

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
АПАТИТСКИЙ ФИЛИАЛ

Методические указания к выполнению практических работ

По дисциплине: Б1.В.03.ДВ.04.01 Процессы и аппараты химических производств
указывается цикл (раздел) ОП, к которому относится дисциплина, название дисциплины

для направления подготовки (специальности) 04.03.01 Химия
код и наименование направления подготовки (специальности)

Неорганическая химия и химия координационных соединений
наименование профиля /специализаций/образовательной программы

Квалификация выпускника, уровень подготовки бакалавр
(указывается квалификация (степень) выпускника в соответствии с ФГОС ВО)

Кафедра - разработчик: химии и строительного материаловедения
название кафедры - разработчика рабочей программы

Разработчик(и) А.В. Соловьев, доцент, к.т.н.
ФИО, должность, ученая степень, (звание)

Пояснительная записка

1. Методические указания составлены на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 04.03.01 Химия, утвержденного приказом Минобрнауки РФ от 17 июля 2017 года, № 671, учебного плана в составе ОП по направлению подготовки 04.03.01 Химия, профилю «Неорганическая химия и химия координационных соединений».

2. Цели и задачи учебной дисциплины (модуля). «Моделирование химических процессов»

Целью дисциплины (модуля) «Процессы и аппараты химических производств» является подготовка обучающегося в соответствии с квалификационной характеристикой бакалавра и рабочим учебным планом направления 04.03.01 Химия, что предполагает освоение обучающимися теоретических знаний в области химической технологии, раскрытие взаимосвязи между химией, технологией и аппаратурным оформлением технологического процесса, формирование навыков создания аппаратурно-технологических схем.

Задачи дисциплины (модуля):

- изучение проблем и закономерностей перехода от лабораторных процессов и моделей к промышленным процессам и аппаратам;
- формирование практических навыков решения конкретных технических задач и умения проектировать типовые технологические схемы химико-технологических процессов.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине «Процессы и аппараты химических производств»

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 04.03.01 Химия:

ПК-2-т - Способен осуществлять контроль качества сырья, компонентов и выпускаемой продукции химического назначения, проводить паспортизацию товарной продукции

ПК-3-т - Способен оказывать информационную поддержку специалистам, осуществляющим научно-конструкторские работы и технологические испытания

Результаты формирования компетенций и планируемые результаты обучения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Планируемые результаты обучения

№ п/п	Код компетенции	Компоненты компетенции, степень их реализации	Результаты обучения
1.	ПК-2-т - Способен осуществлять контроль качества сырья, компонентов и выпускаемой	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины и компетенция реализуется	Знать: 1. Операционное исчисление. 2. Российскую систему патентной информации. 3. Зарубежные базы данных и поисковые системы. Уметь: 1. Создавать 2D, 3D и полярные графики.

	продукции химического назначения, проводить паспортизацию товарной продукции	полностью	<p>2. Пользоваться греческим алфавитом как в уравнениях, так и в тексте.</p> <p>Владеть: Инженерными приложениями и инструментами моделирования такими, как Pro/ENGINEER, Excel.</p> <p><i>Индикаторы сформированности компетенций в реализуемой части:</i> ПК-2-т-1. Выполняет стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства ПК-2-т-2. Составляет протоколы испытаний, паспорта химической продукции, отчеты о выполненной работе по заданной форме</p>
3.	ПК-3-т - Способен оказывать информационную поддержку специалистам, осуществляющим научно-конструкторские работы и технологические испытания	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины и компетенция реализуется полностью	<p>Знать: - Mathcad и Autocad,</p> <p>Уметь: - работать с КОМПАС-3D и AutoCAD</p> <p>Владеть: - навыками научно-конструкторские работы.</p> <p><i>Индикаторы сформированности компетенций в реализуемой части:</i> ПК-3-т-1. Владеет навыками поиска необходимой информации в профессиональных базах данных (в т.ч., патентных) ПК-3-т-2. Составляет обзор литературных источников по заданной теме, оформляет отчеты о выполненной работе по заданной форме</p>

Таблица 2 - Перечень практических работ

№ ПР	Наименование тем, их содержание	Кол-во часов	№ темы по табл.4 РП
1	2	3	4
1.	Системы единиц измерения. Общие принципы расчета физических свойств жидкости.	2	1
2.	Гидравлика отверстий и насадков. Практическое применение основного уравнения гидростатики. Основные характеристики потока жидкости. Истечение при переменном напоре. Расчет напорных и безнапорных потоков. Режимы течения вязкой жидкости. Критерий Рейнольдса и характеристика течения потока.	4	2-3
3.	Практическое применение уравнения Бернулли. Потери напора на гидравлические сопротивления. Расчет диаметра трубопроводов. Потери напора в местных сопротивлениях.	4	4-5

4.	Определение кривой отклика для аппарата промежуточной гидродинамической модели. Расчёт безнапорных потоков. Основы теории подобия и анализ размерностей. Принципы моделирования. Использование критериальных уравнений для расчета процессов и аппаратов.	4	6-7
5.	<i>Изучение кинетики гравитационного осаждения. Определение потерь напора на гидростатическом сопротивлении.</i>	4	8
6.	Способ выражения состава фаз. Равновесие при массопередаче. Уравнения материального баланса. Рабочая линия. Движущая сила процессов массопередачи.	4	9-10
7.	Расчет высоты массообменных аппаратов. Устройство массообменных аппаратов. Материальный баланс ректификации. Устройство ректификационных аппаратов.	4	11-13
8.	Расчет экстракционных аппаратов. Устройство экстракционных аппаратов. Схемы экстракционных установок. Специальные виды экстракции.	4	14-15
9.	Построение треугольной диаграммы процесса экстракции.	4	16
10.	Определение тепловой нагрузки при нагревании и охлаждении без изменения агрегатного состояния. Теплопроводность.	3	17-18
	<u>Всего часов :</u>		37

Рекомендации к выполнению практических работ

ПЗ. 1. Системы единиц измерения. Общие принципы расчета физических свойств жидкости.

При расчете процессов и аппаратов приходится пользоваться различными данными о физических свойствах веществ (плотность, вязкость и др.) и параметрами, характеризующими состояние этих веществ (скорость, давление и др.). Все эти величины могут измеряться различными единицами.

В настоящее время применяется несколько систем единиц измерения. В зависимости от принятой системы та или иная физическая величина имеет определенную размерность. Размерность данной величины представляет собой ее выражение через величины, положенные в основу определенной системы единиц.

Основной системой единиц является Международная система единиц – система СИ, принятая XI Генеральной конференцией по мерам и весам в октябре 1960 г. В СССР, согласно ГОСТ 9867–61, система единиц СИ была введена с 1 января 1963 г., применяется она и сейчас как предпочтительная в РФ. Допускается также применение систем СГС и МКГСС и некоторых внесистемных единиц измерения.

В основу системы СИ положена *система МКС (метр – килограмм – секунда)*, в которой за основные величины приняты *единицы длины – метр (м), массы – килограмм (кг) и времени – секунда (сек)*.

Система СГС (сантиметр – грамм – секунда) отличается от системы СИ тем, что за *единицу длины принят сантиметр (см), а за единицу массы – грамм (г)*. Эта система применяется главным образом для физических измерений.

Система МКГСС (метр – килограмм-сила – секунда) отличается от системы СИ тем, что за основную величину вместо единицы массы принята *единица силы – килограмм-сила (кгс, или кГ)*. Эта система применяется при механических измерениях.

ПЗ. 2. Гидравлика отверстий и насадков. Практическое применение основного уравнения гидростатики. Основные характеристики потока жидкости. Истечение при переменном напоре. Расчет напорных и безнапорных потоков. Режимы течения вязкой жидкости. Критерий Рейнольдса и характеристика течения потока.

В инженерных расчетах часто возникает необходимость определения

расхода жидкости при её истечении через круглое отверстие в днище или стенке сосуда.

Пусть жидкость вытекает при $H = \text{const}$ (рис. 1 а) через отверстие в днище сосуда. Составим уравнение Бернулли для идеальной жидкости относительно сечений I—I и II—II причем сечение II—II примем за плоскость сравнения.

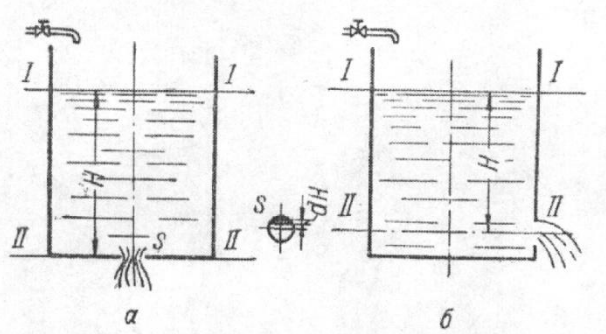


Рис. 1 Истечение через отверстие при постоянном уровне жидкости в сосуде:

а - через отверстие в днище; б - через отверстие в боковой стенке

В сечении I—I геометрический напор $z_1 = H$, а в сечении II—II напор $z_2 = 0$. Сосуд открыт, истечение через отверстие происходит в пространство с атмосферным давлением; следовательно, $p_1 = p_2$. Скоростью в поперечном сечении сосуда, по сравнению со скоростью в отверстии, можно пренебречь, т. е. принять $w_1 = 0$. Сделав соответствующие подстановки и сокращения в уравнении, получим:

$$H = \frac{w_2^2}{2g}.$$

Следовательно, весь напор H расходуется на создание скорости и, таким образом, теоретическая скорость истечения составляет:

$$w_{\tau} = w_2 = \sqrt{2gH}$$

При расчете истечения реальной жидкости надо учитывать сжатие струи на выходе из отверстия и потерю напора.

Отношение площади сечения струи в месте наибольшего сжатия $S_{сж}$ к сечению s отверстия называется *коэффициентом сжатия* струи:

$$\varepsilon = \frac{S_{сж.}}{s}$$

Коэффициент сжатия ε определяется опытным путем. При истечении реальной жидкости должна быть учтена потеря напора в местном сопротивлении - на входе в отверстие

$$\left(h_n = \xi \frac{w_2^2}{2g} \right); \text{ тогда уравнение Бернулли для сечений I—I и II—II}$$

примет вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_1 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + \xi \frac{w_2^2}{2g}$$

Считая $w_1 = 0$, $z_1 = H$ и $z_2 = 0$, получим из этого уравнения следующее выражение скорости истечения:

$$w = w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} \sqrt{2g \left(H + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \right)}$$

Если же $p_1 = p_2$, выражение скорости истечения упрощается:

$$w = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} \sqrt{2gH}$$

Величина $\frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}$ называется *коэффициентом скорости* и обозначается через φ . Коэффициент φ представляет собой отношение действительной скорости истечения к теоретической; значение его определяется по опытным данным.

Таким образом, скорость истечения реальной жидкости:

$$w = \varphi \sqrt{2gH}$$

Зная скорость истечения, можно определить расход жидкости через отверстие:

$$V = s_{сж.} w$$

После подстановки в уравнение расхода значения $s_{сж.}$ и w получим:

$$V = \varepsilon \varphi s \sqrt{2gH}$$

Произведение коэффициента сжатия струи ε на коэффициент скорости φ называется *коэффициентом расхода* и обозначается α . Следовательно $\alpha = \varepsilon \varphi$.

И уравнение расхода через отверстие получает следующий окончательный вид:

$$V = \alpha s \sqrt{2gH}$$

При истечении через отверстие в боковой стенке (см. рис.1 б) напор не будет одинаковым для всех точек по сечению отверстия. В этом случае расход жидкости может быть точно определен только путём суммирования, т. е. интегрирования элементарных расходов по всему сечению отверстия. Однако в технических расчетах для отверстия в тонкой боковой стенке можно с достаточной точностью пользоваться теми же расчетными уравнениями, что и для отверстия в дне сосуда. Лишь для отверстий больших размеров следует учитывать изменения коэффициентов расхода, значения которых приводятся в справочниках.

Насадком называется короткая труба длиной обычно от 3 до 4d, улучшающая условия вытекания жидкости. Например, если вода вытекает из

бака через отверстие и насадок (рис.2.), которые расположены на одной и той же глубине и диаметры которых равны, то в насадке расход воды будет примерно на 30 % больше, чем в отверстии.

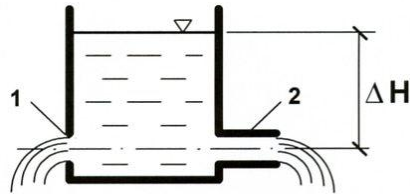


Рис. 2. Истечение из отверстия (1) и насадка(2)

Расход воды для отверстия или насадка находится по формуле

$$V = \alpha_0 s \sqrt{2g\Delta H},$$

где α_0 – коэффициент расхода (для круглого отверстия – 0.62, для насадка – 0.82); s – площадь поперечного сечения отверстия или насадка; ΔH – разность напоров.

При истечении жидкости через короткий цилиндрический патрубок (насадок) происходит дополнительная потеря энергии, главным образом вследствие внезапного расширения струи в патрубке. Поэтому скорость истечения жидкости через патрубок меньше скорости ее истечения через отверстие в тонкой стенке. Вместе с тем расход жидкости, вытекающий через патрубок, больше, чем при истечении через отверстие, так как струя в патрубке сначала сжимается, а затем расширяется и вытекает, заполняя все его сечение. Поэтому коэффициент сжатия струи на выходе из патрубка ε равен 1, что приводит к значительному возрастанию коэффициента расхода $\alpha = \varepsilon\varphi$ и соответственно к увеличению расхода жидкости.

Средние значения ε , φ и α для различных случаев истечения приведены в таблице.

Средние значения коэффициентов ε , φ и α

Вид истечения жидкости	ε	φ	α
Через отверстие в тонкой стенке	0.64	0.97	0.62
Через короткий цилиндрический патрубок	1	0.82	0.82
Через короткий цилиндрический патрубок с хорошо закругленными краями	1	0.97	0.97

Формула $V = \alpha s \sqrt{2gH}$ может быть применена также при расчете истечения через отверстие в стенке, разделяющей два сосуда, причем в данном случае H представляет собой разность постоянных уровней жидкости в сосудах.

Целями практической работы являются:

- экспериментальное определение коэффициента расхода при истечении

воды через отверстие в стенке сосуда и насадок.

Описание установки:

Установка состоит из сосуда емкостью 10 л в боковой стенке которого на расстоянии 10 мм от дна сделано отверстие $\varnothing 8$ мм, а с противоположной стороны на том же уровне установлен насадок, имеющий проходное сечение $\varnothing 8$ мм. Оба отверстия закрыты пробками. На верхней кромке сосуда нанесена метка, показывающая уровень воды, который поддерживается постоянным во время эксперимента.

Порядок выполнения работы:

Заполняем сосуд водой, открываем пробку на отверстие в стенке сосуда и замеряем объем жидкости, вытекшей за 1 минуту (уровень жидкости поддерживаем постоянным, подливая в него непрерывно воду). Каждый замер дублируем. Затем проводим эксперимент, используя для выпуска воды насадок. Результаты опытов заносим в таблицу.

При вычислении коэффициента расхода $V = \alpha_0 s \sqrt{2g\Delta H}$, используем усредненные значения объема вытекшей воды.

Обработка результатов эксперимента:

На основе экспериментальных данных вычисляют:

1) коэффициента расхода при истечении воды через отверстие в стенке сосуда и насадок.

2) сравниваем их между собой и с литературными данными.

ПЗ. 3. Практическое применение уравнения Бернулли. Потери напора на гидравлические сопротивления. Расчет диаметра трубопроводов. Потери напора в местных сопротивлениях.

Уравнение Бернулли является частным случаем закона сохранения энергии и выражает энергетический баланс потока. Из уравнения Бернулли следует, что при установившемся движении идеальной жидкости сумма потенциальной $\left(z + \frac{P}{\rho g}\right)$ и кинетической $\left(\frac{w^2}{2g}\right)$ энергии жидкости для каждого из поперечных сечений потока остается неизменной.

Уравнение Бернулли может быть представлено и в другом виде:

$$\rho g z + p + \frac{w^2}{2} \rho = \text{const.}$$

Здесь каждый член выражает удельную энергию, отнесенную к единице объема жидкости. Например:

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

или

$$\left[\frac{w^2 \rho}{2} \right] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па.}$$

Приложения теоремы Бернулли: *Пневмометрическая трубка как расходомер*. Устанавливают трубку так, чтобы отверстия находились по оси трубопровода (рис.1). Замеряют разность уровней манометрической жидкости в коленах дифманометра, подключенного к трубке Пито, и рассчитывают максимальную осевую скорость:

$$w_{\max} = \sqrt{2gh \frac{\rho_m - \rho}{\rho}}.$$

Определяют

$$Re_{\max} = \frac{w_{\max} d \rho}{\mu}.$$

Из графика (рис. 2) находят отношение $w_{\text{ср}}/w_{\text{макс}}$, из которого вычисляют среднюю скорость. Расход жидкости или газа ($\text{м}^3/\text{с}$) определяют по формуле $V = w_{\text{ср}} \cdot f$, где f – площадь сечения трубопровода, м^2 .

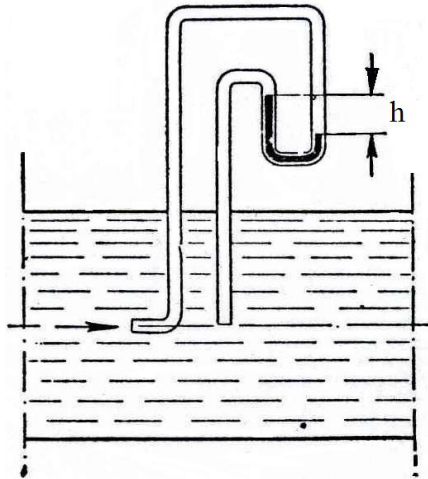


Рис. 1. Измерение скорости жидкости пневмометрической трубкой

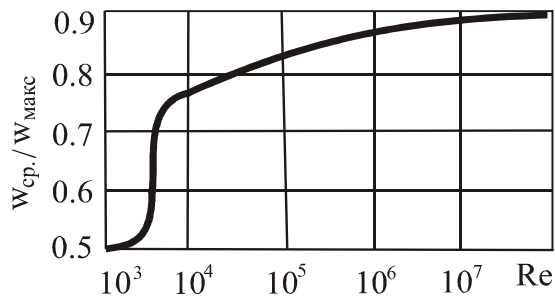


Рис. 2. Зависимость отношения $w_{\text{ср}}/w_{\text{макс}}$ от критерия Re

Дроссельные расходомеры. В качестве дроссельных приборов используют мерные диафрагмы, сопла и трубы Вентури.

Общей чертой всех этих устройств является изменение сечения потока, при этом изменяется скорость движения потока и статическое давление в потоке. Измерив дифференциальным манометром перепад давлений между

сечением трубопровода до его сужения и в месте сужения, можно вычислить изменение скорости между сечениями, а по нему скорость и расход жидкости.

Мерная диафрагма представляет тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр которого расположен по оси трубы.

Мерное сопло является насадком, имеющим плавно закругленный вход и цилиндрический выход.

Труба Вентури имеет постоянно сужающееся сечение, которое затем расширяется до первоначального размера. Вследствие такой формы при движении потока нет отрыва жидкости от стенок и гидравлическое сопротивление трубы Вентури меньше, чем у сопла и диафрагмы.

ПЗ. 4. Определение кривой отклика для аппарата промежуточной гидродинамической модели. Расчёт безнапорных потоков. Основы теории подобия и анализ размерностей. Принципы моделирования. Использование критериальных уравнений для расчета процессов и аппаратов.

На многие процессы, главным образом тепловые, массообменные, большое влияние оказывает структура потока в аппаратах. Поэтому при расчете, моделировании и оптимизации процессов исходят из анализа особенностей гидродинамической обстановки в аппарате.

Вследствие сложности конструкции аппаратов, применяемых в процессах химической технологии, скорости движения материальных потоков в объеме аппарата могут быть распределены неравномерно. При этом отдельные частицы находятся в аппарате различное время, что влияет на эффективность проводимого в нем процесса. Например, для полого аппарата (рис.1) время пребывания частиц, движущихся по траекториям, обозначенным стрелками 1, существенно меньше времени пребывания частиц, которые циркулируют по направлениям 2 или попадают в застойные зоны 3.

Другим примером различия времени пребывания может служить рассмотрение профиля скоростей при движении жидкости по трубе. Различия в скоростях по сечению наиболее велики при ламинарном течении. Частицы, движущиеся вблизи оси трубы, обгоняют частицы, движущиеся ближе к ее стенкам, и находятся в трубе значительно меньшее время, чем последние.

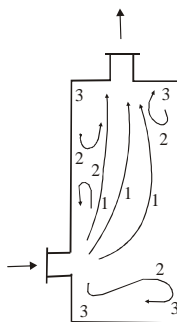


Рис. 1. Схема потоков в полном аппарате

При турбулентном течении скорости распределены по сечению трубы более равномерно. Однако и в данном случае время пребывания разных частиц жидкости неодинаково, что обусловлено турбулентными пульсациями, под действием которых происходит перемешивание частиц или турбулентная диффузия: различные частицы движутся в разных направлениях по отношению к движению основной массы потока, в том числе и в поперечном (радиальная диффузия), и в продольном (осевая диффузия). Осевая диффузия может или совпадать по направлению с движением основной массы потока или быть направлена в обратную сторону (обратное перемешивание).

Во многих промышленных аппаратах картина распределения скоростей (которая характеризует гидродинамический режим внутри аппарата) значительно сложнее, чем в рассмотренных примерах.

Для получения косвенной информации о поле скоростей, например, вводят в поток, поступающий в аппарат, примесь какого-либо вещества – индикатора и, анализируя во времени содержание данного вещества в выходящем из аппарата потоке, находят продолжительность пребывания в аппарате отдельных частей потока. Индикатором может быть любое вещество: краситель, раствор соли, радиоактивный препарат и другие вещества, содержание которых определяется достаточно простыми методами.

Отклик на возмущение, внесенное при этом на входе в аппарат вводом индикатора, представляют в виде кривых зависимости концентрации его в выходящей жидкости от времени, которые называют выходными кривыми или кривыми отклика. Анализ кривых и сопоставление с некоторыми типовыми моделями позволяет получить оценку структуры потока в аппарате.

Физические модели структуры потоков. Модель идеального (полного) вытеснения. Модель идеального смешения

Модель идеального вытеснения – это такое состояние потока в проточном аппарате, когда через каждое сечение потока он движется строго параллельно самому себе без какого-либо конвективного или диффузионного смешения частиц с соседним сечением потока. Такая структура потока внутри аппарата характеризуется тем, что частицы жидкости движутся параллельно друг другу с одинаковыми скоростями, не обгоняя основную массу потока и не отставая от нее. Поток движется как бы аналогично твердому поршню и называется поршневым.

Аппараты с поршневым движением жидкости называют аппаратами идеального вытеснения (рис. 2).

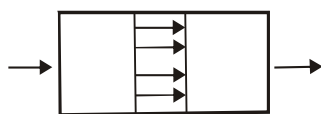


Рис. 2. Схема аппарата идеального вытеснения

Время пребывания τ всех частиц потока в аппарате идеального вытеснения одинаково и равно среднему времени пребывания $\tau_{\text{ср}}$, которое определяется частным от деления длины l их пути на линейную скорость жидкости w :

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{l}{w} = \frac{lS}{wS} = \frac{V_a}{V},$$

где S – площадь поперечного сечения, м^2 ; V_a – объем аппарата, м^3 ; V – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$.

Кривая отклика показана на рис.3 Начиная с момента $\tau = 0$, когда индикатор был введен во входящий поток, и до момента $\tau = \tau_{\text{ср}}$, индикатор не обнаруживается в выходящем из аппарата потоке. В момент времени $\tau = \tau_{\text{ср}}$ концентрация C индикатора на выходе мгновенно возрастает (теоретически до бесконечности), а затем сразу же снижается до нуля. Индикатор проходит через аппарат неразмываемым тончайшим слоем (как бы поверхностью твердого поршня), и сигнал, фиксируемый на выходе в момент $\tau_{\text{ср}}$, в точности соответствует сигналу на входе в момент $\tau = 0$.

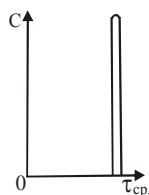


Рис.3. Кривая отклика в аппарате идеального вытеснения

В технологической практике сравнительно близки к модели идеального вытеснения, например, колонные аппараты с большим отношением длины к

диаметру.

Отклонение структуры потока от модели идеального вытеснения может быть следствием перемешивания частиц жидкости вдоль оси аппарата или по поперечному сечению, образования застойных зон и т. д., и проявляется это в том, что время пребывания τ различных частиц уже не одинаково и отличается от среднего времени пребывания $\tau_{\text{ср}}$ (одни частицы обгоняют основную массу потока, другие задерживаются в аппарате).

Другая идеализированная модель – модель идеального смешения. Это такое состояние потока в проточном аппарате, когда обеспечивается мгновенное и полное смешение поступающих частиц и уже имеющихся в аппарате (рис.4).

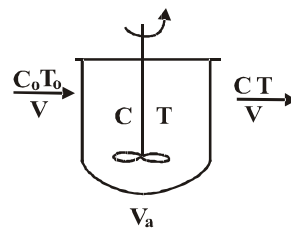


Рис. 4. Схема аппарата идеального смешения

Если в какую-то порцию непрерывно входящего в такой аппарат потока ввести определенное количество M_o краски, то она мгновенно равномерно окрасит всю жидкость, содержащуюся в аппарате. Концентрация C_o индикатора в любой точке аппарата в этот момент будет равна: $C_o = \frac{M_o}{V_a}$.

Затем концентрация C краски в аппарате начнет убывать во времени, так как краска непрерывно выносится потоком, а входящая жидкость краски уже не содержит. Однако в любой момент концентрация краски остается одинаковой во всех точках аппарата. Из кривой отклика (рис. 5) видно, что большая часть индикатора выходит в этом случае из аппарата за время между моментом его ввода ($\tau = 0$) и моментом, соответствующим среднему времени пребывания $\tau_{\text{ср}} = \frac{V_a}{V}$. Для вымывания, остальной части индикатора теоретически требуется бесконечное время.

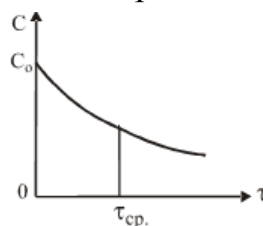


Рис. 5. Кривая отклика в аппарате идеального смешения

Примером аппарата, условия в котором близки к идеальному смещению, является сосуд с интенсивно работающей мешалкой, а также аппарат с движением твердой фазы в кипящем слое зернистого материала (при однородном псевдоожигении).

Картина движения потоков в большинстве непрерывно действующих аппаратов не отвечает ни идеальному вытеснению, ни идеальному смешению. По структуре потоков эти аппараты можно считать аппаратами промежуточного типа.

Кривые отклика для аппаратов промежуточных гидродинамических моделей

Вид кривой отклика для промежуточных гидродинамических моделей таких аппаратов показан на рис.6. Введенный мгновенно (импульсом) во входящий поток индикатор появляется на выходе позднее, чем при идеальном смешении, – через некоторое время τ_n после момента ввода $\tau = 0$. Его концентрация на выходе сначала увеличивается во времени до момента τ_{\max} , а затем начинает уменьшаться, стремясь к нулю при $\tau \rightarrow \infty$.

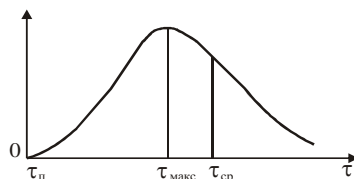


Рис.6. Кривая отклика для промежуточных гидродинамических моделей

Вероятность того, что частица, вошедшая в аппарат в момент $\tau = 0$, выйдет из аппарата хоть когда-нибудь (в промежутке от $\tau = 0$ до $\tau = \infty$), равна единице. Частица когда-нибудь, да выйдет.

Цель практической работы:

- экспериментальное определение кривой отклика для аппарата промежуточной гидродинамической модели
- сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими.

Описание установки:

Установка состоит из сосуда емкостью 10 л в боковой стенке которого на расстоянии 10 мм от дна сделано отверстие $\varnothing 10$ мм. На верхней кромке сосуда нанесена метка, показывающая уровень воды, который поддерживается постоянным во время эксперимента. В качестве индикаторного вещества используются гранулы полистирола 700-800 шт. (фракция $2 \text{ мм} \pm 0.5$). Пробы жидкости на выходе из аппарата отбираются в банки емкостью 1 л. Перемешивание осуществляется вручную.

Порядок выполнения работы:

Заполняем сосуд водой до метки и уровень жидкости во время эксперимента поддерживаем постоянным, подливая в него непрерывно воду. На момента времени $\tau=0$ концентрация на входе в аппарат и выходе равна нулю. Жидкость в аппарате перемешивается. Одновременно вводим в аппарат индикаторное вещество – гранулы полистирола и открываем сливное отверстие. Отбираем последовательно 10 проб воды (объем каждой 1 л). В каждой из проб считаем число гранул. Результаты опыта заносим в таблицу.

Таблица

№пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число гранул										

Обработка результатов эксперимента:

По результатам экспериментальных данных строят зависимость количество гранул - № пробы (считая, что каждая проба отбирается за равный промежуток времени). По виду кривой определяем вид гидродинамической зависимости, реализованной в данном аппарате.

ПЗ. 5. Изучение кинетики гравитационного осаждения. Определение потерь напора на гидростатическом сопротивлении.

В химической технологии многие процессы приводят к образованию неоднородных систем. Такими системами являются пыли - взвеси частиц твердого вещества в газе; туманы - взвеси мелких капель жидкости в газе; эмульсии - взвеси капель жидкости в других жидкостях; суспензии - взвеси твердых частиц в жидкости. Для дальнейшей обработки возникает необходимость разделения таких систем.

Разделение неоднородных систем может быть осуществлено различными методами, в том числе путем гравитационного осаждения.

Гравитационное осаждение (отстаивание) является простейшим методом разделения, отличающимся малыми энергозатратами. Аппараты для проведения этого процесса называют отстойниками. Расчет геометрических размеров отстойника требует знания скорости осаждения частиц.

Рассмотрим процесс осаждения твердой шарообразной частицы диаметром d , плотность которой ρ_T в жидкости с плотностью $\rho_{ж}$. В данном случае примем $\rho_T > \rho_{ж}$.

Если частицу вводят в жидкость и начальная скорость ее движения будет равна нулю, то она вначале будет двигаться ускоренно, и баланс сил, действующих на нее (рис. 1), можно представить уравнением

$$T - A - R = J, \quad (1)$$

где $T = \frac{\pi d^3}{6} \rho_T g$ - сила тяжести, действующая на частицу;

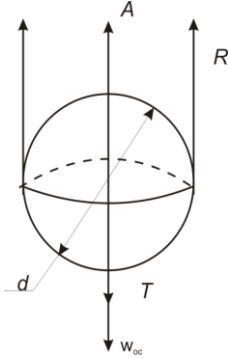


Рис. 1. Силы, действующие на частицу осаждающуюся в гравитационном поле

$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{ж} g$ - выталкивающая сила, равная по закону Архимеда весу объема вытесненной частицей жидкости;

$R = \varphi \frac{\pi d^2}{4} \frac{w_{oc}^2}{2} \rho_{ж}$ - сила сопротивления, отнесенная к поперечному сечению частицы $F = \frac{\pi d^2}{4}$;

$J = m \frac{dw_{oc}}{d\tau} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_T \frac{dw_{oc}}{d\tau}$ - сила инерции.

Здесь: m - масса частицы; φ - коэффициент сопротивления; w_{oc} - скорость осаждения частицы; τ - время.

С увеличением в начальный момент скорости возрастает сила сопротивления, которая уменьшает ускорение частицы. Через некоторый момент времени можно считать ускорение практически равным нулю.

При условии постоянства скорости осаждения уравнение (1) действующих на частицу сил будет иметь вид

$$T - A - R = 0. \quad (2)$$

Можно с достаточной для технических расчетов точностью период движения частицы с ускорением исключить из дальнейшего рассмотрения, так как начальный момент времени движения с ускорением мал по сравнению с общей длительностью процесса осаждения.

С учетом этого обстоятельства уравнение (2) можно записать в развернутом виде

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_T g - \frac{\pi d^3}{6} \rho_{ж} g - \varphi \frac{\pi d^2}{4} \frac{w_{oc}^2}{2} \rho_{ж} = 0. \quad (3)$$

Из уравнения (1.3) можно получить скорость осаждения

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4(\rho_T - \rho_{ж})dg}{3\rho_{ж}\varphi}}. \quad (4)$$

Скорость осаждения твердой частицы непосредственно из уравнения (1.4)

рассчитать нельзя, так как неизвестно значение коэффициента сопротивления φ , который зависит от режима осаждения.

Исследования показывают, что можно выделить три режима осаждения: ламинарный, переходный и турбулентный. Каждый режим осаждения имеет свой характер обтекания твердой частицы жидкостью.

Область существования того или иного режима осаждения определяют величиной критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{w_{oc} d \rho_{ж}}{\mu_{ж}}, \quad (5)$$

где $\mu_{ж}$ - коэффициент динамической вязкости жидкости.

При малых числах Re жидкость плавно «обтекает» частицу без образования вихрей в кормовой части. Коэффициент сопротивления в этой области описывают уравнением

$$\varphi = \frac{24}{Re}. \quad (6)$$

Эта зависимость хорошо аппроксимирует опытные данные при $Re=1,85$. В этой области силу сопротивления определяют, в основном, сопротивлением трения на поверхности частицы, и она пропорциональна первой степени скорости.

Вторая область - область переходного режима осаждения частицы - лежит в пределах изменения $1,85 < Re < 500$.

С увеличением числа Re в кормовой части осаждающейся частицы образуется зона, в которой существует замкнутое циркуляционное (вихревое) движение. Пока значения числа Re невелики, вихри устойчивы. При дальнейшем увеличении числа Re возрастает интенсивность движения вихрей, течение становится неустойчивым и начинает наблюдаться периодический срыв вихрей с поверхности частицы, которые образуют вихревой след. Если в начале переходной области основная часть сопротивления приходится на силы трения, то в конце основную часть составляет лобовое сопротивление.

Коэффициент сопротивления в этой области может быть рассчитан по уравнению

$$\varphi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}. \quad (7)$$

При увеличении числа Re выше 500 коэффициент сопротивления остается практически постоянным, не зависящим от числа Re (автомодельная область).

В этом случае в кормовой части частицы наблюдается регулярный отрыв вихрей. Такой режим осаждения называется турбулентным. Сила сопротивления в этом случае пропорциональна скорости во второй степени. Коэффициент сопротивления определяется, в основном, лобовым сопротивлением и составляет

$$\varphi = 0,44. \quad (8)$$

Используя уравнение (1.4) и уравнения (6)-(8), можно определить скорость осаждения методом последовательных приближений. Сопоставляя полученное значение w_{oc} с предварительным, повторяют расчет до получения необходимой точности.

Неудобства и трудоемкости такого расчета можно избежать, преобразовав уравнение (4) в критериальное. Для этого из уравнения (4) определим φ как функцию остальных параметров

$$\varphi = \frac{4}{3} \frac{(\rho_T - \rho_{ж})}{\rho_{ж}} \frac{gd}{w_{oc}^2}. \quad (9)$$

Умножим левую и правую части на Re^2 , после преобразований получим выражение

$$\varphi Re^2 = \frac{4}{3} \frac{gd^3 \rho_{ж} (\rho_T - \rho_{ж})}{\mu_{ж}^2}. \quad (10)$$

Безразмерный комплекс в правой части является критерием Архимеда

$$Ar = \frac{gd^3 \rho_{ж} (\rho_T - \rho_{ж})}{\mu_{ж}^2}. \quad (11)$$

Из уравнения (1.10) получаем

$$Re = 1,15 \left(\frac{Ar}{\varphi} \right)^{0,5}. \quad (12)$$

Подставляя в уравнение (12) значение φ из уравнений (6)-(8), получим критериальные уравнения для расчета скорости осаждения.

В ламинарном режиме

$$Re = \frac{Ar}{18}. \quad (13)$$

В переходном режиме

$$Re = 0,152 Ar^{0,715}. \quad (14)$$

В турбулентном режиме

$$Re = 1,74 Ar^{0,5}. \quad (15)$$

Режим осаждения частицы можно определить и по значению критерия Архимеда.

Так, верхней границей ламинарного режима осаждения служит значение $Re=1,85$, что соответствует значению $Ar=33$.

Следовательно, при выполнении условия $Ar < 33$ имеет место ламинарный режим осаждения. Верхнее предельное значение критерия Архимеда для переходного режима соответствующее значению $Re=500$, определяется по уравнению (14) и равно $8,3 \cdot 10^4$.

Переходный режим осаждения ограничивается изменением значений критерия Ar в следующих пределах:

$$33 < Ar < 8,3 \cdot 10^4.$$

Турбулентный режим осаждения возможен при $Re > 500$ или при

$Ar > 8,3 \cdot 10^4$.

Удобство расчета по уравнениям (13)-(15) заключается в том, что неизвестная величина w_{oc} входит в определяемый критерий, а параметры, входящие в определяющий критерий Ar , обычно известны по условиям задачи ($d, \rho_T, \rho_{ж}, \mu_{ж}$). Установив значение Ar , можно судить о режиме осаждения. Используя необходимое уравнение из (13)-(15), находим значение Re , а затем скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{Re \mu_{ж}}{d \rho_{ж}}. \quad (16)$$

Для случая ламинарного осаждения уравнение (13) после несложных преобразований приводится к виду

$$w_{oc} = \frac{1}{18} \frac{gd^2(\rho_T - \rho_{ж})}{\mu_{ж}}. \quad (17)$$

Эта формула носит название формулы Стокса.

Для определения скорости осаждения частиц неправильной формы необходимо учитывать отклонение формы от сферической, введя в расчет коэффициент формы ψ .

Коэффициент формы ψ представляет собой отношение поверхности частицы сферической формы $f_{ш}$ к поверхности частицы произвольной формы $f_{ч}$ того же веса (объема).

Для сферических частиц $\psi = 1$ (так как $f_{ш} = f_{ч}$), а для частиц любой иной формы $\psi < 1$.

С учетом коэффициента ψ уравнения (13)-(15) имеют вид

$$Re = \frac{\psi Ar}{18}, \quad (18)$$

$$Re = 0,152(\psi Ar)^{0,715}, \quad (19)$$

$$Re = 1,74(\psi Ar)^{0,5}. \quad (20)$$

Рассмотрим физический смысл критериев Re и Ar .

Критерий Рейнольдса является мерой отношения инерционных сил в жидкостном потоке (в данном случае при обтекании частицы) и вязкостных сил. При малых значениях Re наблюдается преобладание вязкостных сил над силами инерции и при обтекании частицы не происходит образования вихрей. При больших значениях Re , наоборот, преобладает действие инерционных сил. Возмущения жидкостного потока, возникшие при обтекании частицы, вязкостные силы погасить не могут, и за частицей возникает цепочка вихрей.

Критерий Архимеда является мерой отношения подъемной силы (являющейся разностью силы тяжести и архимедовой силы) к вязкостным силам.

Таким образом, критериальные уравнения учитывают не только действующие на частицу, в процессе осаждения, силы (уравнение (2)), но и

характерные особенности обтекания частицы жидкостью.

Целями практической работы являются:

- экспериментальное определение скорости осаждения твердых частиц под действием силы тяжести в зависимости от диаметра частиц и физических свойств частицы и жидкости;

- сопоставление полученных экспериментальных данных с расчетными.

Описание установки:

Установка состоит из двух стеклянных цилиндров, заполненных разными жидкостями: водо и глицерином.

В верхней и нижней части каждого цилиндра имеются метки, фиксирующие расстояние, которое частица проходит в процессе осаждения.

Замеряя время, в течение которого частица проходит расстояние между метками, можно определить скорость осаждения частицы.

С целью исключения влияния начального ускоренного участка движения частицы в жидкости, верхняя метка расположена на 30-40 мм ниже поверхности жидкости.

Порядок выполнения работы:

Шарики (используются стекло, пластмасса, сталь, медь) известного или замеренного диаметра помещают над поверхностью жидкости и отпускают. Время прохождения частицы между метками фиксируют секундомером. Каждый замер дублируют. Результаты опытов заносят в таблицу.

При вычислении критериев Re и Ar используют осредненные значения скорости осаждения w_{oc} и диаметра частицы.

Всего проводят не менее 5 опытов, в каждом по 3-4 замера.

Если частица коснулась стенки сосуда или к частице прилип пузырек воздуха, результаты таких опытов (замеров) не учитывают и производят повторные опыты.

Обработка результатов эксперимента:

На основе экспериментальных данных вычисляют:

1) скорость осаждения в каждом замере, исходя из известной длины пути и времени осаждения. По данным 3-4 замеров определяют среднюю скорость осаждения;

2) подсчитывают для каждого опыта значения критериев Re и Ar ;

3) сопоставляют полученные экспериментальные значения критериев Re и Ar со значениями, получаемыми по уравнениям (13)-(15), и анализируют причины отклонений экспериментальных данных от расчетных значений.

4) установив значение Ar , можно судить о режиме осаждения. Используя необходимое уравнение из (13)-(15), находим значение Re , а затем скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{Re \mu_{ж}}{d \rho_{ж}}.$$

Таблица

№№ опыта	Частицы	Жидкость	Время осаждения	Скорость осаждения	Ar расчет	Re расчет	Примечание
----------	---------	----------	-----------------	--------------------	-------------	-------------	------------

	Материал	d	ρ_T	Название	$\rho_{ж}$	$\mu_{ж}$	ния	$w_{ос}$	$w_{расч}$			

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- название работы и ее цель;
- краткую запись теоретических основ осаждения и расчетных формул;
- таблицу опытных данных и вычисленных величин;
- график зависимости $Re = f(Ar)$ с нанесенными экспериментальными данными.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Какой закон использован для записи уравнения (1)?
- 2) Каким образом можно рассчитать скорость осаждения частиц по уравнению (4)?
- 3) Дайте характеристику режимов осаждения.
- 4) Почему прибегают к критериальным уравнениям для расчета скорости осаждения?
- 5) Как определить коэффициент формы ψ ?
- 6) Раскройте физический смысл критериев Re и Ar . От каких параметров и каким образом зависит скорость осаждения?
- 7) Как изменится скорость осаждения сферической частицы в ламинарном режиме, если ее диаметр увеличится в 2 раза?

ПЗ. 6. Способ выражения состава фаз. Равновесие при массопередаче. Уравнения материального баланса. Рабочая линия. Движущая сила процессов массопередачи.

В большинстве процессов массопередачи участвуют три вещества: *первое и второе распределяющие вещества* – составляют I и II фазы; *третье распределяемое вещество*, переходящее из одной фазы в другую. Распределяющие вещества не участвуют в процессе массопередачи, а являются носителями распределяемого вещества. Массообменные процессы обратимые, вещества могут переходить из одной фазы в другую в зависимости от концентрации.

Процессы, сущность которых состоит в переходе вещества из одной фазы в другую, называются массообменными (диффузионными). В промышленности широко распространены следующие процессы

массопередачи:

абсорбция – избирательное поглощение газов (паров) жидким поглотителем (абсорбентом);

перегонка и **ректификация** – частичное или полное разделение гомогенных жидких смесей на компоненты;

адсорбция – избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ поверхностью пористого твердого поглотителя. Разновидностью адсорбции является ионный обмен – процесс разделения, основанный на способности некоторых твердых веществ (ионитов) обменивать свои подвижные ионы на ионы растворов электролитов;

сушка – удаление влаги из твердых материалов ее испарением;

экстракция (в системе жидкость – жидкость) – извлечение вещества, растворенного в жидкости, другой жидкостью, практически не смешивающейся с первой;

экстрагирование (в системе твердое тело – жидкость) – извлечение вещества из твердого пористого материала;

кристаллизация – выделение твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов;

растворение – переход твердой фазы в жидкую (растворитель).

Следует различать массообменные процессы, при которых не происходит химического взаимодействия, и процессы, осложненные химическими превращениями.

Способы выражения состава фаз для двухкомпонентных систем представлены в таблице.

Состав	Обозначение содержания компонента А	
	в жидкой фазе	в газовой (паровой) фазе
Молярная доля, кмоль А/кмоль (А+В)	x	y
Массовая доля, кг А/кг (А+В)	\bar{x}	\bar{y}
Относительная молярная концентрация (доля), кмоль А/кмоль В	X	Y
Относительная массовая концентрация (доля), кг А/кг В	\bar{X}	\bar{Y}
Объемная молярная концентрация, кмоль А/м ³ (А+В)	C_x	C_y
Объемная массовая концентрация, кг А/м ³ (А+В)	\bar{C}_x	\bar{C}_y

ПЗ. 7. Расчет высоты массообменных аппаратов. Устройство массообменных аппаратов. Материальный баланс ректификации. Устройство ректификационных аппаратов.

Расчету подлежат высота H и диаметр D аппарата. Существуют два основных принципиально различных типа массообменных аппаратов: а) аппараты с непрерывным контактом фаз – насадочные колонны, пленочные аппараты; б) аппараты со ступенчатым контактом фаз – тарельчатые колонны, смесительно-отстойные аппараты.

Расчет непрерывно-противоточных аппаратов. Поверхность массопередачи при расчете некоторых непрерывно-противоточных аппаратов, например насадочной колонны (рис. 1), геометрически определима. Поверхность контакта фаз можно считать равной поверхности насадки: $F = HS\sigma\phi$, где H – высота насадки, м; S – площадь поперечного сечения колонны, м^2 ; σ – удельная поверхность сухой насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ϕ – коэффициент смоченности насадки. По определению $K_y F/G = n_{oy}$, отсюда $F = \frac{G}{K_y} n_{oy}$.

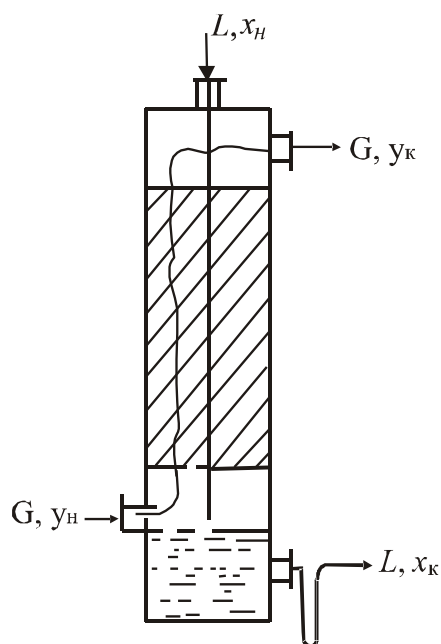


Рис. 1. Насадочная колонна

Приравниваем $HS\sigma\phi = \frac{G}{K_y} n_{oy}$, откуда

$$H = \frac{G}{K_y S \sigma \phi} n_{oy}.$$

Здесь $G/(K_y S) = h_{oy}$ – высота рабочей части аппарата, эквивалентная одной единице переноса (БЕП), м. Общая высота рабочей части аппарата $H = h_{oy} n_{oy}$

Высота единицы переноса h_{oy} определяется значением коэффициента массопередачи, т. е. отображает кинетику процесса. Очевидно, величина h_{oy} , а следовательно, и высота всего аппарата будут тем меньше, чем интенсивнее массопередача в этом аппарате.

Ректификация – это противоточное взаимодействие двух неравновесных фаз – жидкости и пара, образующегося из этой жидкости. При этом пар непрерывно обогащается низкокипящим (легколетучим) компонентом, а жидкость – высококипящим (труднолетучим) компонентом. Ректификацией может быть достигнута любая заданная степень разделения жидких смесей.

Процессы ректификации осуществляются периодически непрерывно при различных давлениях под атмосферным давлением, под вакуумом (для разделения смесей высококипящих веществ), а также под давлением, больше атмосферного.

На рис. 2 изображена схема ректификационной установки непрерывного действия. Внутри ректификационной колонны 1 расположены контактные устройства в виде тарелок или насадки.

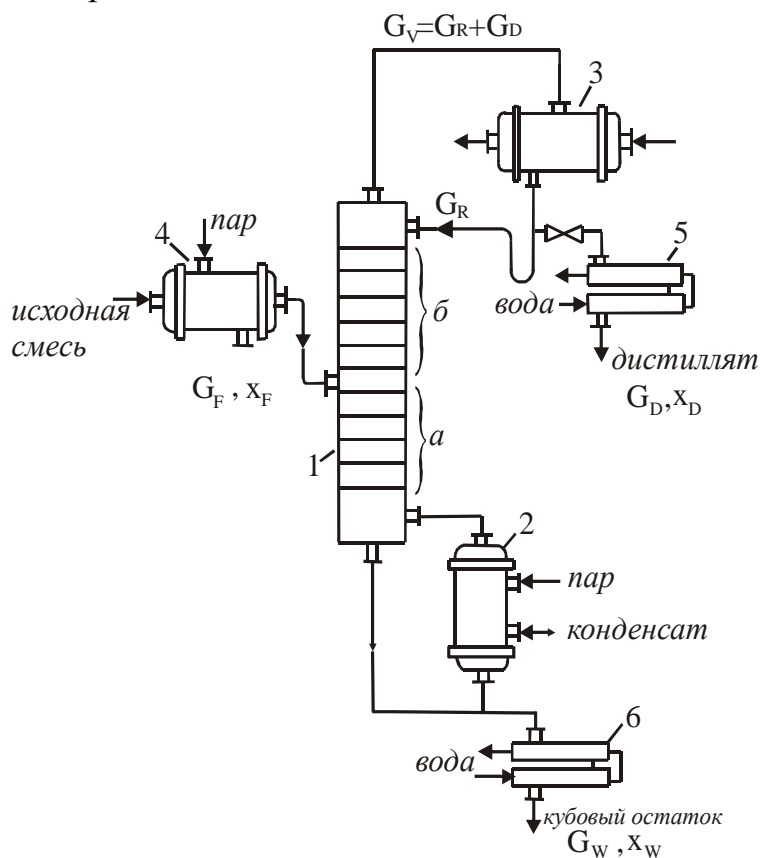


Рис. 2. Схема ректификационной установки непрерывного действия:

- 1 – ректификационная колонна (исчерпывающая (а) и укрепляющая (б) части);
- 2 – куб-испаритель; 3 – дефлегматор; 4 – подогреватель исходной смеси;
- 5 – холодильник дистиллята; 6 – холодильник кубового остатка

Снизу вверх по колонне движется пар, поступающий из выносного куба-испарителя 2 (куб-испаритель может размещаться и непосредственно под колонной). На каждой тарелке происходит частичная конденсация пара труднолетучего компонента, и за счет конденсации – частичное испарение легколетучего компонента. Таким образом, пар, выходящий из куба-испарителя и представляющий собой почти чистый труднолетучий компонент, по мере движения вверх обогащается легколетучим компонентом и покидает колонну в виде почти чистого пара легколетучего компонента. Пар конденсируется в дефлегматоре 3, охлаждаемом водой. Полученный конденсат разделяется на *дистиллят* (верхний продукт) и *флегму*, которая направляется на верхнюю тарелку колонны. Флегма, стекая по колонне и взаимодействуя с паром, обогащается труднолетучим компонентом.

Исходную смесь подогревают до температуры кипения в теплообменнике 4 и подают в колонну на ту тарелку, где кипит смесь того же состава. Смесь подают на верхнюю тарелку нижней исчерпывающей части колонны. Верхняя часть колонны называется укрепляющей по легколетучему компоненту. Из куба-испарителя отводят нижний продукт или кубовый остаток.

При расчетах ректификационных колонн количество и состав фаз удобно выражать в мольных величинах, так как величины мольных теплот испарения компонентов бинарной смеси обычно близки. Следовательно, можно считать, что при конденсации из пара n кмоль труднолетучего компонента испаряется из жидкости n кмоль легколетучего компонента, т. е. количество фаз (в киломолях) по всей высоте колонны будет постоянным. Примем следующие допущения, мало искажающие фактические условия протекания процесса, но значительно упрощающие расчет: 1) состав пара, выходящего из колонны в дефлегматор y_D , и состав флегмы, возвращающейся в колонну x_D , одинаков, т. е. $y_D = x_D$; 2) состав пара y_W , поднимающегося из кипятильника в колонну, равен составу жидкости x_W в кубе-испарителе, т. е. $y_W = x_W$.

Согласно схеме ректификационной установки (рис. 2) составим материальный баланс ректификационной колонны:

$$\text{по потокам } G_F = G_D + G_W;$$

$$\text{по легколетучему компоненту } G_F x_F = G_D x_D + G_W x_W,$$

где G_F , G_D , G_W – массовые или мольные расходы питания, дистиллята и кубового остатка; x_F , x_D , x_W – содержание легколетучего (низкокипящего) компонента в питании, дистилляте, кубовом остатке, массовые или мольные

доли.

ПЗ. 8. Расчет экстракционных аппаратов. Устройство экстракционных аппаратов. Схемы экстракционных установок. Специальные виды экстракции.

Экстракцией называют процессы разделения жидких смесей и извлечения компонентов из твердых веществ при помощи жидкого растворителя (экстрагента), избирательно растворяющего только извлекаемые компоненты.

Экстракция из твердого вещества применяется для извлечения масла из семян, канифоли, скипидара и других продуктов из древесины и т. д. В химической технологии процессы экстракции в системе "твердое вещество – жидкость" мало распространены.

Ниже будут рассмотрены процессы экстракции в системе "*жидкость – жидкость*", которые находят все более широкое применение в различных отраслях химической технологии – в производстве синтетического каучука (например, для отмывки дивинила от ацетальдегида и других примесей), в производстве капролактама и других продуктов органического синтеза, а также при получении ядерного горючего, антибиотиков, в процессах нефтепереработки, цветной металлургии.

Исходная жидкая смесь обрабатывается экстрагентом, который нерастворим или мало растворим в исходной смеси. В результате взаимодействия экстрагента с исходным раствором образуются: **экстракт** – раствор извлеченных из исходной смеси компонентов в экстрагенте и **рафинат** – жидкая смесь, обедненная извлекаемыми компонентами и обычно содержащая некоторое количество экстрагента.

Разделение жидкой смеси методом экстракции складывается из следующих процессов:

- 1) смешение исходной смеси с экстрагентом для создания между ними тесного контакта;
- 2) разделение двух несмешивающихся жидких фаз (экстракта и рафината);
- 3) регенерация экстрагента, т. е. удаление его из экстракта и рафината.

Предложено большое количество конструкций разнообразных экстракторов, однако в промышленности применяется лишь ограниченное число типов экстракционных аппаратов.

По характеру изменения состава жидких фаз экстракционные аппараты можно разделить на две группы:

дифференциально-контактные экстракторы, в которых характер изменения состава фаз близок к непрерывному;

ступенчатые экстракторы, в которых изменение состава фаз происходит скачкообразно (ступенчато), в каждой ступени осуществляется смешение и разделение (сепарация) фаз.

Экстракторы, в которых смешение и сепарация фаз происходят в поле центробежных сил, называются **центробежными**.

Промышленные экстракторы являются преимущественно аппаратами непрерывного действия. Лишь при лабораторных работах (а иногда в производствах небольшого масштаба) используют экстракторы периодического действия.

Материальный баланс процесса экстракции соответствует общему для массообменных процессов уравнению:

$$G(Y_1 - Y_2) = L(X_1 - X_2),$$

где G – количество экстрагента, кг/сек; L – количество исходного растворителя, кг/сек; Y_1 и Y_2 – содержание распределяемого компонента в экстракте и в экстрагенте, кг/кг экстрагента; X_1 и X_2 – содержание распределяемого компонента в исходном растворе и в рафинате, кг/кг исходного растворителя. Следовательно, расход экстрагента составляет:

$$G = L \frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}.$$

Из уравнения материального баланса определяют удельный расход экстрагента $l = G/L$.

Зависимость между составами экстракта и рафината выражается рабочей линией (см. рис. 16.2), уравнение которой имеет следующий вид:

$$Y = Y_{\text{экстр}} + \frac{G}{L}(X_{\text{исх}} - X).$$

Построение рабочей линии аналогично ее построению для процессов абсорбции. Чтобы построить рабочую линию процесса экстракции, необходимо знать состав исходного раствора и экстракта или рафината на выходе из аппарата.

Процессы экстракции проводятся чаще всего без подвода или отвода тепла, при обычных (комнатных) температурах. Поэтому для расчета этих процессов не требуется составления теплового баланса.

ПЗ. 9. Построение треугольной диаграммы процесса экстракции.

Если экстрагент частично растворим в исходном растворителе, то

экстракт и рафинат представляют собой взаимно насыщенные растворы, состоящие из трех компонентов. Такие системы называются тройными. Кроме экстрагента и извлеченного компонента (распределяемого вещества), экстракт содержит также некоторое количество исходного растворителя. Рафинат состоит из исходного растворителя и небольших количеств распределяемого вещества и экстрагента.

Равновесие в тройных системах наглядно выражается при помощи треугольной диаграммы (рис. 1). В этой диаграмме компоненты системы A , B и C представлены точками, лежащими в вершинах равностороннего треугольника (при этом длина каждой стороны треугольника принята за 100 %), а состав тройной смеси определяется точкой, лежащей внутри треугольника (например, точкой M). Точки, лежащие на сторонах треугольника, выражают составы бинарных смесей.

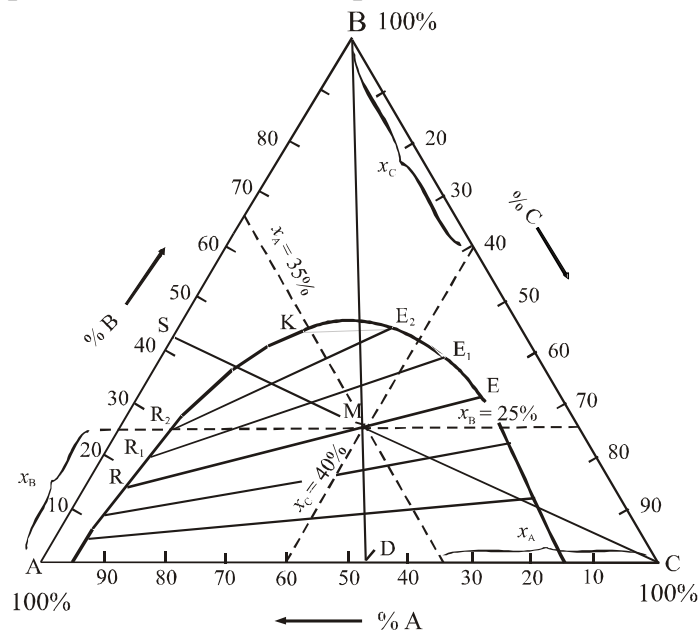


Рис. 1. Треугольная диаграмма экстракции

Состав тройной смеси определяется длиной отрезков, проведенных параллельно сторонам треугольника до пересечения с последними. Так, точка M характеризует тройную смесь, состоящую из 35 % компонента A , 25 % компонента B и 40 % компонента C . Перпендикуляры, опущенные на стороны треугольника из точки M , также могут служить мерой содержания соответствующих компонентов в смеси.

С помощью треугольной диаграммы можно определить составы трехкомпонентной смеси жидкостей при изменении содержания в ней того или иного компонента. Так, если в смеси, соответствующей точке M будет увеличиваться содержание компонента B , то по мере его добавления

составы образующихся растворов будут изображаться на диаграмме точками, лежащими на прямой MB и тем более близкими к вершине B треугольника, чем богаче становится смесь компонентом B . Если же извлекать компонент B из смеси, то ее составам будут соответствовать точки, лежащие на прямой MD и тем ближе к стороне AC треугольника, чем меньше становится компонента B в смеси. В смесях всех составов, отвечающих точкам, которые лежат на прямой BD , при изменении содержания компонента B отношение количеств остальных двух компонентов (A и C) будет оставаться неизменным.

Пусть вершина A треугольника соответствует исходному растворителю, вершина B – распределяемому веществу, вершина C – экстрагенту. Обозначим точкой S на стороне AB треугольника состав исходной (двухкомпонентной) смеси. В процессе экстракции исходная смесь сначала смешивается с экстрагентом. Процесс смешения изображается прямой CS , причем положение точки M , отвечающей составу смеси, зависит от соотношения количеств смешиваемых компонентов A , B и C находится из пропорции

$$\frac{G_A + G_B}{G_C} = \frac{\overline{CM}}{\overline{MS}}.$$

В этом выражении G_A , G_B , G_C – количества компонентов A , B , C в смеси, а \overline{CM} и \overline{MS} – длины отрезков прямой CS .

Полученная смесь расслаивается на две фазы: на экстракт E – раствор, обогащенный распределяемым компонентом B , и на рафинат R – раствор, обедненный компонентом B , причем составы экстракта и рафината находятся в равновесии друг с другом. Линия, соединяющая точки равновесных составов экстракта и рафината, называется *хордой равновесия*, или *конодой*.

Наклон хорд равновесия определяется величиной коэффициента распределения K_p , причем для процесса, показанного на рис. 16.3, K_p больше 1. При K_p менее 1 хорды равновесия наклонены в обратном направлении, а при K_p , равном 1, хорды будут параллельны стороне AC треугольника.

Если содержание компонента B в смеси будет изменяться, то равновесные составы рафината и экстракта будут лежать на концах других хорд равновесия. Так, при добавлении компонента B к смеси, изображенной точкой M , составы рафината и экстракта будут перемещаться на концы хорд R_1E_1 , R_2E_2 и т. д. При добавлении некоторой

новой порции компонента B поверхность раздела между фазами исчезает и система становится однофазной (гомогенной). При этом хорда равновесия превращается в точку K , которая называется *критической*.

Положение хорд равновесия определяют опытным путем. Концы хорд равновесия соединяют так называемой *бинодальной кривой*. Область, ограниченная этой кривой, соответствует двухфазным (расслаивающимся) системам и является рабочей частью треугольной диаграммы. Область диаграммы, лежащая вне этой кривой, соответствует гомогенной системе и поэтому для расчета процессов экстракции неприменима.

ПЗ. 10. Теплопередача при постоянной и переменной температуре. Определение тепловой нагрузки при нагревании и охлаждении без изменения агрегатного состояния.

Если в аппарате происходит охлаждение горячего теплоносителя, то $I_1 = CT_1$; $I_2 = CT_2$, где C – удельная теплоемкость горячего теплоносителя, Дж/кг·град, а T_1 и T_2 – температура теплоносителя¹ на входе в аппарат и на выходе из него соответственно. Тогда $Q_{\text{гор}} = GC(T_1 - T_2) = W\Delta T$.

Аналогично при нагревании холодного теплоносителя

$$Q_{\text{хол}} = gc(t_2 - t_1) = w \Delta t,$$

где c – удельная теплоемкость холодного теплоносителя, Дж/кг·град; t_1 и t_2 – температура теплоносителя на входе в аппарат и на выходе из него соответственно.

Величины $\Delta T = T_1 - T_2$ и $\Delta t = t_2 - t_1$ называются *температурными перепадами* и выражают изменение температуры теплоносителей в процессе теплообмена (т. е. охлаждение горячего и нагревание холодного теплоносителя). Произведения количества теплоносителя на его удельную теплоемкость называются *водяными эквивалентами* ($W = GC$ и $w = gc$).

Удельная теплоемкость – это количество тепла, сообщаемое единице вещества (1 кг, 1 м³, 1 кмоль) для изменения его температуры на 1 °С. Согласно Международной системе единиц СИ, удельная теплоемкость выражается здесь в Дж/кг·град. В справочных таблицах значения удельной теплоемкости веществ обычно приводятся в ккал/кг·град. Для перевода этих значений в Дж/кг·град их надо умножить на коэффициент 4190. Таким

¹ В этом разделе мы будем пользоваться буквой T для обозначения температуры горячего теплоносителя в градусах Цельсия (не Кельвина), за исключением особо оговоренных случаев.

образом, в системе СИ удельная теплоемкость воды будет равна 4190 Дж/кг·град (1 ккал/кг·град), удельная теплоемкость воздуха составит 1000 Дж/кг·град (0.24 ккал/кг·град).

При выводе формул, приведенных выше, принято, что удельная теплоемкость теплоносителей не зависит от температуры. Если удельная теплоемкость изменяется с температурой, то при определении энтальпии следует пользоваться средними значениями удельной теплоемкости в пределах от 0 °С до температуры теплоносителя:

$$I_1 = C_1 T_1; I_2 = C_2 T_2; i_1 = c_1 t_1; i_2 = c_2 t_2,$$

где C_1 и C_2 – средние значения удельной теплоемкости горячего теплоносителя в промежутке от 0 °С до температур T_1 и T_2 ; c_1 и c_2 – средние значения удельной теплоемкости холодного теплоносителя в пределах от 0 °С до температур t_1 и t_2 .

Теплопроводность – вид передачи теплоты между неподвижными частицами твердого, жидкого или газообразного вещества. Таким образом, теплопроводность – это теплообмен между частицами или элементами структуры материальной среды, находящимися в непосредственном соприкосновении друг с другом. При изучении теплопроводности вещество рассматривается как сплошная масса, его молекулярное строение игнорируется. В чистом виде теплопроводность встречается только в твердых телах, так как в жидких и газообразных средах практически невозможно обеспечить неподвижность вещества.

Строительные материалы являются пористыми телами. В порах находится воздух, имеющий возможность двигаться. При рассмотрении теплопроводности характеристики этого процесса относят к общей массе вещества, т. е. одновременно к скелету и порам.

Теплопроводность возникает при неравенстве температур внутри рассматриваемого тела. Распределение температур внутри тела характеризуется температурным полем.

Температурное поле – скалярное поле, так как температура – скалярная величина. Температурное поле характеризуется изотермическими поверхностями и градиентом температур.

Перечень рекомендуемой литературы

№ п/п	Название учебников, учебных пособий и других источников	Авторы (под ред.)	Издательство	Год издания
1	2	3	4	5
Основная:				
1.	Общая химическая технология. Введение в моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785987044971.html?SSr=010134171b106b0b2512518	Закгейм А.Ю.	М.: Логос	2017
2.	Математическое моделирование химико-технологических процессов https://e.lanbook.com/book/41014	Гумеров Ас.М.,	Издательство "Лань"	2014
Дополнительная:				
1.	Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN592210120.html?SSr=010134171b106b0b2512518	Самарский А.А.	М. : ФИЗМАТЛИТ	2005
2.	Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Книга 1: учебник https://e.lanbook.com/book/111193	Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е.	Издательство "Лань"	2019
3.	Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Книга 2: учебник https://e.lanbook.com/book/111194	Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е.	Издательство "Лань"	2019
4.	Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : Учеб. пособие для вузов http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081826.html?SSr=010134171b106b0b2512518	Романков П.Г.	СПб. : ХИМИЗДАТ	2010