\text{П}} (i_{\text{П}} - i_{\text{К}}) = G_{\text{Н}} c_{\text{Н}} (t_{\text{К}} - t_{\text{Н}}) + W (i_{\text{В.П}} - c_{\text{К}} t_{\text{К}}) + Q_{\text{ДЕГ}} + Q_{\text{ПОТ}},$$

где Q – расход тепла на выпаривание, Вт; $G_{\text{П}}$ – расход сухого греющего пара, кг/с; $i_{\text{П}}$ – энтальпия сухого насыщенного греющего пара, Дж/кг; $i_{\text{К}}$ – энтальпия конденсата при температуре конденсации, Дж/кг; $G_{\text{Н}}$ – количество начального раствора, кг/с; $c_{\text{Н}}$ – теплоемкость начального раствора, Дж/(кг·К); $t_{\text{Н}}$ и $t_{\text{К}}$ – температуры начального и конечного растворов, °С; W – количество

выпариваемой воды (вторичного пара), кг/с; $i_{в.п.}$ – энтальпия вторичного пара Дж/кг; c – теплоемкость конечного раствора (воды), Дж/(кг·К); $Q_{дег}$ – теплота дегидратации (концентрирования), равная по величине и обратная по знаку теплоте разбавления раствора, Вт; $Q_{пот}$ – потери в окружающую среду, Вт.

Материальный баланс многокорпусной выпарной установки:

$$W_{общ} = G_n \left(1 - \frac{x_n}{x_{н-1}} \right),$$

где $W_{общ}$ – общее количество воды, выпариваемое во всех корпусах), кг/с; $x_{н-1}$ – концентрация исходного раствора, мас. %; x_n – концентрация упаренного раствора, удаляемого из последнего корпуса мас. %.

Тепловой баланс многокорпусной выпарной установки:

$$W_{n-1}H_{n-1} + G_{n-1}H_{p(n-1)} = G_nH_{pn} + W_{n-1}H_{г(n-1)} + W_nH_{нв.п} + Q_{нп},$$

где W_{n-1} , W_n – расходы греющего и вторичного паров в n-м корпусе, соответственно, кг/с; G_{n-1} , G_n – расходы исходного и упаренного раствора в n-м корпусе, соответственно, кг/с; H_{n-1} , $H_{нв.п}$ – энтальпии греющего и вторичного паров в n-м корпусе, соответственно, Дж/кг; $H_{p(n-1)}$, H_{pn} , $H_{г(n-1)}$ – энтальпии исходного, упаренного растворов и конденсата греющего пара в n-м корпусе, соответственно, Дж/кг; $Q_{нп}$ – потери теплоты в окружающую среду в n-м корпусе, Вт.

Целью расчета выпарного аппарата является определение поверхности теплопередачи и выбор его конструкции.

Площадь поверхности нагрева выпарного аппарата определяется из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{пол}},$$

где Q – расход теплоты на выпаривание, Вт; K – коэффициент теплопередачи от греющего пара к раствору, Вт/(м²·К).

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{п}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{к}}},$$

$\alpha_{п}$, $\alpha_{к}$ – коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке и от стенки к кипящему раствору, соответственно, Вт/(м²·К); $\sum \frac{\delta}{\lambda}$ – сумма термических сопротивлений всех слоев стенки трубы и загрязнений со стороны пара и раствора, м²·К/Вт.

При многокорпусном выпаривании **распределение полезной разности температур** между отдельными корпусами производится:

а) в случае расчета на равную поверхность корпусов

$$\Delta t_{пол i} = \frac{\sum \Delta t_{пол} Q_i / K_i}{\sum Q_i / K_i};$$

б) в случае расчета на минимальную поверхность корпусов

$$\Delta t_{\text{пол } i} = \frac{\sum \Delta t_{\text{пол}} \sqrt{Q_i / K_i}}{\sum \sqrt{Q_i / K_i}},$$

где индекс i – порядковый номер корпуса; $\Delta t_{\text{пол } i}$ – полезная разность температур i -го корпуса, °С; Q_i , – тепловая нагрузка i -го корпуса, Вт; K_i – коэффициент теплопередачи для i -го корпуса, Вт/(м² ·К); $\sum \Delta t_{\text{пол}}$ – общая полезная разность температур установки, °С.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы называются тепловыми?
2. Дайте определение движущей силы тепловых процессов.
3. Сформулируйте определения температурного поля, изотермической поверхности и температурного градиента.
4. Какими способами осуществляется перенос тепла в теплообменных процессах?
5. Запишите закон теплопроводности Фурье. Сформулируйте физический смысл и укажите размерность коэффициента теплопроводности.
6. В каких единицах измеряется коэффициент температуропроводности?
7. Запишите уравнения теплопроводности плоской и цилиндрической стенок.
8. Сформулируйте законы теплового излучения.
9. Что называется процессом теплоотдачи? От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи, в каких единицах измеряется?
10. Назовите основные критерии теплового подобия и сформулируйте их физический смысл.
11. Каким образом определяется коэффициент теплоотдачи в случае пленочной конденсации?
12. Что такое теплопередача? Укажите физический смысл, размерность коэффициента теплопередачи.
13. Каким образом определяется средняя движущая сила процесса теплопередачи при различных взаимных направлениях теплоносителей?
14. Что является целью расчета теплообменного аппарата?
15. Дайте классификацию теплообменных аппаратов.
16. Назовите основные греющие агенты в зависимости от температуры нагреваемой среды.
17. Каким образом осуществляется умеренное и глубокое охлаждение?
18. Какие типы конденсаторов различают по способу охлаждения?
19. Что такое выпаривание?
20. Дайте классификацию выпарных установок.
21. Перечислите основные типы выпарных аппаратов.
22. Запишите тепловой и материальный балансы однокорпусного выпаривания.
23. Сформулируйте понятия первичного и вторичного паров.
24. Что такое температурные потери и полезная разность температур?
25. Каким образом рассчитывается температура кипения раствора?
26. В чем заключается физическая сущность многокорпусного выпаривания?

27. Запишите тепловой и материальный балансы многокорпусного выпаривания.
28. Что является целью расчета выпарного аппарата?

7. МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

7.1. ОСНОВЫ МАССОПЕРЕДАЧИ

Массопередача – процесс переноса одного или нескольких веществ из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия, используется для разделения гомогенных и гетерогенных систем.

Классификация процессов массопередачи.

I. По назначению:

- 1. Абсорбция** - процесс поглощения компонента из паровой или газовой фазы жидким поглотителем (абсорбентом).
- 2. Перегонка** - процесс разделения гомогенных жидких смесей на компоненты путем однократного или многократного (ректификация) взаимодействия между паровой и жидкой фазами, движущимися противотоком.
- 3. Экстракция** (жидкостная) - процесс извлечения вещества из растворов с помощью избирательных растворителей (экстрагентов).
- 4. Адсорбция** – процесс поглощения компонента из паровой, газовой либо жидкой фаз твердым пористым поглотителем (адсорбентом).
- 5. Ионный обмен** - процесс избирательного извлечения ионов из растворов электролитов.
- 6. Сушка** – процесс удаления влаги из твердых материалов с последующим отводом образующихся паров.
- 7. Кристаллизация** - процесс выделения твердой фазы из растворов или расплавов.
- 8. Выщелачивание** - процесс извлечения вещества из твердых тел с помощью избирательных растворителей (экстрагентов).
- 9. Мембранные процессы** – избирательное извлечение компонентов смеси или их концентрирование с помощью полупроницаемой перегородки (мембраны).

II. По количеству компонентов, участвующих в процессе:

1. В процессе участвуют три вещества – одно образует первую фазу, другое – вторую фазу, третье вещество является распределяемым между фазами, каждая из фаз содержит распределяемый компонент и инертный компонент-носитель.
2. В процессе участвуют два вещества – в каждой фазе компонент-носитель отсутствует, фазы обмениваются компонентами между собой.

III. По виду границы соприкосновения фаз:

1. С подвижной поверхностью контакта фаз (газ – жидкость, пар – жидкость, жидкость – жидкость).
2. С неподвижной поверхностью контакта фаз (газ – твердое, пар – твердое, жидкость – твердое).
3. Массопередача через полупроницаемые перегородки (мембраны).

Массоотдача - процесс переноса вещества из ядра потока к границе раздела фаз или от границы раздела фаз в ядро потока.

Основным параметром, определяющим скорость и направление протекания любого процесса массопередачи, является концентрация вещества.

Способы выражения концентрации.

1. **Объемная концентрация** - количество компонента (вещества), которое содержится в одном кубическом метре всей фазы - C_y или C_x , кг/м³.
2. **Массовая доля** - отношение массы компонента к массе всей фазы - $\bar{x}(\Phi_x)$, $\bar{y}(\Phi_y)$, кг компонента/кг фазы.
3. **Мольная доля** - отношение числа киломолей компонента к общему числу киломолей всей фазы - $x(\Phi_x)$, $y(\Phi_y)$, кмоль компонента/кмоль фазы.
4. **Относительная массовая доля** - отношение массы компонента к массе инертного вещества - $\bar{X}(\Phi_x)$, $\bar{Y}(\Phi_y)$, кг компонента/кг ин. в-ва.
5. **Относительная мольная доля** - отношение числа киломолей компонента к числу киломолей инертного вещества - $X(\Phi_x)$, $Y(\Phi_y)$, кмоль компонента/кмоль ин.в-ва.

Молекулярная диффузия – процесс переноса распределяемого вещества, обусловленный беспорядочным движением микрочастиц.

Первый закон Фика – масса вещества dM , продиффундировавшего за время dt через элементарную поверхность dF (нормальную к направлению диффузии), пропорциональна градиенту концентрации $\frac{dc}{dn}$ этого вещества.

$$dM = -D \frac{dc}{dn} dF d\tau \text{ или } M = -D \frac{dc}{dn} F\tau.$$

Знак минус в данном выражении указывает на то, что молекулярная диффузия протекает в направлении уменьшения концентрации распределяемого компонента.

Коэффициент молекулярной диффузии D показывает, какое количество вещества диффундирует в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации, равном единице

$$[D] = \left[\frac{Mdn}{dcF\tau} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right].$$

Конвективный перенос - процесс переноса вещества за счет перемещения его макроскопических объемов, обусловленный скоростью движущегося потока.

Дифференциальное уравнение конвективного массообмена – выражает закон распределения концентрации данного компонента в движущейся среде при установившемся процессе массообмена:

$$W_x \frac{\partial c}{\partial x} + W_y \frac{\partial c}{\partial y} + W_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right].$$

Для неустановившегося процесса массообмена дифференциальное уравнение конвективного массообмена запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial c}{\partial x} + W_y \frac{\partial c}{\partial y} + W_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right],$$

где $\partial c / \partial \tau$ - характеризует локальное изменение концентрации распределяемого вещества во времени; $W_x \frac{\partial c}{\partial x} + W_y \frac{\partial c}{\partial y} + W_z \frac{\partial c}{\partial z}$ - характеризует перенос

вещества за счет конвекции; $D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] = D \nabla^2 c$ - характеризует

перенос вещества в движущемся потоке за счет молекулярной диффузии.

Второй закон Фика (дифференциальное уравнение молекулярной диффузии) - характеризует неустановившийся процесс массообмена в неподвижной среде:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \nabla^2 c.$$

Турбулентная диффузия – конвективный перенос вещества под действием турбулентных пульсаций.

Состояние равновесия - состояние, в которое с течением времени приходит физико-химическая система, находящаяся при неизменных внешних условиях, параметры системы в этом состоянии не меняются во времени.

Фазовое равновесие – условие, при котором концентрации фаз не изменяются во времени.

Константа фазового равновесия (коэффициент распределения) - соотношение между концентрациями фаз, устанавливаемое в состоянии равновесия, зависит от давления, температуры и концентрации распределяемого компонента:

$$m = \frac{\bar{y}_p}{\bar{x}}.$$

Правило фаз указывает количество параметров, которыми можно влиять на скорость протекания процесса:

$$C = K - \Phi + 2,$$

где Φ – число фаз; C – число степеней свободы (число независимых переменных, которое можно изменить без нарушения состава фаз); K – число компонентов системы.

Линия равновесия - графическое отображение зависимости между концентрациями распределяемого компонента в фазах при равновесии:

$$\bar{y}_p = f(\bar{x}).$$

Уравнение рабочей линии в явном виде показывает взаимосвязь между рабочими концентрациями распределяемого компонента в фазах для произвольного сечения аппарата:

$$\bar{y} = \frac{L}{G} \bar{x} + (\bar{y}_n - \frac{L}{G} \bar{x}_k).$$

Графическое изображение представленной зависимости является **рабочей линией процесса**.

Закон Генри: парциальное давление компонента в газовой фазе над раствором P_a в условиях равновесия прямо пропорционально его мольной доли x_a в жидкой фазе:

$$P_a = \psi x_a,$$

где $\psi=f(t)$ – константа Генри, зависящая от температуры и определяемая для системы газ-жидкость экспериментально, Па.

Закон Дальтона: общее давление в газовой смеси, состоящей из «n» компонентов, равно сумме их парциальных давлений:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n,$$

где $P_1, P_2 \dots P_n$ – парциальные давления компонентов.

Закон Рауля: парциальное давление компонента в паровой фазе в условиях равновесия равно произведению мольной доли компонента x_a в жидкой фазе на давление его насыщенного пара P_A :

$$P_a = x_a P_A.$$

Закон массоотдачи Шукарева: количество вещества M переносимого из ядра потока к границе раздела фаз (или наоборот), прямо пропорционально движущей силе массоотдачи, поверхности контакта фаз F и времени процесса τ :

$$\text{для фазы } \Phi_y \quad M = \beta_y (y - y_{гр}) F \tau,$$

$$\text{для фазы } \Phi_x \quad M = \beta_x (x_{гр} - x) F \tau,$$

где $(y - y_{гр}), (x_{гр} - x)$ – движущие силы массоотдачи, для фазы Φ_y и Φ_x , соответственно, равные разности концентраций в ядре потока и у границы раздела фаз, или наоборот; β_y, β_x – коэффициент массоотдачи для фазы Φ_y и Φ_x , соответственно.

Коэффициент массоотдачи показывает, какое количество вещества переносится из ядра потока к единице поверхности контакта фаз (или наоборот) в единицу времени при движущей силе массоотдачи, равной единице:

$$[\beta] = \left[\frac{M}{F \tau (y - y_{гр})} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ед. движ. силы}} \right].$$

Уравнение массопередачи определяет количество вещества M , переносимого из одной фазы в другую через границу раздела фаз F в единицу времени τ :

$$\text{для фазы } \Phi_y \quad M = K_y (y - y_p) F \tau,$$

$$\text{для фазы } \Phi_x \quad M = K_x (x_p - x) F \tau,$$

где $(y - y_p)$, $(x_p - x)$ – движущие силы массопередачи, для фазы Φ_y и Φ_x соответственно, представляющие собой разность между рабочей и равновесной концентрациями распределяемого компонента в потоке данной фазы; K_y , K_x – коэффициент массопередачи для фазы Φ_y и Φ_x , соответственно.

Коэффициент массопередачи показывает, какое количество вещества переносится из одной фазы в другую фазу через единицу поверхности контакта фаз в единицу времени при движущей силе массопередачи, равной единице:

$$[K] = \left[\frac{M}{F \tau (y - y_{гр})} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ед. движ. силы}} \right].$$

Если текущие концентрации изменяются при движении фаз вдоль поверхности раздела, то в качестве движущей силы выступает ее среднее значение, и уравнение массопередачи запишется в следующем виде:

$$\text{для фазы } \Phi_y \quad M = K_y \Delta \bar{y}_{cp} F \tau.$$

$$\text{для фазы } \Phi_x \quad M = K_x \Delta \bar{x}_{cp} F \tau.$$

Расчетные уравнения для определения среднего значения движущей силы массопередачи зависят от вида равновесной линии.

1. Равновесная линия кривая:

$$\Delta \bar{y}_{cp} = \frac{\bar{y}_H - \bar{y}_K}{\int_{\bar{y}_K}^{\bar{y}_H} \frac{d\bar{y}}{(y - y_p)}} = \frac{\bar{y}_H - \bar{y}_K}{m_y}, \quad \Delta \bar{x}_{cp} = \frac{\bar{x}_K - \bar{x}_H}{\int_{\bar{x}_H}^{\bar{x}_K} \frac{d\bar{x}}{(x_p - x)}} = \frac{\bar{x}_K - \bar{x}_H}{m_x},$$

где m_y и m_x - число единиц переноса по фазе Φ_y и Φ_x соответственно, показывает, какое изменение концентрации приходится на единицу движущей силы.

2. Равновесная линия прямая:

$$\Delta \bar{y}_{cp} = \frac{(\bar{y}_H - \bar{y}_{pH}) + (\bar{y}_K - \bar{y}_{pK})}{2} = \frac{\Delta \bar{y}_H + \Delta \bar{y}_K}{2}, \quad \text{если } \frac{\Delta \bar{y}_H}{\Delta \bar{y}_K} \leq 2,$$

$$\Delta \bar{y}_{cp} = \frac{\Delta \bar{y}_H - \Delta \bar{y}_K}{\ln \frac{\Delta \bar{y}_H}{\Delta \bar{y}_K}}, \quad \text{если } \frac{\Delta \bar{y}_H}{\Delta \bar{y}_K} > 2;$$

$$\Delta \bar{x}_{cp} = \frac{(\bar{x}_{pK} - \bar{x}_K) + (\bar{x}_{pH} - \bar{x}_H)}{2} = \frac{\Delta \bar{x}_H + \Delta \bar{x}_K}{2}, \quad \text{если } \frac{\Delta \bar{x}_H}{\Delta \bar{x}_K} \leq 2,$$

$$\Delta \bar{x}_{cp} = \frac{\Delta \bar{x}_H - \Delta \bar{x}_K}{\ln \frac{\Delta \bar{x}_H}{\Delta \bar{x}_K}}, \quad \text{если } \frac{\Delta \bar{x}_H}{\Delta \bar{x}_K} > 2.$$

Уравнения аддитивности – уравнения связывающие коэффициенты массопередачи и массоотдачи между собой:

$$\text{для фазы } \Phi_y \quad \frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x},$$

$$\text{для фазы } \Phi_x \quad \frac{1}{K_x} = \frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{m\beta_y},$$

где m – коэффициент распределения, определяется как тангенс угла наклона к линии равновесия; $1/K_y$, $1/K_x$ – сопротивления массопередачи по фазе Φ_y и Φ_x соответственно; $1/\beta_y$, m/β_x и $1/\beta_x$, $1/(m\beta_y)$ – сопротивления массоотдачи по фазе Φ_y и Φ_x соответственно.

Обобщенное критериальное уравнение массоотдачи:

$$Nu_d = f(Re, Pr_d, Fo_d, \Gamma_i \dots).$$

$\frac{\beta_{y(x)}L}{D} = Nu_d$ - **диффузионный критерий Нуссельта**, является определяемым критерием, так как включает в себя неизвестный параметр – коэффициент массоотдачи, по физическому смыслу данный критерий характеризует массоотдачу на границе раздела фаз.

$\frac{\tau D}{L^2} = Fo_d$ - **диффузионный критерий Фурье**, характеризует подобие неустановившихся процессов массообмена;

$\frac{WL}{D} = Re_d$ - **диффузионный критерий Пекле**, является мерой соотношения количества вещества, переносимого в потоке за счет конвекции, к количеству вещества, переносимому в этом же потоке за счет молекулярной диффузии.

$\frac{WL\mu}{DW\rho L} = \frac{\nu}{D} = Pr_d$ - **диффузионный критерий Прандтля**, является безразмерным комплексом величин, полученным в виде отношения критерия Пекле к критерию Рейнольдса, по физическому смыслу этот комплекс характеризует физические свойства фазы.

$\Gamma_i = \frac{L_i}{L_o}$ - симплекс геометрического подобия; L_i - геометрический размер; L_o - определяющий размер.

Целью расчета массообменных аппаратов является определение его основных габаритов: диаметра $D_{ап}$ и высоты рабочей части H , где происходит изменение концентрации.

Диаметр аппарата определяется по уравнению расхода:

$$D_{ап} = \sqrt{\frac{4G}{\pi\rho W}},$$

где ρ - плотность сплошной фазы, кг/м³; W – допустимая скорость газа (пара), м/с; G – массовый расход сплошной фазы, кг/с.

Высота рабочей части аппарата определяется в зависимости от способа контакта фаз:

1) с непрерывным фазовым контактом в случае, если сопротивлением одной из фаз можно пренебречь

$$H = h_{\text{экв},y} m_y^- = \frac{G_y^-}{K_y^- \sigma S} \int_{y_k}^{\bar{y}_H} \frac{d\bar{y}}{(\bar{y} - y_p)}; \quad H = h_{\text{экв},x} m_x^- = \frac{G_x^-}{K_x^- \sigma S} \int_{x_H}^{\bar{x}_K} \frac{d\bar{x}}{(x_p - \bar{x})},$$

где $h_{\text{экв},y}$ ($h_{\text{экв},x}$) - высота, эквивалентная одной единице переноса по фазе Φ_y и Φ_x соответственно;

2) с непрерывным фазовым контактом, если необходимо учитывать сопротивление по обоим фазам

$$H = h_{0,y} m_y^-; \quad H = h_{0,x} m_x^-,$$

где $h_{0,y}$, $h_{0,x}$ - высота единицы переноса по фазе Φ_y и Φ_x соответственно;

3) со ступенчатым фазовым контактом

$$H = n_d h,$$

где $n_d = n_T / \eta$ - число действительных ступеней; n_T - число теоретических ступеней; η - коэффициент полезного действия колонны, учитывающий реальную кинетику массообмена на действительных ступенях, на которых никогда не достигается равновесие; h - расстояние между ступенями (тарелками).

Теоретическая ступень (тарелка) - поверхность фазового контакта, на которой успевает устанавливаться равновесие между фазами, т.е. равновесная концентрация компонента на входе в тарелку равна рабочей концентрации на выходе из нее.

7.2. АБСОРБЦИЯ

Абсорбция – массообменный процесс избирательного поглощения компонентов газовых или парогазовых смесей жидким поглотителем.

Десорбция – выделение растворенного газа из раствора, процесс, обратный абсорбции.

Абсорбция широко применяется в химической промышленности в производствах серной, соляной, и азотной кислот, нитратов, соды (абсорбция SO_3 , HCl , NO , NO_2 , NO_3 , CO_2), для очистки газов от примесей, например H_2S , CO_2 , SO_2 , CO и др., улавливания ценных компонентов из газовых смесей с целью предотвращения их потерь, например, рекуперация летучих растворителей (спиртов, эфиров, кетонов и др.)

Физическая абсорбция – тип процесса абсорбции, при котором поглощаемый компонент (абсорбтив) химически не взаимодействует с поглотителем.

Химическая абсорбция (хемосорбция) - абсорбция, при которой поглощаемый компонент химически взаимодействует с поглотителем.

Абсорбент – жидкость, поглощающая газ в процессе абсорбции, например, вода, водные растворы этаноламинов, карбонатов металлов, щелочей и кислот, спирты и др.

Абсорбтив – газ, который поглощается из газовой фазы жидкостью в процессе абсорбции.

Абсорбционные аппараты (абсорберы) – аппараты, в которых осуществляются абсорбционные процессы.

Классификация абсорберов.

I. Поверхностные – контакт между фазами на поверхности неподвижной или медленно текущей жидкости (туриллы, целляриусы, пластинчатые).

II. Пленочные – контакт на поверхности текущей жидкой пленки (трубчатые, с восходящим движением пленки).

III. Насадочные – контакт смоченной поверхности насадки (с неподвижной и «плавающей» насадками).

IV. Барботажные (тарельчатые) – контакт на поверхности газовых пузырьков и струях (с колпачковыми, ситчатыми, клапанными и пластинчатыми тарелками со сливными устройствами и провальными).

V. Распыливающие – тесный контакт между фазами достигается путем разбрызгивания жидкости в газовом потоке (полые, прямоточные Вентури, механические роторно – центробежные).

Материальный баланс абсорбции – масса газа (абсорбтива) M , извлеченная из газовой смеси, равна массе газа, поглощенного абсорбентом:

$$M = G(\bar{y}_n - \bar{y}_k) = L(\bar{x}_k - \bar{x}_n),$$

где G – массовый расход инертного вещества газовой фазы, кг/с; \bar{y}_n, \bar{y}_k – концентрация распределяемого компонента в газовой фазе, кг р.к./кг ин. в-ва. L – массовый расход абсорбента, кг/с; \bar{x}_n, \bar{x}_k – начальная и конечная концентрация поглощаемого компонента в жидкой фазе, кг р.к./кг ин. в-ва.

Тепловой баланс абсорбции:

$$q(\bar{x}_k - \bar{x}_n) = c(t_k - t_n),$$

где q – дифференциальная теплота абсорбции, Дж/кг; c – теплоемкость абсорбента, Дж/(кг·К); t_n, t_k – начальная и конечная температура абсорбента, °С.

Инверсия фаз – явление, наблюдаемое в насадочных абсорберах, когда наступает обращение фаз, т.е. жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной, сопровождается образованием газожидкостной эмульсии в режиме эмульгирования.

Целью расчета абсорберов является определение расхода абсорбента, диаметра и высоты аппарата, его гидравлического сопротивления.

Удельный расход абсорбента – величина, которая показывает, какое количество абсорбента подается в аппарат в расчете на 1 кг инертного вещества газовой фазы:

$$l = \frac{L}{G} = \frac{(\bar{y}_n - \bar{y}_k)}{(\bar{x}_k - \bar{x}_n)}.$$

Диаметр и высота аппарата определяются аналогично общей методике расчета массообменных аппаратов.

Величина гидравлического сопротивления:

1) для пленочных абсорберов

$$\Delta p_{пл} = \lambda \frac{H}{d_э} \frac{W_{отн}^2}{2} \rho_{г},$$

где H – высота поверхности, по которой стекает пленка, м; $d_э$ – эквивалентный диаметр канала по которому движется газ, м; $W_{отн}$ – относительная скорость газа, м/с; $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м³; λ – коэффициент сопротивления трению;

2) насадочных абсорберов

$$\Delta p_{н} = \lambda \frac{H}{d_э} \frac{W^2}{2} \rho_{г},$$

где H – высота насадки, м; $d_э$ – эквивалентный диаметр насадки, м; W – истинная скорость газа в слое насадки, м/с; $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м³; λ – коэффициент сопротивления трению, учитывающий суммарные потери давления на трение и местные сопротивления;

3) тарельчатых абсорберов

$$\Delta p_{т} = \Delta p_{с.т} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{гж},$$

где $\Delta p_{с.т}$ – сопротивление сухой тарелки; Δp_{σ} – сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения жидкости; $\Delta p_{гж}$ – сопротивление газо-жидкостного слоя на тарелке.

7.3. ПЕРЕГОНКА

Перегонка – метод разделения гомогенных жидких смесей, состоящих из двух или большего числа компонентов, путем частичного испарения разделяемой смеси с последующей конденсацией образующихся паров, осуществляемый однократно или многократно.

Кубовый остаток – неиспарившаяся жидкость, обогащенная труднолетучими (высококипящими) компонентами.

Дистиллят (ректификат) – отгонная фракция, полученная конденсацией паров и обогащенная легколетучими (низкокипящими) компонентами.

Классификация процессов перегонки.

I. В зависимости от степени обогащения паровой фазы легколетучими компонентами.

1. Простая перегонка (дистилляция):

а) однократная перегонка (из исходной смеси отгоняется одна фракция);

б) фракционная перегонка (отгоняется несколько фракций);

в) перегонка с дефлегмацией (позволяет повысить степень разделения компонентов);

г) перегонка с водяным паром или инертным газом (используется при необходимости снижения температуры процесса);

д) молекулярная дистилляция (используется для разделения высокомолекулярных органических веществ, имеющих высокие температуры кипения и не обладающих термической стойкостью).

2. Ректификация.

II. По принципу организации.

1. Периодические (фракционная перегонка, перегонка с дефлегмацией, перегонка с водяным паром или инертным газом, периодическая ректификация).

2. Непрерывные (однократная перегонка, непрерывная ректификация).

Простая перегонка (дистилляция) - процесс частичного испарения жидкой фазы с последующей конденсацией образующихся паров осуществляемый однократно.

Установка для перегонки состоит из обогреваемой емкости (куба), конденсатора и одной или нескольких емкостей для дистиллята (соответственно при простой или фракционной перегонке).

Целью расчета процессов разделения смесей путем простой перегонки является определение количества исходной смеси F , необходимой для получения кубового остатка W и дистиллята ($F-W$) с определенным средним составом x_{cp} .

Для этого используют **уравнения материального баланса** - уравнение материального баланса по НКК за бесконечно малый интервал времени dt и общее балансовое уравнение процесса:

$$\begin{cases} Lx = (L - dL)(x - dx) + dLy_p, \\ Fx_F = Wx_W + (F - W)x_{cp}, \end{cases}$$

где L - количество кубовой смеси в произвольный момент времени τ , кг; dL , dx - изменение количества смеси и ее состава за время dt ; y_p - равновесная концентрация НКК в паре, мол. дол.; F - масса исходной смеси, кг; W - масса кубового остатка, кг; x_F , x_W , x_{cp} - концентрации легколетучего компонента в исходной смеси, готовом продукте и средняя концентрация получаемого дистиллята, соответственно, мол. дол.

Соотношение между необходимым количеством исходной смеси и количеством образовавшегося кубового остатка:

$$\ln\left(\frac{F}{W}\right) = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y_p - x}.$$

Средняя концентрация получаемого дистиллята:

$$x_{cp} = \frac{Fx_F - Wx_W}{F - W}.$$

Ректификация – процесс разделения жидких однородных систем путем многократного частичного испарения жидкой фазы с последующей частичной конденсацией образующихся паров, основным условием проведения процесса

ректификации является различие температур кипения или летучести компонентов смеси.

Аппараты ректификационные – аппараты для проведения процессов ректификации.

Классификация ректификационных аппаратов.

I. Насадочные аппараты – заполняются насадкой, в качестве которой используются кольца Рашига, шары, седла Берля, седла “инталоко”, кольца Паля, гофрированные ленты с наклоном гофров в противоположные стороны и др.

II. Тарельчатые аппараты – снабжаются специальными устройствами, тарелками, которые обеспечивают многократный контакт фаз по высоте колонны; различают тарелки колпачковые, ситчатые, клапанные, с продольно-поперечным секционированием, чешуйчатые.

III. Пленочные аппараты – устройства, в которых жидкость стекает в виде тонкой пленки по стенкам труб или каналов, соприкасаясь с потоком газа (пара), движущимся в противоположном (противоток) или том же (прямоток) направлении.

IV. Роторные аппараты – снабжаются специальным ротором, представляющим собой полую трубу с лопастями, вращающуюся внутри корпуса колонны.

Кипятильник (куб) – теплообменное устройство, предназначенное для превращения в пар части жидкости, стекающей из колонны, и подвода пара в ее нижнюю часть (под насадку или нижнюю тарелку).

Дефлегматор – устройство, предназначенное для конденсации паров и подачи орошения (флегмы) в колонну, представляет собой кожухотрубчатый теплообменник, в межтрубном пространстве которого обычно конденсируются пары, в трубах движется охлаждающий агент.

Непрерывная ректификация.

При проведении данного процесса исходная смесь, нагретая до температуры кипения, подается в среднюю часть колонны, так называемую питающую тарелку, непрерывно. Питающая тарелка колонны делит весь аппарат на верхнюю и нижнюю части. Часть колонны, находящаяся выше точки ввода исходной смеси, называется укрепляющей, в ней происходит обогащение паровой фазы легколетучим компонентом. Нижняя часть аппарата называется исчерпывающей (отгонной) – легколетучий компонент удаляется из разделяемой смеси. В результате процесса ректификации образуется **дистиллят**, почти чистый легколетучий низкокипящий компонент (НКК), и **кубовый остаток**, содержащий высококипящий труднолетучий компонент. Часть дистиллята, возвращаемая обратно в колонну для орошения и обогащения паров легколетучим компонентом, называется **флегмой**. Установка в этом случае обычно работает в установившемся режиме, что позволяет

получать продукт и кубовый остаток с постоянной по времени концентрацией легколетучего компонента.

Периодическая ректификация.

Разделяемая смесь, при осуществлении данного вида ректификации предварительно заливается в куб колонны (испаритель), доводится до кипения и испаряется. Образовавшийся пар проходит через колонну, орошаемую подаваемой сверху флегмой. При взаимодействии флегмы и паровой фазы последняя обогащается легколетучим низкокипящим компонентом. Установка периодического действия работает в нестационарном режиме, то есть концентрация легколетучего компонента и в кубе во времени непрерывно уменьшается при условии, что расход флегмы постоянен.

Целью расчета процесса ректификации является определение производительности установки по исходной смеси или дистилляту и получение вида уравнений рабочих линий нижней и верхней частей ректификационной колонны.

Общий материальный баланс для ректификационной установки:

$$\begin{cases} M = P + W, \\ Mx_M = Px_P + Wx_w, \end{cases}$$

где M , P , W – производительность установки по исходной смеси, готовому продукту и кубовому остатку соответственно, кмоль/с; x_M , x_P , x_w – концентрация НКК в соответствующих потоках, мольные доли.

Материальный баланс укрепляющей части колонны:

$$\begin{cases} G = \Phi + P, \\ Gy = \Phi x + Px_P, \end{cases}$$

где G , Φ – мольные расходы пара НКК и флегмы, кмоль/с; y , x – концентрация НКК в соответствующих потоках, мольные доли.

Уравнение рабочей линии для верхней части колонны:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_P}{R+1},$$

где $R = \Phi/P$ – флегмовое число, физический смысл которого заключается в том, что данный параметр показывает, какое количество флегмы необходимо подавать в колонну в расчете на 1 кмоль готового продукта.

Материальный баланс исчерпывающей части колонны:

$$\begin{cases} M + \Phi = G + W, \\ (M + \Phi)x = Gy + Wx_w. \end{cases}$$

Уравнение рабочей линии для нижней части:

$$y = \frac{(f+R)}{(R+1)}x - \frac{(f-1)}{(R+1)}x_w,$$

где $f = M/P$ – коэффициент расхода, по физическому смыслу показывает, какое количество исходной смеси необходимо подавать в колонну в расчете на 1 кмоль готового продукта.

Колонна периодического действия работает аналогично укрепляющей части колонны непрерывного действия, куб в данном случае фактически является отгонной частью, поэтому материальный баланс и уравнение рабочей линии колонны периодического действия соответствуют материальному балансу и уравнению рабочей линии верхней части колонны непрерывного действия.

7. 4. ЭКСТРАКЦИЯ

Экстракция – процесс извлечения одного или нескольких компонентов из растворов или твердых тел с помощью избирательных растворителей (экстрагентов).

При экстракции веществ достигаются следующие цели:

- 1) избирательное извлечение веществ из исходного раствора;
- 2) разделение веществ, содержащихся в исходном растворе и получение их в чистом виде;
- 3) концентрирование извлекаемых веществ.

Экстракт – раствор извлеченных веществ в экстрагенте.

Механизм экстракции включает в себя стадии:

- 1) проникновение экстрагента в поры твердого материала или в исходный раствор;
- 2) растворение целевого компонента;
- 3) перенос экстрагируемого вещества из глубины твердой частицы к поверхности раздела фаз (молекулярная диффузия);
- 4) перенос вещества от поверхности раздела фаз в объем экстрагента (конвективная диффузия).

Аппараты экстракционные (экстракторы) – аппараты для проведения процессов экстракции.

Классификация экстракторов.

I. В зависимости от вида контакта между жидкими фазами:

1. Дифференциально-контактные, в которых характер изменения фаз приближается к непрерывному.
2. Ступенчатые – в которых изменение состава фаз происходит скачкообразно (ступенчато) и в каждой ступени осуществляется перемешивание и разделение (сепарация фаз).

II. Экстракторы без механических перемешивающих устройств (колонные аппараты: распылительные, полочные, насадочные, тарельчатые, ситчатые).

III. Механические экстракторы – экстракторы с подводимой внешней энергией (роторно-дисковые, пульсационные или вибрационные, центробежные и аппараты с мешалками из группы смесительно-отстойных экстракторов).

Изотерма экстракции – кривая изменения концентраций компонентов в экстрагенте в зависимости от их концентраций в исходном растворе при

равновесных условиях. Такая кривая очень удобна тем, что каждая ее точка непосредственно показывает соответствующие концентрации в обеих фазах и, следовательно, по ней можно определить коэффициенты распределения во всем диапазоне концентраций. Изотермы экстракции также позволяют установить предельную концентрацию извлекаемого компонента в экстрагенте.

Рафинат – остаточный исходный раствор, из которого с той или иной степенью полноты удалены экстрагируемые компоненты.

Реэкстракция – процесс обратного извлечения вещества из экстракта путем обработки специальным раствором, который называют реэкстрагентом, а получаемый продукт (чаще всего это раствор) – реэкстрактом. В качестве реэкстрагента используют воду, водные растворы, органические вещества, нерастворимые в экстрагенте.

Коэффициент распределения экстракции – отношение равновесной аналитической концентрации распределяемого компонента в экстракте \bar{y}_p к его равновесной концентрации в рафинате \bar{x}_p :

$$D = \frac{\bar{y}_p}{\bar{x}_p}.$$

Чем больше D , тем выше способность данного экстрагента извлекать целевой компонент. В экстракционных системах $D=1 \div 10000$.

В зависимости от числа используемых экстрагентов различают:

- 1) экстракцию одним экстрагентом;
- 2) экстракцию двумя экстрагентами (фракционная экстракция).

По способу проведения процесса различают:

- 1) ступенчатое экстрагирование;
- 2) непрерывное дифференциальное контактирование.

Одноступенчатая экстракция – является простейшим методом экстрагирования: исходный раствор (А+В) перемешивается в смесителе с экстрагентом С, после чего в сепараторе – отстойнике происходит разделение эмульсии с образованием слоя экстракта (С+В) и рафината (А+В). При достаточном времени пребывания эмульсии в смесителе могут быть получены равновесные составы фаз экстракта и рафината.

Целью расчета процесса экстракции является определение степени извлечения компонента и расхода экстрагента.

Расход экстрагента определяется из материального баланса одноступенчатой экстракции по распределяемому компоненту:

$$G_C \bar{y}_n + G_A \bar{x}_n = G_C \bar{y} + G_A \bar{x},$$

где G_A, G_C – количество (массовый расход) растворителя исходного раствора и экстрагента соответственно, кг (кг/с); \bar{y}_n, \bar{y} – относительная массовая доля компонента в экстрагенте и в фазе экстракта, кг В/кг С; \bar{x}_n, \bar{x} – относительная массовая доля компонента в исходном растворе и в фазе рафината, кг В/кг А.

Уравнение рабочей линии одноступенчатой экстракции:

$$\bar{y} = -\frac{G_A}{G_C} \bar{x} + \left(\bar{y}_H + \frac{G_A}{G_C} \bar{x}_H \right),$$

где $G_A/G_C = \text{tg}\alpha$ - тангенс угла наклона рабочей линии в прямоугольной системе координат $\bar{y} = f(\bar{x})$.

Степень извлечения компонента – отношение количества извлекаемого вещества, перешедшего в экстракт, к его количеству в исходном растворе, которое выражают в долях или процентах:

$$\varphi = \frac{G_C \bar{y}}{G_A \bar{x}_H}.$$

7.5. АДСОРБЦИЯ

Адсорбция – процесс поглощения одного или нескольких компонентов из газовой смеси или раствора твердым веществом.

Адсорбат – вещество, поглощаемое в процессе адсорбции.

Адсорбент – твердое вещество, которое поглощает один или несколько компонентов из газовой смеси или раствора в процессе адсорбции. В качестве адсорбентов применяются твердые вещества с большой удельной поверхностью, обычно относимой к единице массы вещества (активированные угли, силикагели, цеолиты, синтетические ионообменные смолы – иониты).

Требования к промышленным адсорбентам:

- 1) большая адсорбционная способность поглощать большие количества адсорбтива при малой его концентрации в газовой или жидкой фазах;
- 2) высокая селективность - избирательное поглощение только одного компонента из смеси;
- 3) химическая инертность по отношению к компонентам разделяемой смеси;
- 4) высокая механическая прочность;
- 5) способность к регенерации для последующего повторного использования;
- б) низкая стоимость.

При физической адсорбции молекулы адсорбтива не вступают с молекулами адсорбента в химическое взаимодействие: адсорбируемые молекулы сохраняют свою индивидуальность, а теплота адсорбции относительно невелика (примерно до $\sim 60,000$ кДж/кмоль). Малые значения величины теплоты и времени адсорбции дают возможность вести процесс физической адсорбции в условиях его обратимости, т.е. последовательно проводить стадии адсорбции и выделения поглощенных компонентов из адсорбента – десорбции.

При химической адсорбции (хемосорбции) молекулы адсорбтива вступают в химическое взаимодействие с адсорбентом; выделяемая при этом теплота адсорбции значительно превосходит теплоту физической адсорбции, а время задержки молекул адсорбтива в адсорбенте велико, в результате чего обратный процесс (десорбция) сильно тормозится и практически неосуществим.

Истинная плотность адсорбента – масса единицы объема плотного адсорбента (без учета пор).

Кажущаяся плотность адсорбента – масса единицы объема пористого материала адсорбента.

Насыпная плотность адсорбента - масса единицы объема слоя адсорбента, включая объем пор в гранулах адсорбента и между гранулами адсорбента.

Адсорберы – аппараты для проведения процессов адсорбции. Различают следующие типы адсорберов: с неподвижным слоем поглотителя, с движущимся слоем поглотителя, с кипящим слоем поглотителя; непрерывного и периодического действия; вертикальные и горизонтальные.

Периодические процессы адсорбции могут проводиться по четырех- трех- и двухфазному способам.

Четырехфазный способ работы адсорбера – состоит из 4^x стадий:

- 1) собственно адсорбция;
- 2) десорбция поглощенного компонента острым водяным паром;
- 3) сушка адсорбента;
- 4) охлаждение адсорбента.

Трехфазный способ работы адсорбера – применяется при отсутствии одной из 2^x – последних стадий (охлаждения или сушки). Например, без стадии охлаждения адсорбент охлаждается отработанным воздухом, поступающим из аппарата, который находится на стадии адсорбции; без стадии сушки после проведения адсорбции слой адсорбента продувают горячим инертным газом; что исключает возможность увлажнения адсорбента и необходимость его сушки, а затем адсорбент охлаждают холодным воздухом, и цикл повторяется.

Двухфазный способ работы адсорбера - осуществляется без обособления стадий сушки и охлаждения адсорбента; при этом различают двухфазный способ: 1) с совмещением сушки и охлаждения со стадией адсорбции; 2) без стадии сушки.

Изотермы адсорбции – уравнения линии равновесия при адсорбции:

$$\bar{X}_p = f(\bar{Y}) \text{ или } \bar{X}_p = f(p),$$

где \bar{X}_p - равновесная относительная концентрация адсорбтива в адсорбенте, кг адсорбтива/кг адсорбента; \bar{Y} - относительная концентрация адсорбтива в фазе, из которой адсорбируется вещество, кг адсорбтива/кг газовой смеси или раствора; p – парциальное давление поглощаемого компонента в парогазовой смеси, Па.

Уравнение массоотдачи для внешнего массообмена процесса адсорбции:

$$dM = \beta_y (y - y_{гр}) \sigma V dt = \beta_{y,v} (y - y_{гр}) V dt,$$

где β_y , $\beta_{y,v}$ – поверхностный и объемный коэффициенты массоотдачи соответственно кг/(м³·с·ед. движ.силы); σ - удельная поверхность, м²/м³; V - объем рабочего аппарата (адсорбента), м³.

Критериальное уравнение массопроводности описывает внутренний массообмен в пористом теле при адсорбции:

$$\frac{x - x_p}{x_n - x_p} = f\left(Bi, Fo, \frac{y}{l}\right),$$

где x , x_n , x_p – текущая, начальная и равновесная концентрации вещества в твердой фазе; y – текущая координата; l – определяющий размер тела; Fo – критерий Фурье, учитывающий нестационарность процесса переноса вещества;

$Bi = \frac{\beta_y l}{D_s}$ – критерий Био (Bi), характеризующий соотношение внешнего и внутреннего массопереноса в твердой фазе.

Целью расчета периодически действующих адсорберов является определение основных габаритов адсорбера: диаметра и высоты.

Диаметр адсорбера с неподвижным слоем адсорбента:

$$D = \sqrt{\frac{V_{cm}}{0,785w_0}},$$

где V_{cm} – объемный расход парогазовой смеси или раствора, проходящего через слой адсорбента, m^3/c ; w_0 – фиктивная скорость парогазовой смеси, определяемая с учетом технико-экономических показателей, m/c .

Определение **высоты адсорбера** связано с определением высоты слоя адсорбента:

$$h = u(\tau_{пр} + \tau_0),$$

где u – скорость движения зоны массопередачи, m/c ; $\tau_{пр}$ – время защитного действия слоя, c ; τ_0 – потеря времени защитного действия слоя, c .

Целью расчета непрерывнодействующих адсорберов является определение основных габаритов адсорбера (диаметра, высоты) и расхода адсорбента.

Диаметр адсорбера непрерывного действия определяется аналогично адсорберу периодического действия, фиктивную скорость парогазовой смеси w_0 рассчитывают исходя из необходимости обеспечить заданный гидродинамический режим.

Высота слоя адсорбента:

$$h = \frac{G_V n_{oy}}{K_{yV} S},$$

где G_V – объемный расход паро-газовой смеси, m^3/c ; n_{oy} – число единиц переноса; S – площадь сечения слоя, m^2 ; K_{yV} – объемный коэффициент массопередачи, $kg/(m^3 \cdot c \cdot \text{ед.движ.силы})$.

Расход адсорбента:

$$L = 1,2G \frac{\bar{y}_n - \bar{y}_k}{\bar{x}_{pk} - \bar{x}_n},$$

где G – массовый расход инертной части парогазовой смеси, кг/с; \bar{y}_H, \bar{y}_K – начальная и конечная относительные концентрации парогазовой смеси кг компонента/кг смеси; \bar{x}_{p_k} – относительная равновесная концентрация извлекаемого компонента в отработанном адсорбенте, кг компонента/кг адсорбента; \bar{x}_H – начальная относительная концентрация извлекаемого компонента в адсорбенте, кг компонента/кг адсорбента.

7.6. ИОННЫЙ ОБМЕН

Ионообменный процесс – избирательное поглощение одного или нескольких компонентов из растворов с помощью катионов и анионов ионита, используемое в химической технологии для глубокой очистки растворов; удаления из сточных вод вредных примесей и организации оборотного водоснабжения; для разделения металлов с близкими свойствами.

Катион – положительно заряженная частица.

Анион – отрицательно заряженная частица.

Иониты – природные или синтетические адсорбенты, нерастворимые в воде и в обычных растворителях, обладающие подвижными ионами, которые способны обмениваться на эквивалентное количество ионов раствора.

Катионит – ионит, обменивающийся с раствором подвижными катионами – ионами водорода H^+ или другими положительно заряженными частицами.

Анионит – ионит, обменивающийся с раствором подвижными анионами – ионами гидроксила OH^- или другими отрицательно заряженными частицами.

По степени ионизации (способности к обмену подвижными ионами) катиониты и аниониты делятся:

I. Катиониты.

1. Высокоионизированные катиониты – КУ (универсальные), обладают способностью к обмену ионов H^+ с широким диапазоном изменения pH раствора.

2. Слабоионизированные катиониты – КБ (буферные), способны к обмену ионов H^+ на ион металла только в щелочных и отчасти нейтральных растворах.

II. Аниониты.

1. Высокоионизированные АВ, обладают универсальным действием.

2. Низкоионизированные АН, способны обмениваться анионами лишь в кислых и отчасти нейтральных растворах.

Амфотерные иониты – иониты, способные к катионному и анионному обмену одновременно.

Типичные реакции ионного обмена:

1. Катионный обмен



где R – органическая основа ионита с какой-либо заряженной функциональной группой.

2. Анионный обмен



Обменная емкость ионита - количество функциональных групп (катионов или анионов), принимающих участие в обмене, которое выражается в эквивалентных единицах и относится к единице количества ионита, г-экв/м³.

Константа равновесия ионообменного процесса:

$$K_{i,j} = \frac{[C_i]^{1/Z_i} \cdot [a_j]^{1/Z_j}}{[C_j]^{1/Z_j} \cdot [a_i]^{1/Z_i}},$$

где C_i, C_j - концентрация i -го и j -го ионов металла в растворе, г-экв/м³ раствора; a_i, a_j - концентрация i -го и j -го ионов металла в ионите, г-экв/м³ адсорбента; Z_i, Z_j - стехиометрические коэффициенты i -го и j -го ионов металла.

Закон действующих масс - уравнение изотермы ионообменного процесса:

$$\frac{[a_i]^{1/Z_i}}{[a_j]^{1/Z_j}} = K_{i,j} \cdot \frac{[C_i]^{1/Z_i}}{[C_j]^{1/Z_j}}.$$

Уравнение баланса ионов в растворе:

$$C_i + C_j = C_0;$$

уравнение баланса ионов в ионите:

$$a_i + a_j = a_0,$$

где C_0, a_0 – начальная концентрация ионов в растворе и в адсорбенте соответственно; C_i – концентрация ионов, перешедших из ионита в раствор; C_j – концентрация ионов, оставшихся в растворе; a_i - концентрация ионов, оставшихся в ионите; a_j - концентрация ионов, перешедших из раствора в ионит.

Способы проведения ионообменных процессов:

- **в статических условиях:** в аппарат периодического действия загружают ионит и раствор, полученную суспензию перемешивают до насыщения ионита адсорбирующимся веществом;
- **в динамических условиях:** раствор пропускают через неподвижный слой ионита до момента проскока, данный способ позволяет осуществить более глубокую очистку раствора по сравнению со статическим методом, вследствие последовательного контакта очищенного раствора со свежими, неотработанными слоями ионита.

Классификация ионообменников.

I. Ионообменные колонны периодического действия с неподвижным слоем ионита.

II. Ионообменные колонны непрерывного действия.

1. С движущимся слоем ионита.

2. С кипящим слоем ионита.

3. С кипящим слоем ионита и пневматическим перемешиванием.

Методы расчета ионообменных аппаратов аналогичны расчетам адсорберов.

7.7. СУШКА

Сушка – тепловой процесс удаления влаги из твердых влажных материалов путем ее испарения и отвода образовавшихся паров.

Формы связи влаги с материалом.

1. Химическая связь (ионная и молекулярная) - влага входит в состав химического соединения, является трудноизвлекаемой из материала и удаляется она прокаливанием или в результате проведения химической реакции.

2. Физико-химическая связь (адсорбционная и осмотическая) - влага удерживается в микропорах материала за счет действия сил адсорбции (адсорбционная) или проникает внутрь клеток материала вследствие диффузии (осмотическая), извлекается значительно труднее и может быть удалена различными методами сушки.

3. Физико-механическая связь – влага удерживается на поверхности материала и в его макропорах за счет сил взаимодействия между молекулами жидкости, такую влагу проще всего удалить из материала путем его отжатия или прессования.

Движущая сила процесса сушки – разность потенциалов процесса сушки, которая выражается следующими способами:

1) разностью парциальных давлений паров над материалом P_m и в окружающей среде P_n :

$$\Delta P = P_m - P_n,$$

2) разностью влагосодержаний газа (воздуха) в состоянии насыщения x_n и при данных условиях:

$$\Delta x = x_n - x,$$

3) разностью температур сухого t_c и мокрого термометров $t_{m.t}$ (потенциал сушки)

$$\Delta t = t_c - t_{m.t}.$$

4) разностью равновесной и рабочей концентраций паров влаги в сушильном агенте

$$\Delta C = C_p - C;$$

5) разностью абсолютной рабочей и равновесной влажностей материала

$$\Delta\omega = (\omega^a - \omega_p^a).$$

Виды методов сушки в зависимости от способа подвода теплоты к высушиваемому материалу.

1. Конвективная - в этом случае осуществляется непосредственный контакт сушильного агента с материалом, в качестве сушильного агента чаще всего выступает нагретый воздух (в пищевой технологии) или топочные газы.

2. Контактная – метод, при котором теплота передается влажному материалу от теплоносителя через разделяющую их стенку. В качестве теплоносителя используются пар, расплавы солей и металлов, вода.

3. Радиационная – метод сушки инфракрасными лучами, теплота материалу передается от излучателей – электрических ламп, газовых горелок.

4. Сушка токами высокой частоты (ТВЧ) - метод сушки основан на выделении в диэлектрическом материале значительного количества теплоты под воздействием высокочастотного электрического поля.

5. Сублимационная - сушка материала протекает в замороженном состоянии путем перевода влаги из твердого состояния в пар.

6. Комбинированная – в этом случае используется несколько вышеперечисленных способов подвода теплоты к материалу, например радиационно-конвективная.

Аппараты сушильные (сушилки) – аппараты для проведения процессов сушки.

Классификация конструкций сушилок.

I. По способу подвода теплоты:

1. Конвективные:

а) с неподвижны или движущимся плотным слоем материала (камерные, туннельные, петлевые, ленточные сушилки);

б) с перемешиванием слоя материала (барабанные сушилки);

в) со взвешенным слоем материала (распылительные сушилки, сушилки с кипящим слоем материала).

2. Контактные (шнековые, вальцевые, вакуум–гребковые, барабанные контактные сушилки и вакуумные шкафы).

3. Терморadiационные (сушилки с газовым и электрическим обогревом).

4. Высокочастотные (диэлектрические).

5. Сублимационные (молекулярные).

6. Комбинированные (конвективно-контактные, контактно-радиационные, вальцево – ленточные и т.д.).

II. По принципу работы:

1. Периодические.

2. Непрерывные.

III. По величине давления в сушильной камере:

1. Вакуумные.

2. Атмосферные.

IV. По взаимному направлению движения материала и сушильного агента:

1. Прямоточные.
2. Противоточные.
3. Смешанного тока.
4. Перекрестного тока.

Конвективные сушилки с рециркуляцией отработавшего воздуха – сушилки, используемые для предотвращения коробления и растрескивания материалов за счет тонкой регулировки влажности и температуры воздуха в сушильной камере.

Коэффициент рециркуляции – количество отработанного воздуха, подаваемое на 1 кг свежего воздуха в сушилке с рециркуляцией отработанного воздуха.

Влажный воздух – смесь сухого воздуха и водяного пара.

Абсолютная влажность воздуха - масса водяного пара, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха, численно равная плотности водяного пара $\rho_{\text{п}}$, кг/м³.

Относительная влажность воздуха (степень насыщения) – отношение массы водяного пара, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха к максимально возможной массе водяного пара в 1 м³ воздуха в условиях насыщения:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}},$$

где $\rho_{\text{п}}$ - плотность водяного пара в воздухе, кг/м³; $\rho_{\text{н}}$ - плотность насыщенного водяного пара в воздухе, кг/м³; $P_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара, Па; $P_{\text{н}}$ - парциальное давление насыщенного водяного пара, Па;

Влагосодержание воздуха (кг влаги/кг а.с.в.) – масса водяного пара во влажном воздухе, приходящаяся на 1 кг абсолютно сухого воздуха (а.с.в.):

$$x = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{а.с.в}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{а.с.в}}},$$

где $G_{\text{п}}$ – масса водяного пара, кг; $G_{\text{а.с.в.}}$ - масса абсолютно сухого воздуха, кг; $\rho_{\text{а.с.в}}$ - плотность абсолютно сухого воздуха, кг/м³.

Энтальпия (теплосодержание, Дж/кг а.с.в.) – количество теплоты, содержащейся в воздухе, равна сумме энтальпий абсолютно сухого воздуха ($c_{\text{а.с.в}} \cdot t$) и водяного пара ($x i_{\text{п}}$):

$$I = c_{\text{а.с.в}} t + x i_{\text{п}},$$

где $c_{\text{а.с.в}}$ – теплоемкость абсолютно сухого воздуха, Дж/(кг·град); t – температура воздуха, °С; $i_{\text{п}}$ - теплосодержание пара (Дж/кг пара).

I-x диаграмма - косоугольная система координат с осью ординат, по которой откладываются энтальпия I , температура t , парциальное давление водяного пара $P_{\text{п}}$, и осью абсцисс – влагосодержания x , которая используется для графоаналитического расчета процессов сушки.

Относительная влажность материала – количество влаги в материале $G_{\text{вл}}$, отнесенное к общей массе влажного материала G , выраженное в процентах:

$$\omega = \frac{G_{\text{вл}}}{G} 100\% .$$

Абсолютная влажность материала – количество влаги в материале $G_{\text{вл}}$, отнесенное к массе абсолютно сухого материала $G_{\text{а.с.}}$, выраженное в процентах:

$$\omega^a = \frac{G_{\text{вл}}}{G_{\text{а.с}}} 100\% .$$

Целью расчета процесса сушки является составление материального баланса, с помощью которого определяется расход абсолютно сухого воздуха и определение внутреннего теплового баланса процесса сушки в сушильной камере.

Материальный баланс процесса сушки по расходу:

$$G_1 = G_2 + W ,$$

где G_1, G_2 – производительность сушилки по влажному и сухому материалу, кг/с; W – массовый расход испаряемой влаги, кг/с.

Материальный баланс по абсолютно сухому веществу:

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1} ,$$

$$G_1 = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1} \text{ или } G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} ,$$

где ω_1, ω_2 - относительные влажности влажного и высушенного материала, %.

Материальный баланс по влаге:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0} ,$$

где L - расход абсолютно сухого воздуха, кг а.с.в./с.

$$I = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} ,$$

где I - удельный расход абсолютно сухого воздуха, показывающий, какое количество абсолютно сухого воздуха необходимо подавать в сушилку для испарения 1 кг влаги, кг а.с.в./кг вл.; x_0, x_2 – влагосодержание исходного воздуха и отработанного воздуха, соответственно, кг вл./кг а.с.в.

Тепловой баланс процесса конвективной сушки:

$$\Delta = I(I_2 - I_1) ,$$

где I_1, I_2 - энтальпия воздуха на входе и выходе из сушильной камеры, Дж/кг а.с.в.; $\Delta = C_{\text{в}} t_{\text{м}}^{\text{н}} + q_{\text{д}} - \sum q_{\text{п}}$ - внутренний тепловой баланс процесса

сушки в сушильной камере; $q_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{д}}}{W}$ - удельный приход теплоты от

дополнительного калорифера, Дж/кг вл.; $\sum q_{\text{п}} = q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{п}}$ - суммарные

удельные потери теплоты, Дж/кг вл.; $q_{\text{м}} = \frac{G_{\text{м}} C_{\text{м}} (t_{\text{м}}^{\text{к}} - t_{\text{м}}^{\text{н}})}{W}$ - удельный расход

теплоты на нагрев материала, Дж/кг вл.; $q_{тр} = \frac{G_{тр} C_{тр} (t_{тр}^k - t_{тр}^h)}{W}$ - удельный

расход теплоты на нагрев транспортных устройств, Дж/кг вл.; $q_{п} = \frac{Q_{п}}{W}$ -

удельные потери теплоты в окружающую среду, Дж/кг вл.; G_m - производительность сушилки по сухому материалу, кг/с; W - массовый расход испаряемой влаги, кг/с; t_m^h, t_m^k - начальная и конечная температура материала, °С; C_m, C_v - массовая теплоемкость материала и влаги при начальной температуре, Дж/(кг·С); $G_{тр}$ - масса транспортных устройств, поступающих в сушильную камеру в единицу времени, кг/с; $t_{тр}^h, t_{тр}^k$ - начальная и конечная температура транспортных устройств, °С; $C_{тр}$ - теплоемкость материала транспортных устройств, Дж/(кг·С); Q_d - тепловой поток от дополнительного калорифера, Вт; $Q_{п}$ - тепловой поток потерь теплоты в окружающую среду, Вт.

Кривая сушки - изменение абсолютной влажности материала во времени $\omega^a=f(\tau)$.

Температурная кривая - изменение температуры материала во времени $t=f(\tau)$.

Кривая скорости сушки - зависимость скорости сушки от абсолютной влажности материала $v=f(\omega^a)$.

Свободная влага - влага, скорость испарения которой равна скорости ее испарения с поверхности материала.

Связанная влага - влага, скорость испарения которой меньше скорости ее испарения с поверхности материала.

Интенсивность испарения влаги - количество влаги, удаляемой с единицы поверхности материала в единицу времени:

$$J = \frac{M}{F\tau},$$

где M - количество влаги, кг; F - площадь поверхности материала, м²; τ - время процесса, с.

Скорость сушки - изменение абсолютной влажности материала за бесконечно малый промежуток времени, что соответствует тангенсу угла наклона касательной, проведенной к кривой сушки:

$$v = \frac{d\omega^a}{d\tau}.$$

Периоды протекания процесса сушки.

1. Период прогрева материала - период сушки, при котором испаряется свободная влага, наблюдается в интервале от начальной температуры до температуры мокрого термометра. Данный этап характеризуется незначительным изменением влажности материала и постепенным возрастанием скорости процесса.

2. Период постоянной скорости сушки - влага за счет влагопроводности, обусловленной градиентом влаги в материале, поступает по капиллярам из

глубинных слоев к поверхности. В данном периоде происходит испарение свободной влаги с поверхности материала вследствие диффузии пара через пограничный слой (внешняя диффузия). При фиксированных параметрах сушильного агента (скорости и температуре) скорость испарения остается постоянной $v = \text{const}$, температура равняется температуре мокрого термометра $t = t_{\text{м.т.}}$. Концу данного периода сушки соответствует гигроскопическая точка и соответствующая ей первая критическая влажность $\omega_{\text{кр1}}^a$.

3. Период падающей скорости сушки - зона испарения влаги постепенно перемещается в глубь материала, и наиболее прочно связанная адсорбционная влага перемещается уже в порах вещества только в виде пара (внутренняя диффузия). Высушиваемый материал находится в гигроскопическом состоянии, при котором пары влаги над его поверхностью не насыщены. За счет уменьшения поверхности испарения скорость сушки постепенно падает и становится равной нулю. Форма кривой скорости в этом периоде зависит от структуры высушиваемого материала, а его влажность приближается к равновесной ω_p^a . Поверхность материала, свободная от поверхностной влаги, постепенно нагревается и в конце периода ее температура становится равной температуре сушильного агента.

Напряжение сушилки по влаге - количество влаги, удаляемое за единицу времени с единицы объема или поверхности сушильной камеры:

$$A_V = \frac{M}{V} \text{ или } A_F = \frac{M}{F},$$

где V , F – объем и поверхность сушильной камеры, соответственно, м^3 и м^2 .

7.8. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Кристаллизация – процесс выделения твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов, а также из газообразного состояния.

Маточный раствор - раствор, оставшийся после кристаллизации.

Полиморфизм – явление образования нескольких кристаллических форм у данного химического соединения.

Кристаллогидраты – кристаллы, включающие молекулы воды.

Массовая кристаллизация – получение большого числа кристаллов в промышленных масштабах.

Изменяя растворимости кристаллизуемых веществ, можно подобрать такие условия кристаллизации, при которых отдельный компонент выделяется в виде твердой фазы, а другие (примеси) остаются в растворе.

Стадии процесса кристаллизации.

1. Собственно кристаллизация.
2. Отделение кристаллов от маточных растворов.
3. Перекристаллизация.
4. Промывка и сушка кристаллов.

В химической технологии процесс кристаллизации используется для получения веществ в чистом виде, либо для очистки растворов, расплавов и газов. Кристаллизацию можно проводить за счет изменения температуры раствора, удаления части растворителя, а также добавления в кристаллизующийся раствор твердых, газообразных или жидких веществ (высаливающих средств), растворимость кристаллизуемого вещества в которых значительно меньше, чем в исходном растворе.

Скорость кристаллизации зависит от ряда факторов: степени пересыщения раствора, интенсивности перемешивания, наличия примесей и физических полей (магнитное, электрическое, ультразвуковое). Кристаллизация начинается с зародышей (центров кристаллизации), вокруг которых происходит рост кристаллов. Скорость образования зародышей зависит от температуры и пересыщения раствора, механических воздействий (перемешивание, встряхивание), степени шероховатости поверхностей, типа перемешивающих устройств. С повышением температуры скорость роста кристаллов увеличивается, поскольку при этом ускоряется диффузия, облегчается подход из раствора новых молекул вещества, из которых складывается структура кристаллов.

Центры кристаллизации – зародыши, образующиеся в пересыщенных или переохлажденных растворах самопроизвольно.

Кристаллы – твердые вещества, имеющие упорядоченное, периодически повторяющееся в пространстве расположение своих атомов. Характеризуются формой, размером, фракционным составом и чистотой.

Форма кристалла – определяется природой кристаллизующегося вещества и в некоторой степени зависит от наличия примесей в растворе.

Размер кристаллов зависит от скорости роста кристаллов, более крупные кристаллы получают при медленном росте и небольшом пересыщении раствора. Крупные кристаллы получают, вводя предварительно в раствор затравочные кристаллы и удаляя из зоны кристаллизации мелкие фракции.

Фракционный состав кристаллов регулируют сужением пределов температуры и концентрации раствора, обеспечивающим уменьшение содержания мелких фракций.

Чистота получаемых кристаллов зависит от ряда факторов, в том числе от размеров кристаллов. Мелкие кристаллы имеют большую наружную поверхность, на которой задерживается маточный раствор, и, следовательно, продукт в этом случае содержит больше примесей, чем при образовании крупных кристаллов. Однако и крупные кристаллы могут содержать включения раствора в трещинах, полостях или адсорбировать его гранями. При получении особо чистых веществ их подвергают перекристаллизации.

Кристаллизаторы – аппараты для проведения процессов кристаллизации.

Классификация промышленных кристаллизаторов.

I. Кристаллизаторы с удалением части растворителя: выпарные аппараты – кристаллизаторы с подвесной греющей камерой, выносной нагревательной камерой и др.

II. Кристаллизаторы с охлаждением раствора: качающиеся, шнековые, с ленточной мешалкой, барабанные с водяным и воздушным охлаждением, вальцевые.

III. Вакуум – кристаллизаторы: вертикальные аппараты цилиндрической формы с рамными или якорными мешалками без охлаждающих устройств.

IV. Кристаллизаторы с псевдооживленным слоем: с удалением части растворителя испарением или с охлаждением раствора до его пересыщения.

Целью расчета процесса кристаллизации является составление материального баланса с последующим определением необходимого количества исходного раствора и подбором объема аппарата, теплового баланса, из которого определяют необходимое количество охлаждающего агента, тепловую нагрузку аппарата с последующим определением из уравнения теплопередачи времени стадии охлаждения.

Материальный баланс кристаллизации:

$$G_1 = G_2 + G_{кр},$$

где G_1, G_2 - расходы исходного и маточного растворов, кг/с; $G_{кр}$ - выход кристаллов, кг/с.

Выход кристаллов рассчитывается по формуле:

$$G_{кр} = \frac{G_1(B_1 - B_2)}{B_{кр} - B_2},$$

где B_1, B_2 - концентрация исходного и маточного растворов, мас. дол; $B_{кр}$ - концентрация сухого вещества в выпавших кристаллах, мас. дол.

Тепловой баланс кристаллизации:

$$Q = Q_1 + Q_{кр} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5,$$

где $Q_1 = G_1 c_1 t_{1н}$ - теплота, вносимая с исходным раствором, Вт; G_1 - расход исходного раствора, кг/с; c_1 - теплоемкость исходного раствора, Дж/(кг·К); $t_{1н}$ - температура исходного раствора, °С; $Q_{кр} = G_{кр} q_{кр}$ - теплота кристаллизации, Вт; $Q_2 = G_2 c_2 t_{1к}$ - теплота, уходящая с маточным раствором, Вт; G_2 - расход маточного раствора, кг/с; c_2 - теплоемкость маточного раствора, Дж/(кг·К); $t_{1к}$ - температура маточного раствора и кристаллов, °С; $Q_3 = G_{кр} c_{кр} t_{кр}$ - теплота, уходящая с кристаллами, Вт; $G_{кр}$ - расход кристаллов, кг/с; $c_{кр}$ - теплоемкость кристаллов, Дж/(кг·К); $t_{кр}$ - конечная температура кристаллов, °С; $Q_4 = G_B c_B (t_{2к} - t_{2н})$ - теплота, отнимаемая охлаждающим агентом, Вт; G_B - расход охлаждающего агента (воды), кг/с; c_B - теплоемкость охлаждающего агента (воды), Дж/(кг·К); $t_{2н}, t_{2к}$ - начальная и конечная температуры охлаждающего агента, °С; Q_5 - теплота, теряемая в окружающую среду, Вт.

Теплота кристаллизации $q_{кр}$ согласно закону Гесса равна сумме теплот образования получаемых продуктов q_c минус сумма теплот образования исходных продуктов q_a, q_b :

$$q_{кр} = q_c - q_a - q_b.$$

Время процесса охлаждения:

$$\tau = \frac{Q}{KF\Delta t_{cp}},$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F – поверхность аппарата, м²; Δt_{cp} – средняя разность температур для процесса охлаждения.

7.9. ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

Выщелачивание - процесс извлечения компонента из твердого пористого тела с помощью избирательного растворителя, в качестве которого наиболее часто используют воду или водные растворы неорганических кислот, органические растворители.

Стадии выщелачивания:

- 1) проникновение растворителя в поры твердого тела, растворение компонента или химическая реакция с ним;
- 2) диффузия компонента внутри тела к границе раздела фаз;
- 3) отвод компонента через ламинарный слой (δ) в основную массу растворителя (массоотдача).

Движущая сила выщелачивания - градиент концентраций между концентрацией компонента на границе раздела фаз и его концентрацией в растворителе:

$$\Delta C = C_n - C.$$

Закон массоотдачи Шукарева для процесса выщелачивания описывает перенос компонента от границы раздела в растворитель (внешний массообмен):

$$\frac{dM}{Fd\tau} = \beta(C_n - C).$$

Первый закон Фика описывает перенос компонента в порах тела, осуществляемый молекулярной диффузией:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right),$$

где r – радиус частицы, м.

Основные способы выщелачивания.

1. Замкнутый периодический процесс (в установках с механическим или пневматическим перемешиванием).

2. Непрерывные прямоточные и противоточные процессы (в каскадных установках с мешалками, шнековых и барабанных экстракторах, экстракторах с псевдооживленным слоем).
3. Фильтрационный процесс в неподвижном слое (в диффузорах).

Классификация аппаратов для проведения процесса выщелачивания.

I. По способу действия:

1. Периодические.
2. Непрерывные.

II. В зависимости от взаимного направления движения фаз:

1. Прямоточные.
2. Противоточные.
3. Аппараты, работающие по принципу смешанного тока.

III. По способу создания скорости обтекания твердых частиц жидкостью:

1. С неподвижным слоем твердого материала (выщелачивание в батарее диффузоров).
2. С механическим перемешиванием (шнековые и барабанные экстракторы).
3. Со взвешенным или кипящим слоем (трубчатые экстракторы, экстракторы с псевдооживленным слоем).

При расчетах процесса выщелачивания число теоретических ступеней, необходимое для проведения данного процесса, определяется графическим способом с использованием треугольной диаграммы.

7.10. МЕМБРАННЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

Мембранные процессы - процессы разделения газовых и жидких смесей посредством использования полупроницаемых мембран.

Пермеат (фильтрат) - вещество, прошедшее через мембрану.

Ретант (концентрат) - оставшаяся часть смеси.

Мембрана – это твердая или жидкая перегородка, через которую могут проникать все или часть компонентов смеси.

Классификация мембран.

I. По природе происхождения:

- 1) природные – мембраны, полученные на основе живых организмов;
- 2) синтетические мембраны – органические и неорганические.

II. По структуре:

- 1) пористые мембраны (порошки, микропористая керамика, пористые полимерные структуры);
- 2) непористые мембраны (металлические пленки, стекло, фольга, жидкие пленки).

Требования, предъявляемые к мембранам:

- высокая селективность;
- высокая удельная производительность (проницаемость);
- химическая стойкость к воздействию разделяемой среды;
- высокая механическая прочность.

Механизмы мембранного массопереноса.

I. Без химического взаимодействия проникающего компонента и материала мембраны.

1. Осмос - процесс разделения раствора путем проникания через мембрану растворителя из области с меньшей концентрацией растворенного вещества в область с большей концентрацией.

2. Обратный осмос - процесс разделения раствора путем преимущественного проникания растворителя через мембрану под действием внешнего давления.

3. Аномальный осмос – осмотический процесс в электролитах, при котором в результате массопереноса компонента противоположные поверхности мембраны получают разноименные заряды, и в теле мембраны проходит ток.

4. Ультрафильтрация - мембранный процесс отделения растворенного вещества большой молекулярной массы (условно принимается, что она должна быть больше 500) от низкомолекулярных веществ и растворителя под действием внешнего давления.

5. Диализ - диффузионный процесс разделения смеси веществ, основанный на различии их скоростей диффузии через мембрану.

6. Пьезодиализ – процесс диффузионного проникновения раствора через мембрану за счет разности давлений.

7. Электродиализ – процесс разделения ионов растворенного вещества под действием постоянного электрического поля при их пропускании через мембрану;

8. Испарение через мембрану - процесс проникания компонента из жидкой в паровую фазу через мембрану.

II. С химическим взаимодействием проникающего компонента и материала мембраны.

1. Облегченная диффузия – процесс диффузионного переноса целевого компонента в мембране с повышенным коэффициентом диффузии за счет наличия в мембране вещества-носителя.

2. Активный перенос – процесс диффузионного переноса вещества против градиента его концентрации за счет химического взаимодействия компонентов между собой внутри мембраны при каталитическом воздействии ее материала.

I закон Фика (закон молекулярной диффузии для мембранного процесса)

$$W = \frac{M}{F\tau} = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где M – количество вещества, кг; F – поверхность мембраны, m^2 ; τ - время процесса, с; W – скорость процесса, $kg/(m^2 \cdot c)$, D – коэффициент молекулярной диффузии, m^2/c ; $\partial C / \partial x$ - градиент концентрации, $kg \cdot m / m^3$.

Закон Дарси - характеризует скорость проникания потока вещества через пористую среду:

$$\frac{V}{F\tau} = \frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x},$$

где V – объем жидкости, м^3 ; μ – динамический коэффициент вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\partial p/\partial x$ – градиент давления, $\text{Па}/\text{м}$; K – коэффициент проницаемости Дарси.

Закон Вант-Гоффа – осмотическое давление в растворах прямо пропорционально концентрации растворенного вещества:

$$p_c = \alpha RTC,$$

где R – универсальная газовая постоянная $8,31 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$; T – абсолютная температура, К .

Закон Ома для электролиза – ионный поток прямо пропорционален градиенту электрических потенциалов:

$$j_q = \frac{b}{R_э} \frac{\partial U}{\partial x},$$

где $R_э$ – электрическое сопротивление; $\partial U/\partial x$ – градиент электрического потенциала, b – коэффициент пропорциональности.

Классификация аппаратов для мембранного разделения.

I. С плоскими мембранными элементами, например аппарат типа “фильтр-пресс”.

II. С трубчатыми мембранными элементами.

III. С рулонными мембранными элементами.

IV. С мембранами в виде полых волокон.

1. С мембранными элементами в виде полых волокон.

2. С параллельным расположением полых волокон.

3. С U – образным расположением полых волокон.

Целью расчета аппаратов мембранного разделения смесей является определение необходимой поверхности мембраны F при известной производительности по исходному раствору и его составу.

По выходу фильтрата a рассчитывают его массовый расход:

$$W = aL_0,$$

где L_0 – производительность по исходному раствору, $\text{кг}/\text{с}$.

Из уравнений материального баланса определяют количество концентрата L_k и его состав \bar{x}_k :

$$\begin{cases} L_0 = W + L_k, \\ L_0 \bar{x}_0 = W \bar{y}_k + L_k \bar{x}_k, \end{cases}$$

где \bar{x}_0 и \bar{x}_k – концентрации исходного и конечного растворов соответственно, кг вещества/ кг раствора; \bar{y}_k – концентрация вещества в концентрате (ретанте), кг вещества/ кг раствора.

$$\begin{aligned} L_k &= L_0 - W, \\ \bar{x}_k &= \frac{(\bar{x}_0 - a\bar{y}_k)}{(1 - a)}. \end{aligned}$$

Селективность мембраны:

$$\varphi = \frac{(\bar{x}_k - \bar{y}_k)}{\bar{x}_k}$$

Для выбранной мембраны по справочным данным находят проницаемость q , кг/м²с, а затем ее рабочую поверхность F , м²:

$$F = \frac{W}{q}$$

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте классификацию массообменных процессов.
2. Какие существуют способы выражения составов фаз?
3. Сформулируйте закон Генри и закон Рауля.
4. Что такое коэффициент распределения?
5. Запишите уравнение линии рабочих концентраций.
6. Сформулируйте первый и второй законы Фика. Каков физический смысл коэффициента молекулярной диффузии?
7. Дайте определения массоотдачи и массопередачи.
8. Запишите уравнения массоотдачи и массопередачи.
9. Назовите основные критерии подобия массообменных процессов.
10. Что является движущей силой массообменных процессов?
11. Каким образом определяется высота массообменного аппарата с непрерывным и со ступенчатым фазовыми контактами?
12. В чем заключается физическая сущность процесса абсорбция?
13. Каким образом составляется материальный и тепловой балансы абсорбции?
14. Дайте классификацию абсорбционных аппаратов.
15. В каком порядке проводится расчет абсорберов?
16. Назовите виды простой перегонки.
17. Составьте уравнение материального баланса для простой перегонки.
18. Запишите общий материальный баланс ректификационной установки непрерывного действия.
19. Составьте материальный баланс укрепляющей части ректификационной колонны непрерывного действия и запишите уравнение рабочей линии.
20. Запишите уравнение рабочей линии для исчерпывающей части ректификационной колонны непрерывного действия.
21. Что такое флегмовое число?
22. Сформулируйте физический смысл коэффициента расхода.
23. Какие стадии включает в себя механизм экстракции?
24. Дайте классификацию экстракторов.
25. Что понимают под коэффициентом распределения экстракции?
26. Перечислите основные методы экстракции.
27. Виды промышленных адсорбентов и их характеристика.
28. Что такое изотерма адсорбции?
29. Перечислите основные типы промышленных адсорберов.
30. Запишите критериальное уравнение массопроводности процесса адсорбции.
31. Сформулируйте понятия: катиона, аниона, ионитов.

32. Запишите типичные реакции ионного обмена.
33. Что является константой равновесия ионообменного процесса?
34. Дайте классификацию ионообменников.
35. Что такое кристаллизация? Для каких целей кристаллизация применяется в промышленности?
36. Перечислите основные типы промышленных кристаллизаторов.
37. Составьте материальный и тепловой балансы кристаллизации.
38. Перечислите основные способы сушки.
39. Какие существуют формы связи влаги с материалом?
40. Что такое энтальпия и влагосодержание влажного воздуха?
41. Дайте определение абсолютной и относительной влажности материала.
42. Составьте тепловой баланс конвективной сушилки.
43. Перечислите периоды протекания процесса сушки.
44. Что такое выщелачивание?
45. Перечислите основные стадии выщелачивания.
46. Что является движущей силой процесса выщелачивания?
47. Что понимают под мембранными методами разделения смесей?
48. Как классифицируют мембраны по их структуре, форме фильтрующих элементов и природе происхождения?
49. Какие существуют механизмы мембранного разделения, в чем состоит их физическая сущность?
50. Перечислите требования, предъявляемые к мембранам?
51. Дайте классификацию аппаратов для мембранного разделения.
52. Что является целью расчета аппаратов для мембранного разделения?

Список библиографических источников

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.; Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос; Высш. шк., 2002. Кн.1. 912 с.: ил.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.; Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос; Высш. шк., 2002. Кн.2. 872 с.: ил.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. 2-е изд. В 2-х кн.: Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 400 с.: ил.
4. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. 2-е изд. В 2-х кн.: Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 368 с.: ил.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. – 10-е изд., стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973г. - М.: ООТИД “Альянс”, 2004. 753 с.
6. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский; Под ред. Ю.И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Химия, 1991. 496 с.
7. Громогласов А.А. и др. Водоподготовка: Процессы и аппараты: Учеб. пособие для вузов/А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков; Под ред. О.И. Мартыновой. М.: Энергоатомиздат, 1990. 272с.:ил.
8. Гельперин н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах. М.: Химия, 1981. 812с.: ил.
9. Волкова Г.В., Шадрина Е.М. Гидромеханические процессы. Основные понятия, закономерности, конструкции аппаратов и примеры расчетов

оборудования: Учеб. пособие / ГОУВПО Иван. гос. хим. – технол. ун-т. Иваново, 2005. 128с.

10. Кисельников В.Н. Гидромеханические процессы: Учебное пособие. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 1999. 184с.: ил.
11. Гидравлика и гидравлические машины: Учеб. пособие / Е.П. Барулин, М.И. Кручинин, А.Л. Павлов, Е.С. Сливченко; Под. ред. проф. В.Я. Лебедева; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.; Иваново, 1998. 80с.
12. Маркичев Н.А., Кручинин М.И. Техническая термодинамика и энерготехнология химических производств: Учеб. пособие / Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2001. 63с.

Кувшинова Анастасия Сергеевна
Липин Александр Геннадьевич
Маркичев Николай Аркадьевич
Исаев Вадим Николаевич

**ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПО КУРСУ
“ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ”**

Учебное пособие

Редактор О.А. Соловьева

Подписано в печать 11.06.2008. Усл.п.л. 5,58. Уч.-изд.л. 6,19.

Формат 60x84 1/16. Тираж 200 экз. Заказ .

ГОУ ВПО Ивановский государственный химико-технологический университет
Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и финансов

ГОУ ВПО "ИГХТУ"

153000, Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7