

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА ИНЖЕНЕРНОЙ ЭКОЛОГИИ И ХИМИИ

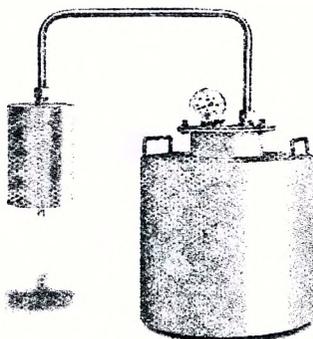
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по курсу

«ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ»

для студентов специальности

1–36 09 01 «Машины и аппараты пищевых производств»



Брест 2016

УДК 664.69-9

Методические указания содержат описание лабораторных работ, предусмотренных программой курса «Процессы и аппараты пищевых производств» для студентов специальности 1-36 09 01 «Машины и аппараты пищевых производств», выполняемых в учебном процессе на кафедре инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

Составители: Басов С.В., к.т.н., доцент;
Тур Э.А., к.т.н., доцент;
Никончук Н.П.

Рецензенты: Горбунов В.П., к.т.н., доцент
кафедра машиноведения
ского университета;

а имени А.С. Пушкина

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 09 01 «Машины и аппараты пищевых производств», содержат описание лабораторных работ, охватывающих все основные разделы курса, предусмотренные учебной программой дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств».

Лабораторный практикум ставит своей целью практическое ознакомление студентов с основными закономерностями изучаемой науки, а так же развитие навыков экспериментальной работы и обработки получаемых результатов.

В соответствии с этим в настоящих методических указаниях описание лабораторных работ состоит из теоретической и экспериментальной частей. Предшествующее каждой лабораторной работе теоретическое введение, несмотря на краткость изложения, содержит основной материал, необходимый для сознательного выполнения работ.

Экспериментальная часть описана достаточно подробно и последовательно, содержит все указания, необходимые для самостоятельного проведения исследований и представления результатов.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ студенты должны уметь правильно обращаться с лабораторной посудой, электрооборудованием, газовыми горелками, соблюдать особую осторожность при работе с химическими веществами, знать правила оказания первой медицинской помощи.

Работа со стеклянной лабораторной посудой. Основным травмирующим фактором при работе со стеклянной лабораторной посудой являются острые осколки стекла, способные вызвать порезы тела работающего. По этой причине следует соблюдать особую аккуратность и осторожность при использовании такой посуды. Если же во время работы стеклянная посуда все же разбилась, то необходимо предпринять следующие меры.

Первая помощь. При порезах рук или других частей тела стеклом следует удалить из раны мелкие осколки, после чего промыть ее 2 %-ным раствором перманганата калия или этиловым спиртом (или другим антисептиком), смазать края раны йодной настойкой и забинтовать. Ни в коем случае не промывать порез водой! При попадании осколков стекла в глаза и в случаях тяжелых ранений (особенно при порезах артерий) после оказания первой медицинской помощи немедленно вызвать врача.

При уборке рабочего места осколки разбитой посуды во избежание порезов нельзя собирать голыми руками, нужно использовать щетку и совок.

Работа с электрооборудованием. Постоянный и, особенно, переменный электрический ток способен вызывать разнообразные поражения. Электрический ток, проходя через живой организм, оказывает термическое (ожоги), электрохимическое (разложение крови с нарушением ее состава) и биологическое воздействие. Человек ощущает постоянный ток, имеющий силу 5–7 мА, переменный – 0.5–1.5 мА. Поэтому при работе с электрическим током необходимо соблюдать все меры предосторожности. Категорически запрещается касаться руками частей электроприборов, находящихся под напряжением. Для предотвращения электротравматизма применяется электрическая изоляция открытых токоведущих частей приборов, защитное заземление, зануление, устройства защитного отключения и т. д.

Первая помощь. При поражении электрическим током следует немедленно выключить ток рубильником или перерубить провод. Затем следует отделить пострадавшего от электрического прибора или провода, что нужно делать в резиновых перчатках или при помощи сухой веревки (сухой шерстяной ткани). Брать пострадавшего необходимо не за тело, а за одежду.

Если пострадавший находится в сознании, имеет устойчивое дыхание и пульс, его следует уложить, расстегнуть одежду, стесняющую дыхание, создать приток свежего воздуха, растереть и согреть тело и обеспечить полный покой.

Если пострадавший потерял сознание и дышит редко, судорожно, со всхлипыванием, а дыхание постепенно ухудшается или прекращается, то необходимо немедленно вызвать врача и до его прибытия делать искусственное дыхание

и непрямой массаж сердца. Для этого пострадавшего освобождают от стесняющей дыхание одежды, удаляют изо рта посторонние предметы, если рот стиснут, раскрывают его, выдвинув нижнюю челюсть или осторожно разжав зубы дощечкой, металлическим предметом и т. п.

Во всех случаях поражения электрическим током необходимо обязательно вызвать врача – независимо от состояния пострадавшего.

Работа с газовыми горелками. Газ образует с воздухом взрывоопасные смеси. Поэтому при использовании природного газа необходимо соблюдать максимальную осторожность. Перед началом работы с газовыми горелками необходимо ознакомиться с инструкцией по их эксплуатации. Во избежание термического ожога нельзя касаться руками нагретых предметов, частей оборудования, верхней части газовой горелки.

Первая помощь. При ожогах легкой степени тяжести необходимо на пораженное место наложить повязку, смоченную 2 %-ным раствором перманганата калия. При ожогах средней степени тяжести на пораженное место накладывается стерильная повязка. Пострадавшего нужно срочно доставить в медицинское учреждение.

При малейшем подозрении на отравление газом или продуктами горения пострадавшему нужно как можно быстрее обеспечить свежий воздух.

Работа с электронагревательными приборами. При использовании электронагревательных приборов необходимо соблюдать максимальную осторожность. Перед началом работы с ними следует ознакомиться с инструкцией по их эксплуатации. При работе с водяной баней нужно следить, чтобы в ней постоянно была вода. Во избежание термического ожога нельзя касаться руками нагревательных элементов электрической плитки.

Первая помощь. При ожогах легкой степени тяжести необходимо на пораженное место наложить повязку, смоченную 2 %-ным раствором перманганата калия. При ожогах средней степени тяжести на пораженное место накладывается стерильная повязка. Пострадавшего нужно срочно доставить в медицинское учреждение.

Работа с химическими веществами. Минеральные и органические кислоты, а также растворы щелочей представляют высокую опасность, так как вызывают сильные химические ожоги, как при внешнем воздействии на кожу или слизистые оболочки, так и при попадании вовнутрь организма. Многие химические вещества обладают общетоксическим действием и способны поражать различные органы человеческого организма.

Первая помощь. При попадании кислоты или щелочи на кожу место поражения немедленно промыть большим количеством воды в течение 10–15 минут. Затем пораженное место обработать 2 %-ным раствором пищевой соды (при поражении кислотой) или 2 %-ным раствором уксусной кислоты (при поражении щелочами). В случае поражения глаз – обильное промывание водой в течение длительного времени, затем, в обязательном порядке, обратиться за помощью в медицинское учреждение.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Механические процессы, описываемые законами механики твердых тел, в технологии пищевых производств применяются в основном для подготовки исходных твердых материалов и переработки конечных продуктов с целью придания им необходимых размеров и товарного вида. Движущей силой механических процессов является разность усилий (ΔF) в различных точках обрабатываемого объекта.

К механическим процессам относятся: *измельчение, перемешивание (смешивание), дозирование, прессование (формообразование), разделение* многокомпонентных систем с получением однокомпонентных, *классификация* (разделение) неоднородных систем по размерам компонентов, а также *транспортирование* кусковых, сыпучих и порошкообразных и других твердых материалов.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: измельчение заданной порции материала, с последующим проведением ситового анализа и определения степени измельчения материала. Построение кривых распределения измельченного материала по размерам.

1.1 Основные определения и теория процесса

Эффективным способом измельчения твердых материалов является ударное разрушение. Среди машин ударного действия наибольшее распространение получили молотковые дробилки (мельницы), применяемые в тех случаях, когда на одной ступени измельчения необходимо получить высокодисперсную смесь измельченных продуктов

Молотковые дробилки применяются на пищевых производствах для дробления зерна, соли, сахара, картофеля, солода, жмыха, барды, шлаков и других материалов. В этих дробилках молотки, вращающиеся со значительной скоростью в кожухе, ударом раздробляют материал. В месте выпуска продукта кожух снабжен сменным ситом. Материал находится в зоне измельчения до тех пор, пока частицы его не пройдут через сито в нижней части дробилки. Изменяя размеры отверстий сита, регулируют крупность измельчения (помола) материала.

На рисунке представлена схема молотковой дробилки. Ее рабочими органами являются молотки 2, свободно сидящие на стержнях 3. При вращении вала дробилки молотки принимают радиальное положение и ударяют по кускам исходного материала, загружаемого через входной патрубок 1. Конечный материал выгружается через сито 4, величина отверстий которого определяет размер частиц продукта.

Эффективность измельчения молотковых дробилок оценивается *степенью измельчения, производительностью, удельным расходом энергии* при проведении процесса.

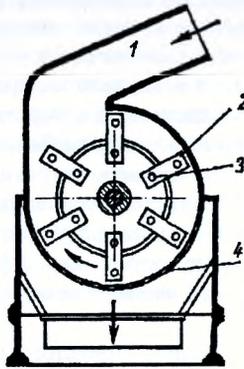


Рисунок 1.1 – Схема молотковой дробилки

Степенью измельчения i называется отношение среднего размера частиц исходного диаметра D_{cp} к среднему размеру частиц измельченного продукта d_{cp} :

$$i = D_{cp} / d_{cp}. \quad (1.1)$$

Производительность молотковых дробилок зависит от вида и свойств измельчаемого материала, а также от числа оборотов вала, на котором крепятся молотки, размеров дробилки и решетки на выходе из аппарата.

Удельный расход энергии (потребляемая мощность электродвигателя дробилки) зависит от диаметра ротора дробилки, частоты вращения вала ротора, степени измельчения и физико-механических свойств измельчаемого материала.

Для определения среднего размера частиц до и после измельчения среднюю пробу материала взвешивают и просеивают через набор сит с отверстиями разных размеров и получают несколько фракций. Для каждой фракции находят средний размер частиц фракции $d_{cp.(i-фракц.)}$ как полусумму размеров отверстий в сите, через которые прошли частицы (d_{i-1}) и на которых частицы остались (d_i):

$$d_{cp.(i-фракц.)} = (d_{i-1} + d_i) / 2. \quad (1.2)$$

На практике максимальный размер частиц определяют размером отверстий сита, через которое проходит ВЕСЬ материал данной фракции, а минимальный размер частиц – размером отверстий сита, на котором данная фракция материала находится.

Средний размер частиц в смеси вычисляют по формуле:

$$d_{cp.(смеси)} = 1 / \left[\sum_{i=1}^n (x_i / d_{cp.(i-фракц.)}) \right], \quad (1.3)$$

где $d_{cp.(i-фракц.)}$ – средний размер частиц каждой фракции;

$x_1 \dots x_n$ – относительное массовое содержание каждой фракции в смеси:

$$x_i = G_i / \sum_{i=1}^n G_i, \quad (1.4)$$

где G_i – масса остатка на сите i .

1.1 Порядок выполнения работы

1. По указанию преподавателя взвесить две одинаковые порции зернистого материала (пшеница, рис, гречка, пшеница или др.) $G_{нач}$.

2. Провести ситовый анализ исходного материала. Для этого сита расположить в порядке уменьшения размеров их отверстий сверху вниз. Одну из двух взвешенных порций $G_{нач}$ зернистого материала поместить на верхнее, наиболее грубое, сито. Затем необходимо вручную встряхивать сита до момента окончания отсева, после чего взвесить остатки на каждом сите ($G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$), включая также материал, попавший на дно сборника ($d=0$).

3. Определить средний размер частиц каждой фракции по формуле 1.2.

4. Рассчитать средний размер частиц в исходной не измельченной смеси $D_{ср}$ по формулам 1.3, 1.4.

5. Вторую взвешенную порцию зернистого материала засыпать в бункер дробилки (мельницы).

6. Включить электродвигатель дробилки на указанное преподавателем время τ , с.

7. После окончания измельчения выключить двигатель.

8. Рассчитать производительность дробилки Q (кг/с) по формуле: $Q = G_{нач} / \tau$.

9. Провести ситовый анализ измельченного материала по аналогии с п. 2.

10. Определить средний размер частиц каждой фракции измельченного материала по формуле 1.2.

11. Рассчитать средний размер частиц в измельченной смеси $d_{ср}$ по формуле 1.3, 1.4.

12. Рассчитать степень измельчения материала по формуле 1.1.

13. Оценить в процентах (%) потери проведенного процесса измельчения путем сравнения $G_{нач}$ и суммы масс остатков на каждом сите ($G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$).

14. По результатам ситового анализа измельченной смеси построить кривую функции распределения $R(d)$ измельченного материала по диаметрам частиц.

Функция $R(d)$ равна выраженному в процентах отношению массы всех частиц, диаметр которых больше d , к общей массе пробы измельченного материала. Величина d определяется по диаметру отверстий сита.

График (кривая) функции $R(d)$ строится в координатах $R, \% - d, \text{мм}$, при этом значения R рассчитываются по формулам:

$R(d_1) = x_1 100$; $R(d_2) = x_1 + x_2 100$; $R(d_3) = x_1 + x_2 + x_3 100$; $R(d_4) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 100$ и т. д.

15. Сформулируйте и запишите вывод по работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему экспериментальной установки со спецификацией;
- график функции распределения $R(d)$ измельченного материала по диаметрам частиц, построенный на миллиметровой бумаге в соответствующем масштабе;
- все проведенные расчеты по определению дисперсности материала;
- расчет производительности дробилки;
- оценку потерь проведенного процесса измельчения;
- вывод по работе.

2. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Гидромеханические процессы широко используются в пищевой промышленности для приготовления растворов, суспензий, эмульсий, очистки и разделения сырья и готовых продуктов, а также для интенсификации процессов тепло- и массообмена. Скорость этих процессов предопределяется законами гидро- и аэродинамики. Движущей силой гидромеханических процессов является перепад давлений (ΔP).

К гидромеханическим процессам относятся процессы образования и разделения неоднородных жидкостных и газовых систем: *перемешивание, диспергирование, пенообразование, псевдооживление, разрушение и удаление неоднородных слоев, отстаивание, фильтрование, центрифугирование, циклонное осаждение, электроосаждение.*

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Цель работы: экспериментально определить скорости начала псевдооживления и уноса частиц в потоке воздуха, а также условия перехода зернистого слоя из неподвижного состояния во взвешенное.

2.1 Основные определения и теория процесса

Если через неподвижный слой зернистого материала на решетке пропускать снизу вверх поток оживающего агента (жидкость или газ), постепенно увеличивая его расход, то состояние слоя будет определяться скоростью оживающего агента, отнесенной к полному поперечному сечению пустого аппарата:

$$\omega = V / f_a, \quad (2.1)$$

где V – объемный расход оживающего агента, $\text{м}^3/\text{с}$;

$f_a = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения аппарата, м^2 ;

d – диаметр поперечного сечения аппарата, м.

При скоростях потока ниже первой критической $\omega_{\text{кр}}^1$ (скорости начала псевдооживления) слой остается неподвижным (НС). Оживающий агент движется через слой в режиме фильтрации.

При достижении некоторой скорости оживающего агента, называемой скоростью псевдооживления $\omega_{\text{кр}}^1$, слой переходит из неподвижного во взвешенное (подвижное) состояние (ПС). В таком слое твердые частицы интенсивно движутся, а слой напоминает кипящую жидкость. Как и жидкость, он может течь, обладает вязкостью.

Многие процессы, например *сушка*, протекают гораздо интенсивнее в псевдооживленных слоях по сравнению с неподвижными.

Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению высоты слоя (слой расширяется, становится более рыхлым). При достижении оживающим агентом второй критической скорости $\omega_{\text{кр}}^2$ (скорость уноса) слой разрушается, а частицы в режиме пневмотранспорта уносятся из аппарата (рис 3а).

Расширение ПС характеризуется порозностью ε , которая представляет собой долю объема, занятого оживающим агентом

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ст}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{ст}}} = 1 - \frac{V_{\text{ч}}}{V_{\text{ст}}}, \quad (2.2)$$

где $V_{\text{ст}}$ – общий объем слоя, м^3 ; $V_{\text{ч}}$ – объем твердых частиц, м^3 .

Известно, что для неподвижного слоя частиц $\varepsilon_0 \approx 0,4$; для псевдоожиженного – $0,4 < \varepsilon < 1,0$; для пневмотранспорта $\varepsilon \approx 1,0$.

В процессе псевдоожижения объем твердых частиц $V_{\text{ч}}$ остается величиной постоянной, следовательно, его можно определить по параметрам неподвижного слоя:

$$V_{\text{ч}} = f_{\text{а}} H_0 (1 - \varepsilon), \quad (2.3)$$

где H_0 – высота неподвижного слоя частиц, м.

Подставив уравнение (2.2) в (2.3), можно получить формулу для расчета порозности по измеренным значениям высот слоя:

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) \cdot (H_0 / H). \quad (2.4)$$

Таким образом, ПС может существовать в пределах $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$ до $\varepsilon = 1$.

Слой твердых частиц является для оживающего агента гидравлическим сопротивлением, следовательно, дифференциальным манометром можно измерить перепад давления ΔP , возникающий при движении оживающего агента через этот слой.

Когда все частицы слоя перейдут в псевдоожиженное состояние, перепад давления составит:

$$\Delta P_{\text{пс}} = G_c / f_{\text{а}}, \quad (2.5)$$

где G_c – вес частиц слоя, Н.

Важно понимать, что для ПС значение $\Delta P_{\text{пс}}$ есть величина постоянная, не зависящая от скорости оживающего агента. Это постоянство объясняется тем, что при повышении расхода оживающего агента происходит одновременное увеличение порозности слоя, следовательно, действительная скорость оживающего агента между частицами остается величиной постоянной (рис. 2.1).

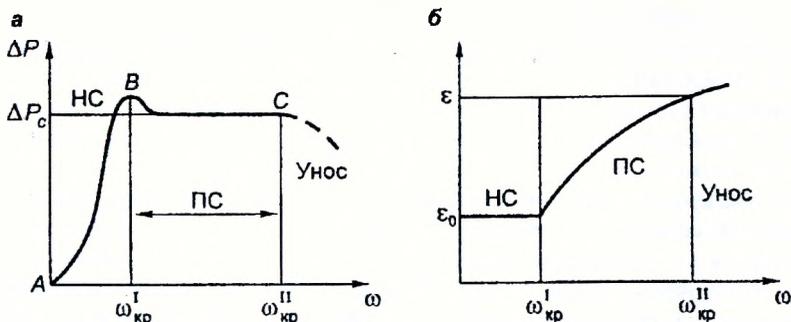


Рисунок 2.1 – Зависимости: а - $\Delta P = f(\omega)$; б - $\varepsilon = f(\omega)$

Наличие пика давления на зависимости в момент перехода в ПС объясняется затратами дополнительной энергии на преодоление сил сцепления между частицами. Величина этого пика давления зависит от формы и состояния поверхности частиц.

Реальная кривая псевдооживления обнаруживает гистерезис – так называемые линии прямого и обратного хода, которые получают соответственно при постепенном увеличении и уменьшении скорости подачи оживающего агента. Кроме того, в реальных условиях перепад давления ΔP может не быть строго постоянным. Он может монотонно возрастать, а также колебаться около некоторого среднего значения.

Отношение рабочей скорости к скорости начала псевдооживления называется *числом псевдооживления*. Это число характеризует состояние ПС и интенсивность перемешивания частиц в слое.

Расчет критических скоростей для псевдооживленного слоя проводится с использованием зависимости между критериями Лященко и Архимеда (рис. 2.2) $Ly = f(Ar, \epsilon)$ [1].

Критерий Лященко и Архимеда определяются по формулам:

$$Ly = Re^3 / Ar = \omega^3 \rho_r^2 / \mu_r (\rho_v - \rho_r) g, \quad (2.6)$$

$$Ar = \frac{g \cdot \rho_v^2 \cdot d^3 \cdot (\rho_v - \rho_r)}{\mu_r^2 \cdot \rho_r}, \quad (2.7)$$

где μ_r – динамический коэффициент вязкости среды (оживающего газа). Па·с.

В инженерной практике важно определить обе критические скорости – скорости псевдооживления и уноса. Для этого можно, в частности, воспользоваться формулами Тодеса

Расчет скорости начала псевдооживления ($\epsilon = \epsilon_0 = 0,4$):

$$Re_{no} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 Ar^{0,5}}, \quad (2.8)$$

где $Re_{no} = (\omega^1_{кр} d \rho_r) / \mu_r$.

Расчет скорости уноса ($\epsilon = 1$):

$$Re_{yn} = \frac{Ar}{18 + 0,61 Ar^{0,5}}, \quad (2.9)$$

где $Re_{yn} = (\omega^2_{кр} d \rho_r) / \mu_r$.

Значение $\omega^1_{кр}$ и $\omega^2_{кр}$ находят из критических значений критерия Рейнольдса.

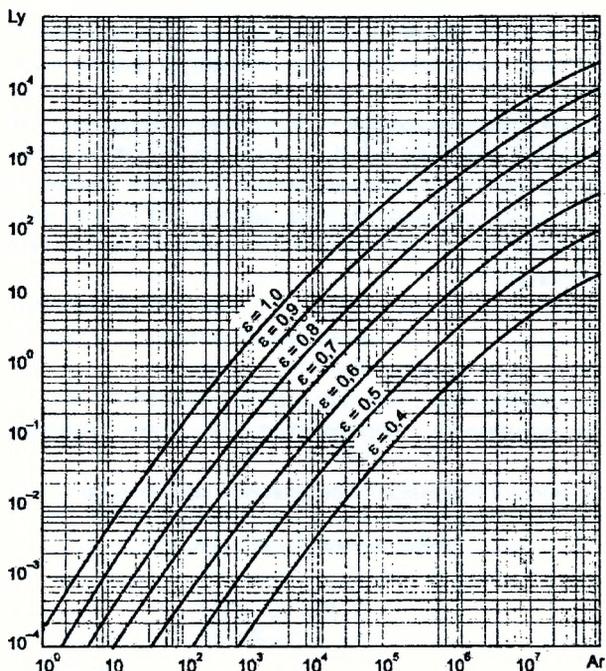


Рисунок 2.2 – Зависимость критерия Lu от критерия Ar и порозности слоя ϵ

2.2 Описание установки

Установка представляет собой прозрачную колонку диаметром d , м с установленной в нижней части сеткой, на которой помещен зернистый материал.

В нижнюю часть колонки из компрессора поступает оживающий агент (воздух), расход которого измеряется в м³ объемным счетчиком. Расход воздуха регулируется путем изменения напряжения, подаваемого к электродвигателю компрессора от регулятора напряжения, подключенного к электрической сети. Перепад давления ΔP , возникающий при движении воздуха через колонку, измеряется дифференциальным манометром (мм вод.ст.).

2.3 Порядок выполнения работы

1. Измерить диаметр поперечного сечения колонки d , м и рассчитать площадь поперечного сечения аппарата, $f_a = \pi d^2/4$, м².
2. Записать начальные показания объемного счетчика V_n , м³, и температуры выполнения опыта t , °С.
3. Измерить и записать начальную высоту H_0 , м неподвижного слоя зернистого материала в колонке аппарата.

4. Включить компрессор в электрическую сеть через регулятор напряжения, который предварительно установить в нулевое положение.

5. Постепенно увеличивая расход воздуха в колонке (одновременно включив отсчет времени τ , с) наблюдайте за состоянием слоя. Фиксируя показания дифманометра, наблюдайте за переходом слоя из неподвижного состояния (НС) в псевдооживленное (ПС).

6. Измерить высоту H , м псевдооживленного слоя зернистого материала в колонке аппарата.

7. По разности показаний объемного счетчика определить расход газа соответствующий скорости начала псевдооживления

$$V = (V_k - V_n) / \tau.$$

8. Увеличивая расход воздуха, наблюдайте момент начала уноса.

9. Режимы начала псевдооживления и начала уноса устанавливают визуально, повторяя опыт 3 раза и одновременно фиксируя перепад давления в слое и расход воздуха.

10. Определить скорость воздуха ω , м/с:

$$\omega = V / f_a.$$

11. Рассчитать гидравлическое сопротивление слоя твердых частиц ΔP , переведя показания дифференциального манометра из мм вод. ст. в Па (1 мм вод. ст. = 9806,65 Па). С целью упрощения расчетов сопротивление сетки не учитывается.

12. Построить график зависимости $\Delta P = f(\omega)$, на котором отметить данные для каждого из слоев (НС, ПС, унос). По графику определить значение $\omega_{кр}^1$.

13. По формуле 2.4 рассчитать порозность ϵ и построить график зависимости $\epsilon = f(\omega)$, на котором отметить данные ϵ для каждого из слоев.

14. Рассчитать значение плотности и динамической вязкости воздуха по формулам:

$$\rho = \rho_0(273/T),$$
$$\mu = \mu_0[(273+C)/(T+C)] \cdot (T/273)^{3/2},$$

где $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при 0°C , $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ – динамический коэффициент вязкости при 0°C ; $T = 273 + t$ $^\circ\text{C}$ – абсолютная температура, К; C – постоянная Сатерленда (для воздуха $C=124$).

15. Определить средний диаметр частиц в слое d_n .

Для этого, зная значение скорости псевдооживления $\omega_{кр}^1$, определить значение критерия Лященко Lu по формуле 2.6. (при этом т. к. $\rho_s \gg \rho_f$, то в формуле 2.6. принимаем $\rho_s - \rho_f \approx \rho_s$). Плотность твердых частиц ρ_s принимаем равной 1320 кг/м^3 . Затем по графику (рис 2.1) найти соответствующее значение критерия Архимеда при $\epsilon = 0,4$ и определить средний диаметр частиц в слое d_n .

16. Рассчитать по известному d_n значения $\omega_{кр}^1$ и $\omega_{кр}^2$, применяя для расчетов формулы Тодеса (2.8, 2.9).

17. Рассчитать вес твердых частиц, находящихся в каждом слое по формуле 2.5.

18. Сравните экспериментально полученные результаты с теоретически рассчитанными.

19. Сформулируйте и запишите вывод по работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему установки со спецификацией;
- графики зависимостей $\Delta P = f(\omega)$ и $\varepsilon = f(\omega)$;
- расчет порозности ПС;
- расчет плотности и динамической вязкости воздуха;
- расчет среднего диаметра частиц;
- расчет веса материала в каждом слое;
- расчет $\omega_{кр}^1$ и $\omega_{кр}^2$ по формулам Тодеса;
- вывод по работе.

Лабораторная работа № 3
РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ
ГРАВИТАЦИОННЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Цель работы: изучение особенностей процессов осаждения, декантации, фильтрования и центрифугирования.

3.1 Основные определения и теория процесса

Отстаивание (осаждение в поле сил тяжести) является самым дешевым процессом, по сравнению с другими процессами разделения неоднородных систем, например фильтрованием. Отстаивание используют для предварительного разделения суспензий, что позволяет ускорить (при прочих равных условиях) их дальнейшее фильтрование или центрифугирование.

Отстаивание проводят в аппаратах, называемых *отстойниками*. Различают аппараты периодического, непрерывного и полунепрерывного действия, причем непрерывно действующие отстойники, в свою очередь, делятся на одноярусные, двухъярусные и многоярусные.

Фильтрование – процесс разделения неоднородных систем при помощи пористых фильтрующих перегородок, способных пропускать жидкость или газ, но задерживать взвешенные в среде твердые частицы (осадок).

Движущей силой процесса фильтрования является разность давлений по обе стороны фильтрующей перегородки либо центробежная сила.

В качестве фильтров используют фильтровальную бумагу, различные ткани, пористое стекло, асбест, обычную и стеклянную вату и др. На скорость фильтрования влияют различные факторы – размеры пор фильтра, площадь фильтрующей поверхности, вязкость фильтруемой жидкости, разность давлений, тип растворителя и отделяемого вещества (осадка) и др.

С учетом этих факторов фильтрование может проводиться различными способами. Наибольшее распространение получили два основных способа фильтрования: при *нормальном* и *пониженном* давлении.

Фильтрование при нормальном давлении – наиболее простой и часто применяемый в промышленности и лабораторной практике способ, не требующий сложных приспособлений. Для этого необходимы стеклянная воронка и фильтр (рис. 3.1).

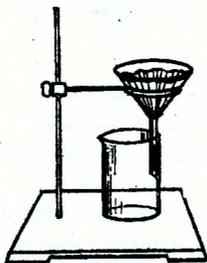
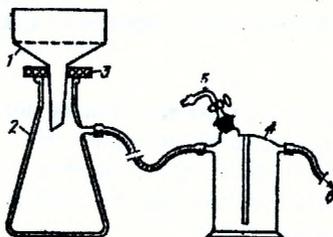


Рисунок 3.1 – Установка для фильтрования через стеклянную воронку

Фильтрование при пониженном давлении (отсасывание, вакуумное фильтрование) применяют для ускорения процесса фильтрования. В лабораторной практике основным прибором этого метода является *нутч-фильтр*, состоящий из фарфоровой *воронки Бюхнера*, в которую помещается бумажный фильтр, и толстостенной *колбы Бунзена*, соединенной через предохранительную склянку с водоструйным (или другим) вакуум-насосом (рис. 3.2). При этом диаметр бумажного фильтра, который перед использованием смачивают дистиллированной водой (или другим растворителем), должен быть немного меньше внутреннего диаметра воронки, но таким, чтобы фильтр полностью закрывал все отверстия.



- 1 – воронка Бюхнера; 2 – колба Бунзена; 3 – кольцо вакуумной резины;
- 4 – предохранительная склянка (склянка Тищенко для жидкостей);
- 5 – кран для впуска воздуха; 6 – отвод к водоструйному насосу

Рисунок 3.2 – Прибор для фильтрования при пониженном давлении (нутч-фильтр)

Фильтрование горячих растворов. Необходимость в фильтровании горячих растворов возникает при работе с вязкими растворами, а также в случаях, когда необходимо предотвратить охлаждение в процессе фильтрования и возможную в связи с этим кристаллизацию растворенного вещества на поверхности фильт-

ра. Приспособление для горячего фильтрования водных растворов (рис. 3.3) состоит из термостойкого стакана, в который вливают немного воды, и укороченной воронки с фильтром.

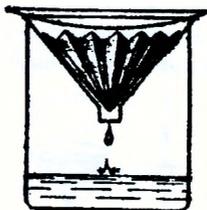


Рисунок 3.3 – Приспособление для горячего фильтрования водных растворов

Воду в стакане доводят до кипения, нагревая стакан, и после того, как пары прогреют воронку, наливают на фильтр горячий раствор, подлежащий фильтрованию. Во избежание охлаждения раствора с поверхности воронку накрывают часовым стеклом.

В заключение следует отметить, что для разделения суспензий в ряде случаев удобнее и эффективнее использовать не фильтрование, а некоторые другие методы, например, *декантацию* или *центрифугирование*.

Декантацией называется сливание жидкости с отстоявшегося осадка. К ней целесообразно прибегать, в тех случаях, когда в сравнительно большом количестве жидкости находится немного твердого вещества, которое легко оседает на дно.

Центрифугированием называется разделение в поле центробежных сил систем с размером частиц более 100 нм. Оно бывает двух типов: фильтрующее, предназначенное для интенсификации процесса фильтрования, и стаканное (пробирочное), применяемое для ускорения оседания взвешенного в жидкой фазе вещества.

Опыт № 1. Осаждение в поле действия гравитационных сил.

1. В химическом стакане на 100 мл приготовьте неоднородную смесь из воды и кварцевого песка по заданию преподавателя.

2. Тщательно перемешайте содержимое стакана и в течение 3–5 минут наблюдайте за процессом осаждения.

3. Рассчитайте среднюю скорость осаждения:

$$\omega'_{ос} = 0,5\omega_{ос},$$

где $\omega_{ос}$ – теоретическая скорость осаждения (м/с) одиночной шарообразной частицы при ламинарном режиме осаждения, которая рассчитывается по формуле Стокса [1, с. 93]:

$$\omega_{ос} = [(d^2 \cdot (\rho - \rho_c) \cdot g) / 18 \cdot \mu_c], \text{ где}$$

d – диаметр шарообразной частицы, м;

ρ – плотность частицы, кг/м³; ρ_c – плотность среды, кг/м³;

μ_c – динамический коэффициент вязкости среды, Па·с.

Для расчетов скорости осаждения принимаем:

$$d = 0,9 \text{ мм}; \rho = 2650 \text{ кг/м}^3; \rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3; \mu_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

5. Для определения скорости осаждения одиночной шарообразной частицы при любом режиме осаждения рассчитайте критерий Архимеда:

$$Ar = [(d^3 \cdot (\rho - \rho_c) \rho_c \cdot g) / \mu_c^2].$$

6. По найденному значению критерия Ар определите критерий Лященко:

$$Ly = [\omega_{oc}^3 \cdot \rho_c^2] / [\mu_c \cdot (\rho - \rho_c) \cdot g].$$

7. По найденным значениям критериев Ар и Ly определите критерий Рейнольдса из соотношения:

$$Ly = Re^3 / Ar.$$

8. Рассчитайте скорость осаждения по формуле:

$$\omega_{oc} = [Re \cdot \mu_c] / [\rho_c \cdot d].$$

9. Сравните полученный результат расчета скорости осаждения с результатом расчета по формуле Стокса (п.3).

Опыт № 2. Разделение неоднородной системы декантацией.

1. В химическом стакане на 100 мл приготовьте неоднородную смесь по заданию преподавателя.

2. В течение 3–5 минут наблюдайте за процессом отстаивания и образования осадка.

3. Аккуратно слейте верхнюю, осветленную часть раствора в другой химический стакан и в течение 3–5 минут также наблюдайте за процессом отстаивания и образования осадка.

4. Повторите действия п. 3 еще один раз.

5. Оцените эффективность и потери в исследованном процессе разделения. Укажите, что является его движущей силой.

Опыт № 3. Разделение неоднородной системы фильтрованием при атмосферном давлении и при пониженном давлении (вакуум-фильтрование) с использованием различных фильтров.

1. В трех химических стаканах на 100 мл приготовьте по 50 мл одинаковых неоднородных смесей (по заданию преподавателя).

2. Соберите установки для фильтрования с использованием бумажных и стеклянных фильтров при атмосферном давлении и при пониженном давлении.

3. Рассчитайте площадь поверхности (F) фильтрующей перегородки используемых фильтров ($F = \pi R^2$).

4. Определите время (τ , с) разделения неоднородной смеси при фильтровании через бумажный и стеклянный фильтры при атмосферном и пониженном давлении.

5. Рассчитайте производительность (Π , м³/с) фильтров по формуле:

$$\Pi = (q \cdot F) / (\tau_{\phi} + \tau_{np} + \tau_p)$$

где q – нагрузка на фильтрующую поверхность, м³/м²;

F – площадь фильтрующей поверхности, м²;

τ_{ϕ} , τ_{np} , τ_p – соответственно продолжительность фильтрации, помывки осадка, разгрузки и подготовки фильтра к следующему циклу работы, с.

6. Сделайте вывод об эффективности и целесообразности применения исследованных процессов фильтрования в процессах пищевых производств

Опыт № 4. Разделение эмульсий центрифугированием.

1. По заданию преподавателя приготовьте заданное количество различных эмульсий.
2. Поместите приготовленные эмульсии в центрифугу на 2 минуты.
3. Визуально оцените эффективность процесса разделения.
4. Рассчитайте центробежную силу C (в Н), развиваемую при центрифугировании по формуле [1, с.101]:

$$C = M \cdot \omega^2 \cdot R \approx 20 M \cdot n^2 \cdot D,$$

где M – масса осадка и жидкости, находящейся в барабане центрифуги, кг;
 ω – угловая скорость, c^{-1} ; $D = 2R$ – диаметр барабана, м; n – частота вращения центрифуги, c^{-1} .

5. Определите фактор разделения f при центрифугировании, т. е. отношение ускорения центробежной силы к ускорению силы тяжести по формуле:

$$f \approx 20 Fr_{ц},$$

где $Fr_{ц} = (D \cdot n^2) / g$ – видоизмененный критерий Фруда.

По результатам опытов 1–4 сформулируйте вывод по лабораторной работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схемы экспериментальных установок для каждого опыта со спецификацией;
- все проведенные расчеты по определению скорости осаждения;
- расчет производительности фильтров;
- расчет центробежной силы и фактора разделения при центрифугировании;
- вывод по работе.

Лабораторная работа № 4 ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ В АППАРАТЕ С МЕШАЛКОЙ

Цель работы: экспериментально определить затраты мощности на перемешивание в аппарате с мешалкой. Установить зависимость критерия мощности от критерия Рейнольдса.

4.1 Основные определения и теория процесса

Перемешивание – это процесс многократного перемещения частиц текучей среды относительно друг друга во всем объеме аппарата, протекающий за счет импульса, передаваемого среде механической мешалкой, струей жидкости или газа. Процессы перемешивания широко применяются в химической и пищевой промышленности для приготовления суспензий, эмульсий и растворов, а также для ускорения тепловых, массообменных и химических процессов. На практике

наиболее распространенным способом перемешивания является механический, который осуществляется с помощью вращающихся механических мешалок.

Основными характеристиками процессов перемешивания являются *интенсивность* и *эффективность* перемешивания. *Интенсивность* перемешивания определяется количеством энергии, подводимой к единице объема или к единице массы перемешиваемой среды в единицу времени.

Под *эффективностью перемешивания* понимают технологический эффект, характеризующий качество проведения процесса.

Мощность N , затрачиваемая на перемешивание, зависит от целого ряда факторов: конструкции мешалки, аппарата и его внутренних устройств, физических свойств среды, числа оборотов вала мешалки и ее типа.

Механическое перемешивающее устройство состоит из *вала*, к которому крепится *мешалка*, и *привода*. Применяемые в пищевых производствах мешалки могут быть разделены на следующие основные группы:

– тихоходные – *лопастные, рамные, якорные*. Они имеют относительно большие размеры и малую скорость вращения (обычно не более 80 об/мин);

– быстроходные – *пропеллерные и турбинные*.

Для описания процессов перемешивания широко используются критериальные зависимости. Так, обобщенное уравнение гидродинамики для процессов перемешивания имеет вид [2]:

$$K_N = f(Re_m, Fr_m, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots)$$

$$\text{или} \quad K_N = A \cdot Re_m^m \cdot Fr_m^p \cdot \Gamma_1^q \cdot \Gamma_2^r \quad (4.1)$$

где $K_N = N / (\rho \cdot n^3 \cdot d^5)$ – критерий мощности;

$Re_m = (n \cdot d^2 \cdot \rho) / \mu$ – модифицированный критерий Рейнольдса;

$Fr_m = (n \cdot d) / g$ – модифицированный критерий Фруда;

Γ_1, Γ_2 – симплексы геометрического подобия;

N – мощность на валу мешалки, Вт;

n – число оборотов мешалки в секунду, c^{-1} ;

d – диаметр мешалки (диаметр окружности, описываемый мешалкой), м.

Если при перемешивании на поверхности жидкости не образуется воронка, то влияние силы тяжести на протекание процесса будет невелико и при условии геометрического подобия уравнение (4.1) принимает вид:

$$K_N = C \cdot Re_m^m. \quad (4.2)$$

Безразмерный комплекс K_N называется также критерием Эйлера для перемешивания и обозначается Eu_m .

Таким образом, уравнение 4.2 является общим видом критериальной зависимости для расхода энергии при перемешивании.

Значения коэффициентов A, C и показателей m, n, p, q определяется экспериментально, а значения критерия мощности, как правило, приводятся в виде графических зависимостей.

На рис. 4.1 представлены графики зависимости $Eu_m - Re_m$, составленные на основании экспериментальных данных. Вид кривой зависит от типа мешалки.

Если мешалка, для которой необходимо определить расход мощности, подобна одной из данных в таблице 4.1, то при помощи соответствующей линии на графике зависимости E_u от Re для различных типов мешалок (рис. 4.1) можно зная Re_m , найти $E_{u,m}$. По найденному значению величины $E_{u,m}$ находят N .

График, представленный на рис. 4.1, дает достаточно точные результаты только в том случае, если расчет производится для мешалки, геометрически подобной мешалкам, представленным в табл. 4.1 и изображенным на рис. 4.2. Если имеют место отклонения от геометрического подобия, то должны быть введены поправки. Поправка вводится и при сильно шероховатых стенках аппарата, установке отражательных перегородок, змеевиков и т. п.

Для характеристики мешалок в таблице 4.1 использованы следующие обозначения: D – диаметр сосуда (реактора); d – диаметр мешалки; h – высота слоя жидкости; b – ширина лопасти мешалки; s – шаг винта; l – длина лопасти.

Таблица 4.1

№	Тип мешалки	Основные размеры мешалки				Характеристика сосуда
		D/d	h/d	b/d	s/d	
1	Двухлопастная	3	1	0,25	–	без перегородок
2	Двухлопастная	3	1	0,167	–	с 4 перегородками шириной 0,1D
3	Двухлопастная	2	1	0,885	–	без перегородок
4	Двухлопастная	2	1	0,885	–	со змеевиком $d_m=1,9d$; $d_{np}=0,066d$; $l=0,12d$
5	Шестилопастная	1,11	1	0,066	–	без перегородок
6	Пропеллерная	3	1	–	1	без перегородок
7	Пропеллерная	3	1	–	1	с 4 перегородками шириной 0,1D
8	Пропеллерная	3	1	–	2	без перегородок
9	Пропеллерная	3	1	–	2	с 4 перегородками шириной 0,1D
10	Открытая турбинная с 6 лопатками	3	1 $l/d=0,25$	0,2	–	без перегородок
11	Открытая турбинная с 6 лопатками	3	1	0,2	–	с 4 перегородками шириной 0,1D
12	Открытая турбинная с 8 плоскими наклонными лопатками	3	1	0,125	–	с 4 перегородками шириной 0,1D
13	Закрытая турбинная с 6 лопатками	3	1	–	–	без перегородок
14	Закрытая турбинная с 6 лопатками и направляющим аппаратом с 20 лопатками	–	–	–	–	без перегородок
15	Якорная	1,11	1	0,066	–	без перегородок
16	Дисковая с 6 лопатками	2,5	1	0,1	–	с 4 перегородками шириной 0,1D

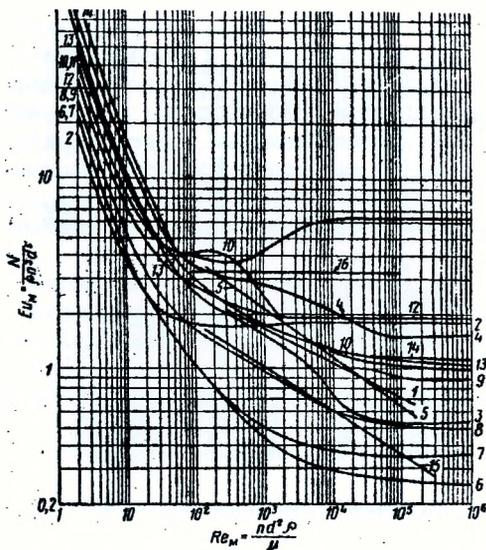


Рисунок 4.1 – Зависимость E_m от Re для различных типов мешалок

Следует иметь в виду, что определенная таким образом мощность является рабочей мощностью (т. е. мощностью, потребляемой после того, как режим работы установился). В период пуска привода мешалки (например, электродвигателя) сопротивление движению лопастей мешалки значительно превышает рабочую мощность. Поэтому при *лопастных* мешалках необходимо устанавливать электродвигатели, имеющие мощность, превышающую расчетную на 50%, а для *пропеллерных* и *турбинных* мешалок – на 10–15% выше расчетной рабочей мощности.

4.2 Описание установки

Установка для исследования процесса перемешивания состоит из мешалки, которая приводится в действие электродвигателем, подъемного устройства и корпуса аппарата с исследуемой жидкостью.

Изменение частоты вращения вала мешалки осуществляется путем изменения напряжения питания с помощью линейного автотрансформатора (ЛАТР). Мощность, потребляемая электродвигателем, измеряется при помощи ваттметра. Частоту вращения вала мешалки измеряют с помощью тахометра. С помощью подъемного устройства корпус аппарата может быть установлен на различном уровне по высоте относительно рабочего элемента мешалки. Уровень жидкости в корпусе аппарата H , а также расстояние от нижней кромки лопасти до дна корпуса определяют по шкале, нанесенной на боковой поверхности корпуса. Сменные рабочие элементы мешалки крепятся к валу, который через муфту соединен с электродвигателем.

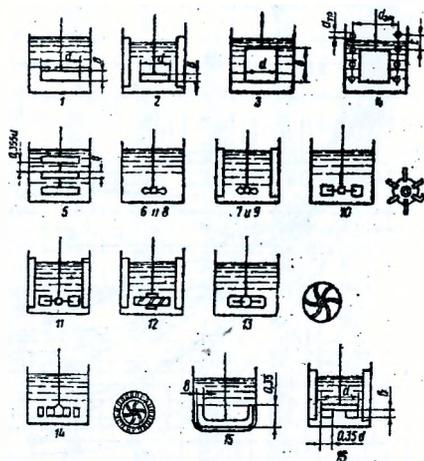


Рисунок 4.2 – Различные типы мешалок

4.3 Порядок выполнения работы

1. В соответствии с заданием заполните таблицу исходных данных:

Исследуемая среда:		Тип мешалки	
Показатель			
Диаметр мешалки	$d, \text{ м}$		
Диаметр корпуса	$D, \text{ м}$		
Высота слоя среды	$H, \text{ м}$		
Ширина лопасти	$b, \text{ м}$		
Перегородки корпуса	$z, \text{ шт}$		
Глубина погружения рабочего органа	$h, \text{ м}$		
Температура среды	$t, \text{ }^\circ\text{C}$		
Плотность среды	$\rho, \text{ кг/м}^3$		
Коэффициент динамической вязкости среды	$\mu, \text{ Нс/м}^2$		

2. Установите на ноль регулятор напряжения электропитания.

3. В соответствии с заданием закрепите рабочий элемент мешалки заданного типа и размера на валу.

4. Включите электропитание двигателя и произведите замеры потребляемой мощности *на холостом ходу* (без погружения в исследуемую среду) при различных частотах вращения мешалки (по указанию преподавателя). Измерения проведите не менее трех раз, принимая результат как среднее значение из трех измерений.

5. Установите на ноль регулятор напряжения электропитания и при помощи подъемного устройства установите заданную глубину погружения рабочего элемента мешалки в исследуемую среду.

6. Включите электропитание двигателя и произведите замеры потребляемой мощности *в период пуска* привода мешалки при различных частотах вращения

мешалки (по указанию преподавателя). Измерения проведите не менее трех раз, принимая результат как среднее значение из трех измерений.

7. Включите электропитание двигателя и через указанное преподавателем время произведите замеры потребляемой *рабочей мощности* при различных частотах вращения мешалки (т. е. мощности, потребляемой после того как режим работы установился). Измерения проведите не менее трех раз, принимая результат как среднее значение из трех измерений.

8. Повторите исследование в соответствии с п. 2–8 с другим типом рабочего элемента мешалки.

9. Результаты запишите в итоговую таблицу.

10. Для каждого типа мешалки для исследованных частот вращения рассчитайте Re_m .

11. Зная значения Re_m , при помощи зависимости E_u от Re для различных типов мешалок (рис. 4.1) определите $E_{u,m}$.

12. По определенным значениям величины $E_{u,m}$, рассчитайте N для каждого типа мешалки.

13. Сравните рассчитанные в п.13. величины N с экспериментально определенными значениями.

14. Сформулируйте и запишите вывод по работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему установки со спецификацией;
- заполненную таблицу исходных данных и итоговую таблицу;
- все проведенные расчеты Re_m для разных частот вращения вала и типов мешалок;
- значения $E_{u,m}$, необходимые для расчета N ;
- расчет N для каждого типа мешалки.
- вывод по работе.

Тип мешалки:					
частота вращения вала $n_1, c^{-1} =$			частота вращения вала $n_1, c^{-1} =$		
N холостого хода, Вт	N пуска, Вт	N установ. режима, Вт	N холостого хода, Вт	N пуска, Вт	N установ. Режима, Вт
$Re_m = (n_1 d_m^2 \rho) / \mu =$			$Re_m = (n_1 d_m^2 \rho) / \mu =$		
частота вращения вала $n_2, c^{-1} =$			частота вращения вала $n_2, c^{-1} =$		
N холостого хода, Вт	N пуска, Вт	N установ. режима, Вт	N холостого хода, Вт	N пуска	N установ. Режима, Вт
$Re_m = (n_2 d_m^2 \rho) / \mu =$			$Re_m = (n_2 d_m^2 \rho) / \mu =$		
частота вращения вала $n_3, c^{-1} =$			частота вращения вала $n_3, c^{-1} =$		
N холостого хода, Вт	N пуска, Вт	N установ. режима, Вт	N холостого хода, Вт	N пуска	N установ. Режима, Вт
$Re_m = (n_3 d_m^2 \rho) / \mu =$			$Re_m = (n_3 d_m^2 \rho) / \mu =$		

3. МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Массообменные процессы, которые часто называют диффузионными, характеризуются переносом (переходом) одного или нескольких компонентов исходного вещества из одной фазы в другую. Например, при сушке материалов вода переходит в пар, который, в свою очередь, поступает в сушильный агент и окружающую среду. Движущей силой массообменных процессов представляет собой разность концентраций (ΔC).

К массообменным процессам относятся сорбционные процессы (*адсорбция, абсорбция*), *дистилляция* (перегонка) и *ректификация, экстракция* (*экстрагирование*), *растворение, кристаллизация, сушка*.

Лабораторная работа № 5 АДСОРБЦИЯ ИЗ РАСТВОРОВ. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОТЕРМЫ АДСОРБЦИИ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ

Цель работы – изучение зависимости величины адсорбции от равновесной концентрации адсорбата.

5.1 Основные определения и теория процесса

Процесс поглощения одного вещества поверхностью другого называют *адсорбцией*. Вещество, частицы которого поглощаются (газ, жидкость, растворенный компонент), называют *адсорбатом*, а поглотитель — *адсорбентом*.

В пищевых производствах применяется много видов адсорбентов: активированные древесный и костяной уголь, целлюлозная масса, силикагель и др.

Наибольшее распространение получили активированные древесные угли, которые, в результате специальной обработки, приобретают пористую структуру с очень большой удельной площадью поверхности (от 600 до 1700 м² на 1 г), что определяет их высокую поглотительную способность.

Активированный уголь широко применяется в ликеро-водочной промышленности для очистки водно-спиртовых растворов, свеклосахарном и рафинадном производстве для обесцвечивания сахарных сиропов и т. д.

Целлюлозная масса широко употребляется для осветления пива, несмотря на то, что ее адсорбционная способность в десятки раз меньше адсорбционной способности активированных углей.

Взаимодействия между частицами адсорбата и адсорбента могут иметь различный характер. В зависимости от природы этого взаимодействия различают адсорбцию физическую и химическую (хемосорбцию).

При физической адсорбции частицы адсорбата и адсорбента связываются относительно непрочными межмолекулярными силами взаимодействия (силами Ван-дер-Ваальса). Примером физической адсорбции является адсорбция газов или растворенных веществ активированным углем.

При хемосорбции частицы адсорбата и адсорбента связаны более прочными силами сцепления за счет возникающего химического взаимодействия, приводящего к образованию нового вещества. Примером хемосорбции может служить адсорбция кислорода металлами.

Процесс отрыва частиц адсорбата от поверхности адсорбента, т. е. явление, обратное адсорбции, называют *десорбцией*. Этому процессу подвергают адсорбенты по окончании процесса адсорбции, как правило, с целью их регенерации и многократного повторного использования (если это экономически целесообразно).

Если в системе «адсорбат — адсорбент» при заданных условиях скорость адсорбции равна скорости десорбции, состояние системы называют *адсорбционным равновесием*.

Количественно адсорбцию выражают в молях адсорбата на единицу площади поверхности адсорбента (моль/м²) или в моль адсорбата на единицу массы адсорбента (моль/г).

Величина адсорбции зависит от природы адсорбента и адсорбата, температуры и концентрации (или давления) адсорбата. Кривую зависимости величины адсорбции Γ от равновесных концентраций c или равновесного парциального давления p адсорбата при постоянной температуре T называют изотермой адсорбции: $\Gamma = f(c)$ или $\Gamma = f(p)$ при $T = \text{const}$.

Существует несколько уравнений изотерм адсорбции, но наиболее часто используются уравнения Лэнгмюра и Фрейндлиха.

Зависимость величины адсорбции от концентрации адсорбента ($T = \text{const}$) выражается уравнением Лэнгмюра:

$$\Gamma = \Gamma_{\max} [Kc / (1 + Kc)],$$

где Γ — величина адсорбции; Γ_{\max} — максимальная величина адсорбции, обусловленная поверхностью адсорбента; K — константа адсорбционного равновесия, c — равновесная концентрация адсорбента.

При выводе уравнения Лэнгмюра было сделано предположение, что поверхность адсорбента однородна и при максимальном заполнении образуется мономолекулярный слой.

Отношение $\Gamma / \Gamma_{\max} = \theta$ называется *степенью заполнения поверхности адсорбатом*.

Выразив уравнение Лэнгмюра в виде:

$$1/\Gamma = 1/\Gamma_{\max} + 1/(\Gamma_{\max} K c),$$

получают линейную зависимость $1/\Gamma$ от $1/c$.

Графическое изображение изотермы адсорбции Лэнгмюра в двух формах представлено на рис 5.1. На оси ординат отсекается отрезок, равный $1/\Gamma_{\max}$, а $\text{tg } \alpha = 1/(\Gamma_{\max} K)$

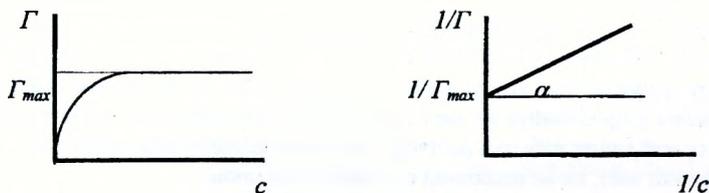


Рисунок 5.1 – Изотерма Лэнгмюра в двух формах

Из графика, построенного в координатах $1/\Gamma - 1/c$, можно рассчитать максимальную величину адсорбции (Γ_{max}) и затем по уравнению Лэнгмюра константу адсорбционного равновесия (K).

Изотерма Лэнгмюра редко соблюдается в реальности, т. к. условия, заложенные при ее выводе, соблюдаются редко. Поэтому предложены другие уравнения, в которых используются несколько иные допущения. Г. Фрейндлих в 1906 г. предложил эмпирическое уравнение изотермы (уравнение Фрейндлиха):

$$\Gamma = K_{\phi} c^n,$$

где K_{ϕ} и n – постоянные.

Уравнение Фрейндлиха соблюдается при адсорбции некоторых веществ в области средних заполнений ($\theta = 0,2 - 0,8$).

5.2 Порядок выполнения работы

В данной работе величину адсорбции (Γ) рассчитывают как разность между числом моль уксусной кислоты в объеме колбы до адсорбции (n_0) и после адсорбции (n):

$$\Gamma = n_0 - n.$$

Концентрацию уксусной кислоты в растворе рассчитывают по закону эквивалентов:

$$c_{\text{экв}(K)} V_K = c_{\text{экв}(щ)} V_{щ},$$

где $c_{\text{экв}(K)}$, $c_{\text{экв}(щ)}$ – молярные концентрации эквивалентов (нормальности) растворов кислоты и щелочи, моль/л; V_K , $V_{щ}$ – объем растворов кислоты и щелочи, мл.

Константу адсорбционного равновесия рассчитывают по уравнению Лэнгмюра.

1. На теххимических весах возьмите пять навесок по 1,0 г активированного угля и внесите их в чистые сухие колбы. Мерным цилиндром влейте в колбы (колбы пронумеруйте) по 50 мл (заранее приготовленного в химическом стакане на 100 мл) раствора уксусной кислоты различной концентрации (по указанию преподавателя) в первую колбу – раствор 1, во вторую – раствор 2, в третью – раствор 3, в четвертую – раствор 4, в пятую – раствор 5. Для ускорения процесса адсорбции периодически взбалтывайте содержимое колб.

2. Для определения исходной концентрации раствора уксусной кислоты в коническую колбу отберите пипеткой 10 мл раствора 1, добавьте 1–2 капли фенолфталеина и оттитруйте. Для этого бюретку заполните 0,1 н. раствором NaOH до нулевого деления и приливайте из нее по каплям раствор щелочи в кислоту до тех пор, пока от одной капли избытка раствора щелочи анализируемый раствор не окрасится в розовый цвет, не исчезающий при перемешивании.

Повторите титрование еще два раза. Результаты двух титрований не должны отличаться друг от друга более чем на 0,1 мл.

3. Аналогично проанализируйте исходные растворы 2, 3, 4 и 5. Результаты титрования (V_0) внесите в таблицу.

4. Через 20–25 минут после начала адсорбции отфильтруйте растворы через бумажный фильтр в конические колбы и определите в фильтратах равновесные концентрации уксусной кислоты так же, как были определены исходные концентрации. Результаты титрования (V) внесите в таблицу.

5. По результатам опыта рассчитайте: молярную концентрацию растворов уксусной кислоты до адсорбции (c_0) и после адсорбции (c), моль/л; число моль уксусной кислоты в объеме колбы до адсорбции (n_0) и после адсорбции (n); величину адсорбции (Γ), моль/г; значение $1/c$, моль⁻¹л; значение $1/\Gamma$, моль⁻¹л.

6. Результаты расчетов сведите в таблицу:

7. На миллиметровой бумаге постройте графики зависимости адсорбции от концентрации CH_3COOH в растворе в координатах: 1) Γ — c ; 2) $1/\Gamma$ — $1/c$.

8. Из второго графика определите $1/\Gamma_{\max}$ и рассчитайте максимальное значение адсорбции (Γ_{\max}).

9. Рассчитайте константу адсорбционного равновесия (K).

10. Сформулируйте и запишите выводы по работе.

№ опыта	Объем раствора NaOH		Концентрация р-ра CH_3COOH , моль/л		Число моль CH_3COOH в 50 мл р-ра		Γ	$1/c$	$1/\Gamma$
	V_0	V	c_0	c	n_0	n			
1									
2									
3									
4									
5									

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему установки со спецификацией;
- заполненную итоговую таблицу;
- расчеты концентрации уксусной кислоты в растворе до и после адсорбции;
- графики зависимости адсорбции от концентрации CH_3COOH в растворе в координатах: 1) Γ — c ; 2) $1/\Gamma$ — $1/c$;
- расчеты $1/\Gamma_{\max}$, максимального значения адсорбции (Γ_{\max}) и константы адсорбционного равновесия (K);
- вывод по работе.

Лабораторная работа № 6
ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ
КАПИЛЛЯРНО–ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ТУННЕЛЬНОЙ СУШИЛКЕ

Цель работы – экспериментальное изучение кинетики конвективной сушки капиллярно–пористых материалов.

6.1 Основные определения и теория процесса

Сушка – процесс удаления влаги из материалов. Влагу можно удалить *механическим* способом (отжимом, фильтрованием, центрифугированием) или *тепловым*, т. е. путем испарения влаги и отвода образующихся паров.

В пищевой промышленности сушка является одним из основных процессов и применяется практически во всех производствах. В свеклосахарном производстве сушке подвергается сахар-песок, сахар-рафинад, а также отходы производства – жом. Большую роль сушка играет в спиртовом и пивоваренном производстве, при получении сгущенного молока, сухих фруктов и овощей, хлебных сухарей и т. д. В ряде производств сушка является заключительным этапом технологического процесса, определяющим качество готового продукта (производство макарон, пастилы, сухофруктов и др.).

По своей физической сущности сушка является сочетанием связанных друг с другом процессов *массо-* и *теплообмена*. Удаление влаги при сушке сводится к перемещению тепла и влаги внутри материала и их переносу с поверхности материала в окружающую среду.

Аппараты для проведения процесса сушки называются *сушилками*. Основным конструктивным отличием сушилок является способ подвода тепла в установку.

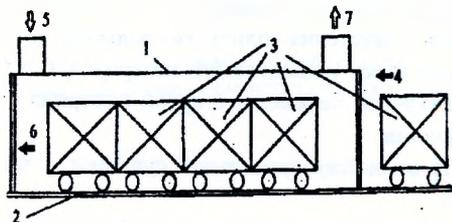
По способу подвода теплоты к высушиваемому материалу различают следующие виды сушки: *конвективная, контактная, радиационная, диэлектрическая, сублимационная*.

Наиболее распространены в пищевой промышленности *конвективные сушилки*. Процесс сушки в конвективных сушилках осуществляется путем непосредственного контакта сушильного агента с влажным материалом. Принудительная подача сушильного агента осуществляется вентиляторами. С целью увеличения сушильной способности сушильный агент подвергают температурному воздействию (нагреванию в калорифере). В качестве сушильного агента чаще всего используют воздух или топочные газы. В случае необходимости улавливания частиц высушиваемого материала на выходе из сушильной установки устанавливают циклон.

С целью сохранения качества продукции при сушке пищевого сырья температура для подавляющего количества материалов не должна превышать 60°C, что скажется на кинетике процесса сушки.

Одним из самых распространенных типов конвективных сушилок являются туннельные сушилки, применяемые для сушки овощей, фруктов, ягод, грибов, орехов и лекарственных растений и др.

Общий вид такой сушилки представлен на рисунке 6.1. Основным элементом сушилки является корпус 1, в котором по направляющим 2 перемещаются вагонетки 3 с высушиваемым материалом. С целью лучших условий омывания материала воздухом или топочными газами стеллажи в вагонетках делаются из сеток.



- 1 – корпус; 2 – направляющие; 3 – вагонетки; 4 – вход влажного материала;
 5 – вход сушильного агента; 6 – выход высушенного материала;
 7 – выход сушильного агента

Рисунок 6.1 – Туннельная сушилка

Канал туннельной сушилки имеет три основные зоны: *зону подготовки, зону обжига и зону охлаждения*. Сперва в сушилке происходит досушка и подогрев продукции, затем тележки проходят через зону обжига, где подвергаются воздействию высоких температур, после чего выходят в зону охлаждения. Вентилятор нагнетает воздух в сушилку в зоне охлаждения, а горячий воздух от остывающей продукции выводится в зону обжига.

Влажные материалы, которые подвергаются сушке, разделяются на *жидкости*, содержащие влагу (истинные и коллоидные растворы) и *твердые тела*, содержащие влагу (сахар, соль, коллоидно-дисперсные системы – гели, капиллярно-пористые материалы и др.).

Особенности строения капиллярно-пористых материалов (зерно, хлеб, кожа и др.) обуславливают явления *усадки* и увеличения *хрупкости* материала при сушке, что позволяет превращать их в порошок (например, в муку).

Под *влажностью* материала W понимается выраженное в процентах содержание воды в общей массе материала:

$$W = (G_{\text{вл}} / G) \cdot 100\%, \quad (6.1)$$

где $G_{\text{вл}}$ – масса воды (влаги), кг; G – общая масса материала, кг.

Соответственно, общая масса материала $G = G_{\text{св}} + G_{\text{вл}}$ представляет собой сумму масс сухого вещества ($G_{\text{св}}$, кг) и воды ($G_{\text{вл}}$, кг).

В процессе сушки масса сухого вещества не меняется, что значительно упрощает расчеты.

В ряде случаев удобнее рассчитывать не влажность, а *влагосодержание* материала, u :

$$u = G_{\text{вл}} / (G - G_{\text{вл}}) \quad \text{или} \quad u = W / (100 - W). \quad (6.2)$$

6.2 Порядок выполнения работы

1. По указаниям преподавателя взвесить порцию сухого капиллярно-пористого материала (пшеница, макаронные изделия, крупы или др.) $G_{\text{св}}$, кг и поместить ее в химический стакан объемом 200 мл.

2. По указанию преподавателя добавить к взвешенной порции сухого материала необходимое для увлажнения количество воды $G_{\text{вл}}$, кг.

3. Рассчитать общую массу увлажненного материала: $G = G_{\text{св}} + G_{\text{вл}}$.

4. Тщательно и аккуратно перемешать сухой материал с водой, добиваясь равномерности увлажнения.

5. Взвесить пустую вагонетку туннельной сушилки, с закрепленным к ней термометром $m_{\text{ваг}}$, кг.

6. Перенести увлажненный материал в вагонетку туннельной сушилки. При этом измерительная часть термометра должна быть погружена в объем материала на половину его высоты.

7. Взвесить заполненную увлажненным материалом вагонетку туннельной сушилки: $m_0 = G + m_{\text{ваг}}$, кг.

8. Оценить в % потери материала при переносе из химического стакана в вагонетку.

9. Рассчитать влажность (W_0) и влагосодержание (u_0) находящегося в вагонетке материала.

10. Включить вентилятор и калорифер туннельной сушилки и после прогрева установки до заданной температуры поместить в нее вагонетку с увлажненным материалом.

11. Включить отсчет времени.

12. В течение указанного преподавателем времени сушки с интервалом 1 мин провести серию из i -измерений температуры $t_i^{\circ}\text{C}$ и массы вагонетки с высушиваемым материалом m_i , кг.

13. Выключить калорифер, а затем, через 1 минуту, вентилятор сушилки.

14. По разности масс вагонетки m_0 , кг и m_i определить массу удаленной на i -этапе сушки воды $G_{\text{вл } i}$, кг.

15. Рассчитать влажность (W_i) и влагосодержание (u_i) материала для каждого i -этапа эксперимента по формулам 6.1 и 6.2.

16. Построить термограмму сушки – температурную кривую, характеризующую среднеобъемную температуру образца материала в течение всего эксперимента в координатах $t^{\circ}\text{C} - \tau$, мин.

17. Построить кинетическую кривую сушки в координатах $u - \tau$, мин.

18. На построенных графиках указать характерные участки, соответствующие прогреву материала, периоду постоянной скорости сушки и периоду падения скорости процесса.

19. Сформулировать и записать вывод по работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему установки со спецификацией;
- расчеты влажности и влагосодержания материала для каждого этапа эксперимента;
- термограмму сушки в координатах $t^{\circ}\text{C} - \tau$, мин;
- кинетическую кривую сушки в координатах $u - \tau$, мин.
- оценку в % потерь материала при переносе из химического стакана в вагонетку сушилки;
- вывод по работе.

Лабораторная работа № 7
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ
БИНАРНОЙ ЖИДКОЙ СМЕСИ ДИСТИЛЛЯЦИЕЙ

Цель работы – экспериментальное изучение особенностей процесса разделения бинарных жидких смесей дистиляцией.

7.1 Основные определения и теория процесса

Перегонка - способ разделения или очистки веществ, основанный на различных температурах кипения составляющих жидкость летучих компонентов.

Перегонка представляет собой процесс, при котором вещества, входящие в состав смеси, путем нагревания последовательно переводятся в парообразное состояние, пары отводятся в холодильник, где они конденсируются в жидкость, поступающую затем в приемник. Необходимым условием для проведения этого процесса является различная летучесть разделяемых компонентов при одной и той же температуре.

За ходом процесса перегонки наблюдают по показаниям термометра, входящего в состав перегонных установок. Определение температуры кипения каждого из перегоняющихся веществ служит основным способом идентификации вещества при его выделении и очистке перегонкой.

На практике широко применяются три основных способа перегонки:

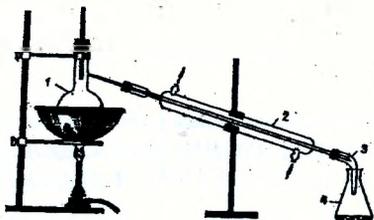
- перегонка при нормальном давлении (простая и фракционная);
- перегонка при пониженном давлении (перегонка в вакууме);
- перегонка с водяным паром.

Существует два вида перегонки: *простая перегонка (дистиляция)* и *ректификация*.

Простая перегонка – процесс однократного частичного испарения жидкой смеси и конденсации образующихся паров. Она применима только для разделения смесей, летучести компонентов которых существенно отличаются, или когда требуется отделение целевого продукта от практически нелетучих примесей (например, при очистке жидкостей от механических примесей, нелетучих солей и т. п.).

Ректификация – процесс более полного, многократно повторяемого разделения гомогенных смесей летучих жидкостей путем двухстороннего *массо- и теплообмена* между жидкой и паровой фазами, имеющими различную температуру и движущимися относительно друг друга. Разделение смеси на компоненты в этом случае происходит при контакте фаз и позволяет получать пары, представляющие собой почти чистый низкокипящий компонент смеси.

Схема простейшей лабораторной установки для простой перегонки представлена на рис.7.5.



1 – перегонная колба (колба Вюрца); 2 – холодильник; 3 – алонж; 4 – приемник.

Рисунок 7.5 – Установка для перегонки при атмосферном давлении

Перегонка при пониженном давлении (перегонка в вакууме) применяется когда перегоняемые вещества полностью или частично разлагаются при температуре кипения (при атмосферном давлении). Если перегонку проводить при пониженном давлении, то температура кипения веществ понижается, а значит, уменьшается или вовсе устраняется возможность их разложения.

Перегонка с водяным паром. Этим способом пользуются для выделения из смесей веществ, которые кипят при довольно высокой температуре, а поэтому не исключена возможность их разложения. Перегонять с водяным паром можно только такие органические вещества, которые нерастворимы или труднорастворимы в воде, а также не взаимодействующие с ней. Кроме этого, этот метод применяется для разделения таких смесей веществ, из которых только одно улетучивается с паром.

Преимущество этого метода перед обычной перегонкой особенно ярко проявляется в тех случаях, когда очищаемый продукт загрязнен большим количеством смолистых примесей или разлагается при температуре кипения даже под вакуумом.

Процесс перегонки широко используется в пищевой промышленности, особенно в спиртовой и ликеро-водочной технологии, в виноделии, в производстве эфирных масел и др.

В основу современной теории дистилляции положены закономерности перегонки бинарных смесей, установленные Д.П. Коноваловым и М.С. Вревским, позволяющие классифицировать все встречающиеся в природе бинарные смеси летучих компонентов.

Законы Коновалова устанавливают связь между изменениями состава, давления или температуры в системах *Жидкость-Пар*.

Первый закон Коновалова: пар обогащен тем компонентом, добавление которого к жидкости повышает давление пара над ней или понижает ее температуру кипения; пар всегда обогащен низкокипящим компонентом, чем соответствующая ему равновесная жидкая фаза.

Второй закон Коновалова: если зависимость давления и температуры смеси от ее состава имеет экстремум (максимум или минимум), то в этом случае смесь называется *азеотропной*, для которой состав жидкой фазы и равновесного с ней пара одинаковы.

Азеотропная смесь не может быть разделена на компоненты простой перегонкой, так как жидкая смесь и пары над ней имеют одинаковый состав.

Таким образом, для *бинарной смеси* (т. е. смеси, состоящей из двух компонентов), получаемый при перегонке пар содержит большее количество легколетучего, или низкокипящего компонента (НК), а неиспарившаяся жидкость – труднолетучего, или высококипящего компонента (ВК). Эта жидкость называется *остатком*, а жидкость, полученная в результате конденсации паров, в зависимости от вида перегонки, называется *дистиллятом* или *ректификатом*.

Для повышения эффективности процесса разделения смеси на компоненты широко применяется *дефлегмация* – процесс частичной конденсации паровой смеси в специальных устройствах – дефлегматорах, приводящий к обогащению оставшейся части пара НК. Образующаяся при этом жидкая фаза называется *флегмой*.

Аппарат для простой перегонки по традиции называется *перегонный куб*. Простая перегонка в таком аппарате без дефлегмации эффективна только в том случае, когда приняты меры, предотвращающие возможность дефлегмации – тщательная теплоизоляция, равномерный обогрев стенок перегонного куба и труб между кубом и конденсатором (холодильником), что требует дополнительных затрат. Поэтому на практике кубовые аппараты снабжают дефлегматорами, простейшим вариантом которого является шлем, установленный над кубом, охлаждаемый воздухом. Более совершенные конструкции аппаратов для простой перегонки снабжены дефлегматорами тарельчатого типа или специальными емкостями – сухопарниками.

В процессе перегонки процентное содержание НК в кубе непрерывно изменяется. В начале процесса образующиеся пары содержат относительно больше НК, чем жидкая фаза. По мере перегонки постепенно уменьшается содержание НК в жидкости, оставшейся в кубе. Это приводит к тому, что по мере перегонки уменьшается содержание НК и в паре. Поэтому последовательно отбираемые порции дистиллята неравноценны в отношении содержания НК. Только первые порции дистиллята содержат значительный процент НК. По мере увеличения количества дистиллята процентное содержание НК в нем приближается к его содержанию в первоначальной смеси.

Эффективность простой перегонки бинарной смеси *этиловый спирт – вода* может быть оценена средним содержанием (в %,Об) спирта в дистилляте.

7.2 Порядок выполнения работы

1. Отмерить 100 мл первоначальной бинарной смеси *этиловый спирт – вода*, содержащей $\approx 10\%$, Об спирта.

2. При помощи ареометра, предназначенного для определения состава водно-спиртовых смесей, точно определить процентное содержание этилового спирта.

3. По графику зависимости показателя преломления смеси *этиловый спирт – вода* от содержания спирта при данной температуре проверить правильность определения.

4. Перелить всю исходную смесь в перегонную колбу аппарата, установить простейший дефлегматор и термометр. Подсоединить колбу к конденсатору (холодильнику), подключенному к системе холодного водоснабжения.

5. Проверить правильность подключения холодильника, его работоспособность и герметичность всех соединений установки.

6. Присоединить к холодильнику алонж и установить приемник дистиллята.

7. Соблюдая правила техники безопасности включить обогрев куба.

8. Наблюдать за происходящими во времени изменениями в системе и фиксировать температуру процесса.

9. В момент начала кипения смеси зафиксировать температуру и записывать ее последующие значения в течение всего эксперимента.

10. При появлении первых капель сконденсировавшихся в холодильнике паров – дистиллята – пипеткой отобрать пробу и при помощи рефрактометра определить её показатель преломления.

11. По графику зависимости показателя преломления смеси *этиловый спирт – вода* от содержания спирта при данной температуре определить содержание спирта в головной фракции дистиллята.

12. После того, как в приемнике собралось примерно 2 мл дистиллята, заменить приемник на новый (пустой) для отбора следующей фракции.

13. После того, как в новом приемнике собралось примерно 2 мл дистиллята пипеткой отобрать пробу и при помощи рефрактометра определить её показатель преломления.

14. По графику зависимости показателя преломления смеси *этиловый спирт – вода* от содержания спирта при данной температуре определить содержание спирта в данной фракции дистиллята.

15. Снова заменить приемник на новый (пустой) и повторить п. 13–14.

16. Продолжать повторение эксперимента до того момента, пока состав дистиллята, определенный по показателю преломления, не станет равным составу исходной смеси.

17. Соблюдая правила техники безопасности отключить обогрев куба, и, через время, указанное преподавателем, перекрыть подачу воды в холодильник установки.

18. Проанализировать эффективность перегонки каждой фракции.

19. Сформулировать и записать вывод по работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему установки со спецификацией;
- график зависимости показателя преломления смеси *этиловый спирт – вода* от содержания спирта при данной температуре;
- оценку эффективности перегонки каждой фракции;
- вывод по работе.

Лабораторная работа № 8

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ
ВОДОРАСТВОРИМЫХ КОМПОНЕНТОВ КАПИЛЛЯРНО–ПОРИСТЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Цель работы – экспериментальное изучение особенностей процесса экстрагирования в зависимости от различных условий проведения процесса.

8.1 Основные определения и теория процесса

Экстрагированием называется процесс извлечения одного или нескольких компонентов из смеси веществ путем обработки ее жидким растворителем, обладающим способностью избирательно растворять только извлекаемые компоненты.

Физическая сущность экстрагирования заключается в переходе извлекаемого (экстрагируемого) компонента из одной фазы (жидкой или твердой) в фазу экстрагента при их взаимном соприкосновении. Процесс может проводиться периодически или непрерывно.

В пищевой промышленности экстрагирование используется в различных отраслях: для получения и очистки (рафинирования) сахара, растительных масел, растворимого кофе, соков, витаминов, настоек, пива, крахмала, ликероводочных изделий, отваров и т. д.

В зависимости от типа взаимодействующих фаз процесс экстрагирования имеет две разновидности:

Экстрагирование – процесс в системе *Твердое тело – Жидкость*;

Жидкостная экстракция – процесс в системе *Жидкость – Жидкость*.

Растворитель для жидкостной экстракции (*экстрагент*) должен отвечать определенным требованиям:

- не растворяться в другом растворителе, который содержит извлекаемое вещество;
- существенно лучше растворять экстрагируемое вещество, чем растворитель, из которого это вещество извлекается;
- не должен химически взаимодействовать ни с извлекаемым веществом, ни с растворителем, его содержащим;
- легко удаляться при выделении из него извлекаемого вещества;
- быть сравнительно безопасным в обращении.

В пищевой промышленности широкое распространение получили различные экстрагенты – вода, этиловый спирт, бензин и др. Для экстрагирования растительных масел широко используются различные смеси органических растворителей.

Чаще всего жидкостной экстракции приходится подвергать водные растворы. Один из лабораторных методов состоит в проведении процесса в делительной воронке, в которую наливают раствор, подлежащий экстракции, и экстрагирующую жидкость (не более 2/3 объема воронки). Делительную воронку закрывают пробкой и осторожно встряхивают, после чего закрепляют на штативе и оставляют в покое до полного разделения слоев жидкостей. Затем открывают пробку и кран и медленно сливают нижний слой в стакан. Оставшийся верхний слой (*экстракт*) выливают через верхнее отверстие воронки в другую посуду. После этого растворитель отгоняют и получают извлекаемое вещество.

Для извлечения нужного продукта из смеси твердых веществ иногда достаточно размешать эту смесь с подходящим растворителем, отфильтровать (или декантировать) полученный раствор и выделить из него искомое вещество. При этом степень экстрагирования повышается при тщательном размельчении твердого вещества. Эффективность процесса увеличивается также при применении избытка растворителя, перемешивании и при тщательном отделении экстракта от оставшегося после фильтрования порошка. Повторение процесса несколькими меньшими порциями свежего растворителя дает лучшее извлечение, чем проведение его в один прием всем количеством растворителя. Такой вид экстракции, проводимый при комнатной температуре, называется *мацерацией*, а при нагревании – *дегерированием*.

Сложность экстрагирования заключается в том, что скорость процесса извлечения целевых продуктов определяется большим числом параметров, которые трудно поддаются обобщению и анализу. На механизм и кинетику процесса существенное влияние оказывают физико-химические свойства растворителя и целевого компонента, температура, давление и т. д., а также время протекания процесса и производительность оборудования.

Процесс экстрагирования базируется на законах диффузии и равновесного распределения переходящих компонентов между двумя фазами (*жидкость – жидкость, твердое тело – жидкость*). Его движущей силой является разность концентраций компонентов в этих фазах.

В соответствии с механизмом процесса существенно отличаются методы их инженерного расчета, и, как следствие, аппараты для проведения экстракционных процессов конструктивно отличаются друг от друга.

Механизм экстрагирования твердого вещества отличается большей сложностью и включает в себя три стадии: 1) проникание экстрагента в пористую структуру твердого тела; 2) растворение целевого компонента в экстрагенте; 3) диффузия растворенного компонента в основную массу жидкости.

Конкретные обстоятельства приводят к тому, что каждая из этих стадий может определять скорость всего процесса. Однако чаще всего скорость процесса в целом лимитируется третьей стадией, как наиболее медленной.

Поэтому кинетика переноса целевого компонента из частиц твердой фазы в сплошную среду экстрагента, в общем случае, описывается уравнением конвективной диффузии.

Если извлекаемый компонент содержится в порах твердого вещества в твердом виде, то он последовательно растворяется в избирательном растворителе (экстрагенте), проникающем в поры исходного сложного по составу твердого вещества, диффундирует к наружной поверхности последнего и затем диффундирует от этой поверхности в основную массу жидкости. Если извлекаемый компонент содержится в порах твердого вещества в растворенном состоянии, то процесс экстрагирования сводится к извлечению растворенного вещества, которое диффундирует из пор твердого вещества в основную массу жидкости. Таким образом, при экстрагировании распределяемому веществу необходимо преодолеть как внутреннее, так и внешнее диффузионное сопротивление.

При экстрагировании из капиллярно-пористого материала миграция распределяемого вещества в твердой фазе обычно осуществляется посредством молекулярной диффузии. Плотность диффузионного потока в материале, отнесенную к единице его поверхности, описывают уравнением Фика с использованием эффективного коэффициента диффузии (*коэффициента массопроводности*) D_e :

$$I = -D_e \Delta c, \quad (8.1)$$

где I – вектор плотности диффузионного потока в расчете на полное сечение материала; D_e – эффективный коэффициент диффузии, зависящий от структурных параметров материала; c – концентрация извлекаемого материала.

Поскольку экстрагирование вещества в капиллярно-пористом материале происходит в основном за счет молекулярной диффузии в объеме пор, то поверхностной диффузией в слое зачастую можно пренебречь.

Зависимость эффективного коэффициента диффузии D_e от параметров пористой структуры характеризуется соотношением:

$$D_e = D \varepsilon \Pi = D m, \quad (8.2)$$

где D – коэффициент диффузии в гомогенной среде (чистой жидкости); Π – коэффициент диффузной проницаемости; $m = \varepsilon \Pi$ – параметр, зависящий от пористости структуры.

Процесс переноса вещества описывается уравнением массопроводности:

$$M = -DF \frac{dx}{dl} \tau, \quad (8.3)$$

где M – масса перенесенного вещества, кг; D – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; F – площадь поверхности частиц, м^2 ; dx/dl – градиент концентрации вдоль направления диффузии, $(\text{кг}/\text{м}^3)/\text{м}$; τ – время, с.

Коэффициент массопроводности определяется опытным путем.

Количество вещества, отводимого с поверхности твердого тела в окружающую жидкость, определяется по уравнению:

$$M = \beta F (X_n - C), \quad (8.4)$$

где β – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $\text{м}/\text{с}$; X_n – концентрация извлекаемого вещества на поверхности твердого тела (на границе «твердое тело – жидкость»), $\text{кг}/\text{м}^3$; C – концентрация жидкости в данный момент времени, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величина коэффициента массоотдачи β зависит от гидродинамической обстановки (условий обтекания частиц жидкостью) и температуры жидкости.

Приравнявая правые части уравнений (8.3) и (8.4), находим:

$$-DF \frac{dx/dl}{\tau} = \beta F(X_n - C) \tau. \quad (8.5)$$

Преобразуя уравнение (8.5), разделив правую часть его на левую и отбросив знаки математических операторов, получаем безразмерный комплекс – диффузионный критерий Био (Bi):

$$Bi = \beta l/D, \quad (8.6)$$

где l – определяющий размер: для пластины половина ее толщины; для цилиндра и сферы – радиус R .

Критерий Био отражает подобие переноса распределению вещества на границе твердой и жидкой фаз и имеет важное значение для анализа процессов массопередачи с участием твердой фазы.

Кинетический режим диффузионного процесса определяется численным значением критерия Био Bi . Условие $Bi \ll 1$ (т. е. $\rightarrow 0$) означает, что процесс протекает во внешнедиффузионной области. Кинетика процесса лимитируется диффузионным сопротивлением пограничного слоя. В этом случае процесс можно интенсифицировать активизацией гидродинамического режима (увеличением относительной скорости движения фаз, применение взвешенного слоя и т. д.).

Из этого следует, что увеличение внешней массоотдачи является главным средством интенсификации процесса экстрагирования, что позволяет сократить его продолжительность в десятки и сотни раз. Однако повышение скорости перемешивания увеличивает коэффициент массоотдачи и способствует интенсификации экстрагирования только при малых Bi , а в условиях внутридиффузионного режима уже не оказывает влияния на скорость процесса экстрагирования.

Условие $Bi \gg 1$ (т. е. $\rightarrow \infty$) свидетельствует о внутридиффузионном кинетическом режиме, т. е. экстрагирование определяется внутренней диффузией извлекаемого вещества, и кинетика процесса лимитируется диффузионным сопротивлением самого материала. В этом случае для интенсификации процесса можно повысить температуру, что приводит к росту коэффициента диффузии; можно уменьшить размеры частиц, изменить их форму или наложить внешние поля (электрическое, электромагнитное и др.), ускоряющие внутренний массоперенос и т. д.

При периодическом проведении процесса связь между содержанием экстрагируемого вещества в твердом теле и окружающем его растворе выражается уравнением материального баланса:

$$G_t(X_n - X) = G_p(C - C_n), \quad (8.7)$$

где G_t – масса твердого вещества, кг; G_p – масса растворителя, кг; X_n , C_n – начальные концентрации извлекаемого вещества в растворе, находящемся в порах твердого тела и в экстрагирующей жидкости (экстрагенте) ($\tau=0$); X , C – средние концентрации извлекаемого вещества в твердом теле и растворе в текущий момент времени τ ($X = C$ при $\tau \rightarrow \infty$).

Уравнение (8.7) можно представить в следующем виде:

$$C - C_n = b(X_n - X), \quad (8.8)$$

где $b = G_T/G_p$ – коэффициент, зависящий от концентрации суспензии.

Кинетику процесса переноса вещества из твердого тела в жидкость можно описать обобщенной зависимостью:

$$(X_n - X) / (X_n - C_n) = f(Fo, Bi, \Gamma, b), \quad (8.9)$$

где $Fo = Dvt/l$ – диффузионный критерий Фурье; Γ – симплекс геометрического подобия, характеризующий форму и размер частицы (для пластины $\Gamma = 0$).

Значения критериев Bi , и коэффициента диффузии D определяют по опытным данным. Зная эти величины и представив уравнение (8.9) в удобном виде, можно рассчитать концентрацию X извлекаемого компонента в твердом теле в любой момент времени или определить длительность процесса экстракции при заданной степени извлечения:

$$\varepsilon = (X_n - X) / X_n. \quad (8.10)$$

8.2 Порядок выполнения работы

1. По указанию преподавателя взвесить 4 одинаковые порции сухого капиллярно-пористого материала (чай, натуральный кофе в зернах или др.) и поместить каждую в пронумерованные химические стаканы (№1–№4) объемом 100 мл.

2. Две порции (стаканы №1 и №2) при помощи лабораторной мельницы подвергнуть тщательному измельчению.

3. Добавить ко всем порциям сухого материала по 50 мл воды при начальной температуре 20°C.

4. Включить отсчет времени процесса.

5. В течение указанного преподавателем интервала времени наблюдать за происходящими изменениями в системе при различных гидродинамических режимах:

– в стакане № 1 вести наблюдение за измельченным образцом при постоянном интенсивном перемешивании;

– в стакане № 2 вести наблюдение за измельченным образцом без перемешивания;

– в стакане № 3 вести наблюдение за неизмельченным образцом при постоянном интенсивном перемешивании;

– в стакане № 4 вести наблюдение за неизмельченным образцом без перемешивания.

6. Эффективность процесса оценивать визуально, путем сравнения оптической плотности получаемых экстрактов в одинаковый интервал времени.

7. Повторить п.1-6, повысив начальную температуру экстрагента (воды) до 50°C.

8. Повторить п.1-6, повысив начальную температуру экстрагента (воды) до 100°C.

9. Сделайте вывод о характере кинетики исследованного процесса в зависимости от начальной температуры, степени измельчения и гидродинамического режима.

10. Сформулировать и записать вывод по работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему установки со спецификацией;
- оценку характера кинетики исследованного процесса в зависимости от начальной температуры, степени измельчения и гидродинамического режима;
- вывод по работе.

4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

К тепловым процессам относятся процессы, скорость которых подчиняется законам теплопередачи. Движущая сила тепловых процессов – разность температур (ΔT).

Тепловые процессы могут проходить как без изменения агрегатного состояния компонентов системы (*нагрев, охлаждение*), так и с изменением агрегатного состояния (*конденсация, парообразование (кипение, выпаривание, сгущение), замораживание–размораживание, плавление-отверждение*).

Лабораторный практикум по тепловым процессам в Брестском государственном техническом университете включен в программу курса «Теплотехника», предусмотренного рабочим учебным планом специальности 1-36 09 01 «Машины и аппараты пищевых производств».

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов / К.Ф.Павлов, П.Г. Романков, А.А.Носков; под ред.чл-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. –576 с.
2. Дыгнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – изд. 2-е.: в 2-х кн. / Ю.И. Дыгнерский. – М.: Химия, 1995. – Кн. 1. – 400 с.: ил.
3. Киреев, В.А. Краткий курс физической химии /В.А. Киреев. – М.: Химия, 1978. – 462 с.
4. Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.
5. Остриков, А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.В. Логинов, Ю.В. Красовицкий, В.Н. Василенко; под ред. А.Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2012. – 616 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....	4
1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	6
Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	6
2. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	9
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ.....	9
Лабораторная работа № 3 РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ.....	14
Лабораторная работа № 4 ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАС- ХОДА МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ В АППАРАТЕ С МЕШАЛКОЙ.....	18
3. МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	24
Лабораторная работа № 5 АДСОРБЦИЯ ИЗ РАСТВОРОВ. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОТЕРМЫ АДСОРБЦИИ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ	24
Лабораторная работа № 6 ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО- ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТУННЕЛЬНОЙ СУШИЛКЕ.....	28
Лабораторная работа № 7 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ ЖИДКОЙ СМЕСИ ДИСТИЛЛЯЦИЕЙ.....	31
Лабораторная работа № 8 ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ВОДОРАС- ТВОРИМЫХ КОМПОНЕНТОВ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	35
4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	40
ЛИТЕРАТУРА.....	40

Учебное издание

Составители:
Басов Сергей Владимирович
Тур Элина Аркадьевна
Никончук Наталья Павловна

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам по курсу
«ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ»

для студентов специальности
1–36 09 01 «Машины и аппараты пищевых производств»

Ответственный за выпуск: Басов С.В.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная верстка: Митлошук М.А.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 25.01.2017 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 2,56. Уч. изд. л. 2,75. Заказ № 1206. Тираж 50 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.