

Механизм проникания вещества через полупроницаемую перегородку. *Проницаемость* — это свойство мембраны избирательно (селективно) пропускать молекулы или ионы определенных веществ.

Селективность — способность мембраны, иметь различную проницаемость по разным компонентам разделяемой смеси. Мерой селективности является величина, характеризующая изменение соотношения компонентов в смеси, прошедшей через мембрану (пермеат), по сравнению с исходной смесью.

При рассмотрении механизма мембранного процесса за его основу следует взять явления переноса, а в качестве основного потока проникания через мембрану принять диффузионный поток. Это создает сложную картину механизма мембранного разделения, который в общем включает в себя несколько последовательно протекающих стадий (рис.2). В результате при переносе вещества через мембрану будет формироваться соответствующий профиль изменения концентрации (рис.3). Это приводит к осложнению процесса проникания поверхностными явлениями, связанными с переносом вещества через пограничный слой с обеих сторон мембраны. Концентрация задерживаемого вещества в пограничном слое у поверхности мембраны постепенно увеличивается и становится больше, чем в основном объеме раствора, вследствие преимущественного переноса через мембрану растворителя. Это явление, свойственное мембранным процессам, получило название *концентрационной поляризации*. Оно приводит к снижению проницаемости, селективности, сокращению срока эксплуатации мембраны.

Из рассмотрения механизма переноса через мембраны можно сделать важный для практики вывод о влиянии внешних факторов на процесс разделения, его скорость, селективность. К таким основным факторам относят: давление, температуру, концентрацию, гидродинамические условия, природу разделяемых веществ и др. Правильная оценка влияния каждого из них в отдельности и совместно позволяет обоснованно подходить к выбору аппаратного оформления процессов мембранной технологии и определению оптимальных условий их проведения.

Описание экспериментальной установки

Для очистки, фракционирования, концентрирования, обессоливания синтетических и природных жидкостей, суспензий органической и неорганической природы используют лабораторную установку типа ФК-01 (рис.2.4)—комплект фильтров мембранных комбинированных. Комплект состоит из набора плоских синтетических мембран 3, двух фильтров 2, насоса 12, индикатора расхода //, распределителя), магнитной мешалки 5. Фильтры имеют сходное устройство. Каждый фильтр состоит из корпуса, выполненного в виде прозрачного цилиндра с внутренним объемом 1000 мл. На крышке расположены входной штуцер для подачи газа или жидкости под давлением и предохранительный клапан на 588 кПа (6 кгс/см²). Внутри цилиндра находится мембрана диаметром 120 мм, уложенная на пористую подложку.

Первый корпус предназначен для ультраfiltrации растворов сравнительно низкой концентрации. Вторым корпусом можно фиксировать на нужной высоте над поверхностью мембраны. Это обеспечивает необходимый режим перемешивания (наибольшая частота вращения мешалки в пределах до 15 об/с) и снижает эффект концентрационной поляризации.

Корпус снабжен запорным краном 6 для наполнения (опорожнения) фильтра и для отбора проб рабочего раствора в процессе ультрафильтрации.

Другой корпус предназначен для ультрафильтрации растворов высоких концентраций (массовая доля компонента до 10 % и выше) и имеет специальный канал 9 для циркуляции раствора над поверхностью мембраны.

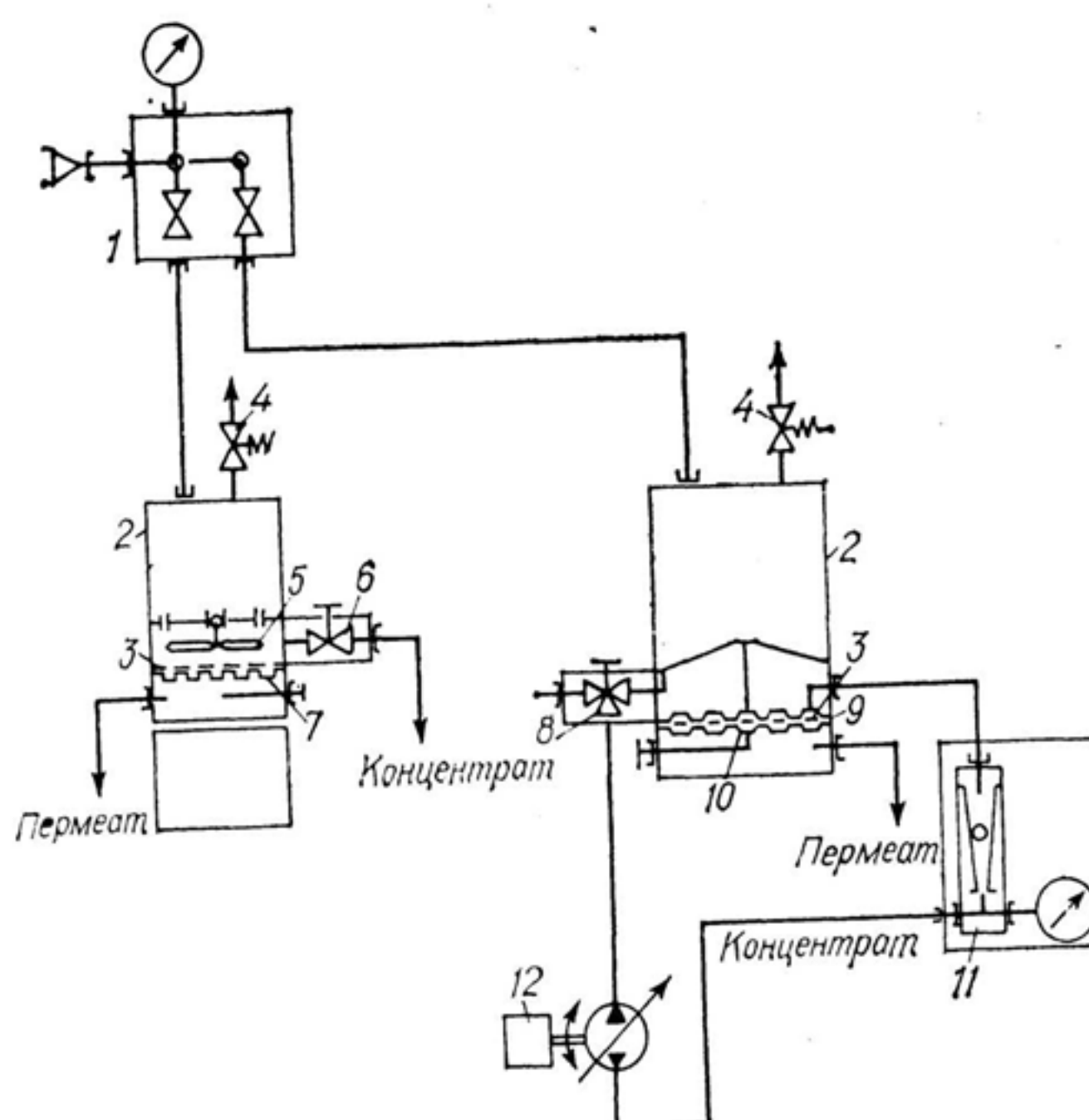


Рис. 4. Схема установки ФК-01:

1 — распределитель давления; 2 — фильтры; 3 — мембраны; 4 — вентили; 5 — магнитная мешалка; 6 — запорный кран; 7 — подложка; 8 — кран-переключатель; 9 — циркуляционный канал; 10 — дренажная система; 11 — индикатор расхода; 12 — насос

Циркуляция раствора по касательной к поверхности мембраны поддерживает высокий уровень проницаемости мембраны и стабилизирует ее селективность в течение всего процесса (так как значительно и равномерно уменьшает слой концентрационной поляризации).

Кран-переключатель 8 служит для наполнения и удаления раствора из фильтра с помощью насоса, а также для добавления рабочего раствора в фильтр и отбора проб без остановки процесса ультрафильтрации. Основание фильтра имеет пористую подложку и дренажную систему 10 со штуцером для слива фильтрата (или для подсоединения следующего фильтра).

Входящий в комплект насос 12 представляет собой двухканальный шланговый насос, имеющий плавную электрическую регулировку объемной подачи от 0 до 1 л/мин по каждому каналу. Наибольшее рабочее давление при работе с насосом 196 кПа (2 кгс/см²). Электронная подпись: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6. Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна. Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022.

Индикатор расхода 11 предназначен для одновременного контроля за объемной подачей раствора и его давлением. Распределитель давления 1 имеет кнопки для

независимого включения и отключения фильтров и снабжен манометром для определения создаваемого в фильтрах давления.

Порядок выполнения работы

Работу проводят на ацетатцеллюлозных мембранах типа УАМ-М, серийно выпускаемых и обладающих наилучшей удельной водопроизводительностью среди плоских мембран. Ниже приведена характеристика двух марок этих мембран:

УАМ-100 УАМ-500

Пористость, %	72—78	73—83
Производительность по воде (при $t=20$ и $p=15$ МПа), л/(м ² -сут)	С140—390	460—7000
Диаметр пор, мкм	0,05—0,01	0,03
Рабочий диапазон рН	4—7	4—7

В зависимости от поставленной задачи выбирают фильтр и мембрану с нужными характеристиками. По справочным данным (или по стандартной методике) определяют проницаемость, селективность и пористость мембраны. Определения проводят по условиям соответствующих режимов последующего эксперимента по ультрафильтрации. Для ультрафильтрационного разделения в качестве часто встречающейся на практике неоднородной жидкости может быть принята водно-органическая система, например масло—вода.

При ультрафильтрации жидкостей сравнительно низкой концентрации может быть, в принципе, применена любая из схем, указанных на рис. 1.

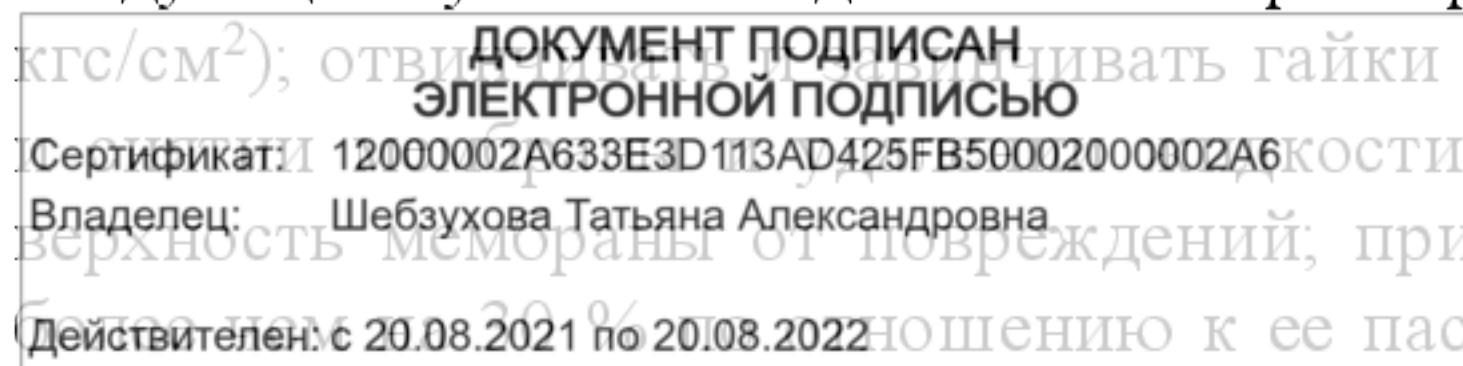
Фильтры заполняют рабочей жидкостью заданного объема и начальной концентрации, включают магнитную мешалку или насос, устанавливают заданную частоту вращения и циркуляционный расход. Далее включают источник давления и устанавливают рабочее давление. С помощью переключения давления создают необходимые условия для проведения процесса в каждом из мембранных фильтров. Через заданные промежутки времени с помощью запорного крана производят отбор проб (без остановки ультрафильтрации), в которых определяют концентрацию.

При ультрафильтрации жидкостей высоких концентраций используют только второй фильтр комплексной мембранной установки.

Для отключения фильтров после окончания работы необходимо: отключить магнитную мешалку и насос; перекрыть линию давления с помощью редуктора типа ДКП-1-65; сбросить давление в фильтре поворотом головки клапана 4 и вывинтить клапан; осторожно, не повредив мембраны, удалить жидкость из фильтров (например, с помощью шприца).

Перед началом новой работы фильтр следует промыть дистиллированной водой или соответствующим органическим растворителем.

Для обеспечения безопасных условий работы необходимо строгое выполнение следующих указаний: давление в фильтрах не должно превышать 490 кПа (5 кгс/см²); отвинчивать гайки и клапан только вручную; при установке из фильтров необходимо оберегать поверхность мембраны от повреждений; при уменьшении проницаемости мембраны по паспортным данным мембрана подлежит замене; если фильтры не используются более 15 дней, их следует хранить в разобран-



ном виде; по мере деформации подложки ее необходимо заменять.

Обработка экспериментальных данных

Обработку полученных результатов проводят в следующей последовательности.

1. Экспериментально находят зависимость проницаемости мембраны

от времени процесса ультрафильтрации. Для этого строят графическую зависимость вида $\ln G$ —ти определяют по ней численное значение величин C_n и m , входящих в формулу:

$$G_\tau = G_n \exp(-m\tau).$$

2. По уравнению

$$\tau = -\frac{1}{m} \ln \left\{ \left(\frac{C_n}{C_k} \right)^\phi - 1 \right\} \frac{1}{\frac{C_n}{C_k} + 1} \quad (29.2)$$

рассчитывают продолжительность заданной степени концентрирования компонента.

3. Находят концентрацию разделяемого компонента; и концентрате:

$$C_k = C_n \left\{ 1 - \frac{C_n}{C_k} [1 - \exp(-m\tau)] \right\}. \quad (29.3)$$

4. Определяют объем пермеата за время τ :

$$V_n = \int_0^\tau G_n \exp(-m\tau) d\tau = \frac{1}{m} [1 - \exp(-m\tau)]. \quad (29.4)$$

5. Вычисляют объем концентрата в аппарате:

$$V_k = 1 - V_n.$$

6. По формуле

$$C_n = (C_k V_k - C_n V_n) / V_n.$$

находят состав пермеата на выходе из аппарата.

7. Рассчитывают коэффициент разделения:

$$K_n = C_n / C_k.$$

В формулах приняты следующие обозначения: V — объем жидкости, м; G — проницаемость мембраны, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; ϕ — селективность мембраны; F — площадь поверхности мембраны, м^2 ; τ — время, с; C — концентрация, $\text{кг}/\text{м}^3$; K_p — коэффициент разделения; индексы «н», «п», «к», соответственно характеризующие исходную жидкость, пермеат и концентрат.

Полученные данные, а также условия опытов оформляют в виде отчетной таблицы.

По результатам эксперимента и расчета сравнивают значения опытной продолжительности ($\tau_{\text{оп}}$) достижения заданной степени разделения с рассчитанной ($\tau_{\text{расч}}$). Среднее расхождение между этими величинами не должно превышать $\pm 20\%$.

Контрольные вопросы

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Как называют мембранные технологии?

2. Перечислите типовые мембранные процессы и объясните подробнее ультрафильтрацию и области ее практического использования.

3. Что такое мембрана и какие типы мембран используют в технологических процессах?

называют мембранным?

процессы и объясните подробнее ультрафильтрацию и области ее практического использования.

мембран используют в технологических процессах?

4. В чем принципиальное отличие мембранного процесса от фильтрования?
5. Почему мембранный процесс по своему физическому содержанию — явление микроскопическое, а не макроскопическое?
6. Что является движущей силой мембранного процесса?
7. Поясните такие понятия, как проницаемость и селективность мембраны, ее коэффициент разделения?
8. Какой характер имеет распределение концентраций при течении потока через мембрану?
9. Что такое явление «концентрационная поляризация» и каково его влияние на селективность, проницаемость мембраны и скорость мембранного процесса?
10. Перечислите основные технологические факторы, влияющие на мембранный процесс.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №11

Тема: Изучение процесса перемешивания жидких смесей

Цель работы: 1. Изучить процесс перемешивания на примере перемешивания жидких смесей;
2. Получить экспериментальные данные о влиянии конструктивных и режимных параметров на затраты энергии для перемешивания;
3. Развить навыки применения критериальных оценок явлений;
4. Познакомиться с автоматизированной системой измерений в среде LabVIEW.

Приборы и материалы: лабораторная установка, тензодатчик, термопара, тахометр, микроскоп, предметные стекла, компьютер, программа LabVIEW, свиной жир, вода, набор сменных лопастей, ключи, отвертки.

Краткие теоретические сведения

Перемешивание заключается в измельчении элементов жидких, твердых или сыпучих сред и их равномерном перераспределении в пространстве. Смесительные аппараты могут рассматриваться одновременно как измельчители и переносчики вещества в пространстве.

Полнота и завершенность процесса перемешивания или в других терминах эффективность перемешивания или достигнутая однородность смеси может оцениваться величиной β , называемой коэффициентом неоднородности смеси:

$$\beta = \frac{1}{n \cdot \bar{C}} \cdot \sum_{i=1}^n |C_i - \bar{C}|,$$

где C_i , $\bar{C}$ – величины концентрации рассматриваемого ингредиента смеси: текущая (в точке i) и средняя (ее математическое ожидание);

n – число точек измерения текущей концентрации;

$i = 1, 2, \dots, n$.

Соответственно характеристикой однородности смеси является величина $R = 1 - \beta$.

Введенную характеристику неоднородности смеси β можно назвать относительным средним отклонением концентрации рассматриваемого ингредиента смеси от средней ее величины или от математического ожидания концентрации. В связи с одинаковым физическим смыслом данного показателя и среднего квадратического отклонения при нормальном законе распределения случайных величин (σ) размерный показатель σ или его безразмерная величина ($\frac{\sigma}{\sigma_0}$) также может использоваться

как характеристика неравномерности перемешивания.

Приближенные методы измерения равномерности перемешивания могут выполняться по результатам измерения диаметра капель дисперсной фазы смеси. По мере повышения равномерности перемешивания максимальный диаметр капель уменьшается. Преимуществом данного способа оценки равномерности перемешивания является простота анализа.

В практических измерениях однородности смеси поступают следующим обра-

зом. В ряде точек i перемешиваемого объема по заранее намеченной схеме одновременно отбирают пробы концентрации рассматриваемого компонента C_i и вычисляют среднюю величину $\bar{C} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n C_i$, называемую математическим ожиданием,

и коэффициент неоднородности смеси β по приведенной выше формуле. При необходимости находят максимальную ее величину.

Перемещение частиц в пространстве возможно по двум механизмам:

- за счет механического перемещения рабочими органами смесителя;
- за счет диффузионного перемещения силами молекулярного взаимодействия в эмульсиях, суспензиях и золях.

В сыпучих смесях диффузионного перемещения ингредиентов не наблюдается.

Механическое перемещение раздробленных частиц происходит одновременно с измельчением, когда частицы разрушаются при попадании между подвижным смесительным органом (ножом) и неподвижной декой. При этом разрушенные частицы переносятся подвижным органом на некоторое расстояние, которое случайным образом изменяется в зависимости от ориентации разрушаемой частицы. Однако даже если в результате механического перемещения частиц не достигнуто идеального их распределения в пространстве, в эмульсиях, суспензиях и золях оно будет достигнуто через некоторое время за счет диффузии. Твердые и жидкие частицы дисперсной фазы в этих системах диффундируют, как и другие неоднородности, подчиняясь закону Фика.

В связи с отсутствием диффузионного перемещения твердых сыпучих частиц дисперсной фазы, распределенных в твердой же дисперсионной среде, их перемещение в пространстве определяется только механическим переносом. Механический перенос может сопровождаться или не сопровождаться измельчением частиц или конгломератов частиц системы.

Количество неоднородностей, находящихся в единице объема среды, можно называть их концентрацией (C). Соответственно процессы измельчения и перемещения неоднородностей в пространстве можно характеризовать как процессы уменьшения размеров и выравнивания концентраций неоднородностей в пространстве за счет механического и диффузионного процессов. Скорости этих процессов пропорциональны концентрациям (C) неоднородностей.

Приведенные рассуждения записываются следующим математическим выражением:

$$\frac{dC}{d\tau} = -\delta \cdot C,$$

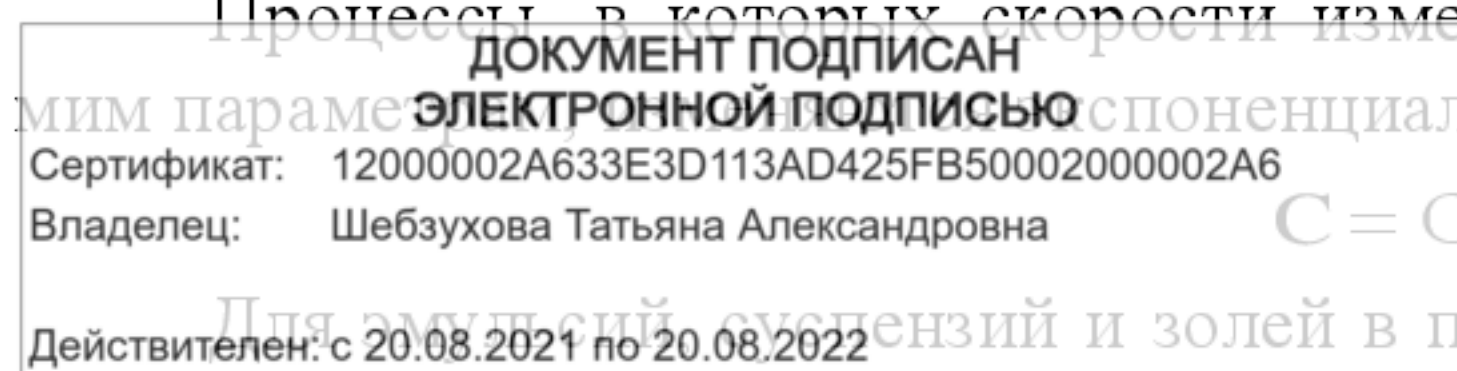
где δ – постоянная.

В этом уравнении знак минус означает, что с повышением скорости изменения концентрации сама концентрация уменьшается. Граничное условие: $C=C_0$ при $\tau=0$.

Процессы, в которых скорости изменения параметров пропорциональны самим параметрам, называются экспоненциальными. В этом случае процесс изменения концентрации неоднородностей можно записать так:

$$C = C_0 \cdot e^{-\delta \cdot \tau}.$$

Для эмульсий, суспензий и золей в первый период перемещения крупных неоднородностей их диффузионным перемещением можно пренебрегать. Однако по мере исчерпания возможностей механического перемещения неоднородностей, т.е.



по мере уменьшения их размеров, диффузия остается единственным процессом, вызывающим выравнивание распределения неоднородностей в пространстве. За счет нее при любых параметрах эмульсий и суспензий со временем концентрация дисперсных частиц в дисперсионной среде выравнивается.

Расход энергии на привод мешалок определяется на основании экспериментальных исследований однотипных конструкций. Результаты исследований для каждого типа мешалок обобщаются критериальными зависимостями. В данном случае – это зависимость критерия Эйлера (Eu) от критерия Рейнольдса (Re) для конкретной конструкции смесителя

$$Eu = c \cdot Re^a; Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu}; Eu = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5},$$

$$C = \text{Const}; a = \text{Const};$$

где N – мощность, затрачиваемая на перемешивание, Вт;

n – частота вращения смесителя, об/мин;

d – наружный диаметр лопастей смесителя, $d=0,04$ м;

μ – динамическая вязкость перемешиваемого продукта.

Для каждой конструкции смесителя зависимости $Eu = f(Re)$ сводятся в справочные данные и используются при проектировании.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 8.1. В ней осуществляется перемешивание воды и минерального масла с образованием эмульсии. Перемешивание происходит в деже (1), с помощью месильных лопастей (2), вращающихся относительно неподвижных отбойных лопастей (3). Дежа подогревается снаружи потоком теплого воздуха, создаваемого феном (4). Месильные лопасти получают движение от шпинделя (5), приводимого электромотором (10) через клиноременную передачу (11). Вращение дежи с валом (6) ограничено упором упругого стержня (8) в чувствительный элемент тензодатчика (9). Для этого упругий стержень связан держателем (7) с валом дежи. Вся конструкция укреплена на основании (14) с помощью стойки (12) и держателя столика (13). Шпиндель привода месильных лопастей и вал крепления дежи расположены соосно. За счет этого крутящий момент, передаваемый шпинделем месильным лопастям, оказывается связанным с крутящим моментом ($M_{кр}$), передаваемым дежой через упругий стержень на тензодатчик, выражением:

$$M_{кр} = r \cdot Q, \text{ Дж},$$

А мощность N , затрачиваемая на перемешивание, определяется выражением

$$N = Q \cdot r \cdot n, \text{ Вт},$$

где Q – усилие на тензодатчике, Н.

r – радиус дежи, $r = 0,11$ м;

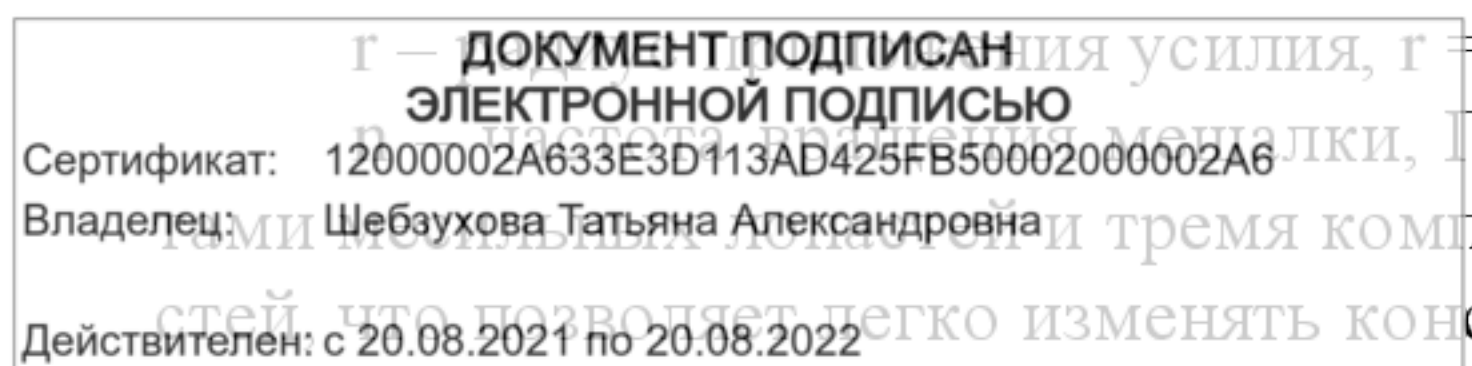
n – частота вращения дежи, Гц.

Установка снабжена тремя комплек-

тами неподвижных (отбойных) лопа-

стей, что позволяет легко изменять конструкцию блока перемешивания.

Изменение вязкости перемешиваемой эмульсии реализуется ее подогревом с помощью фена. При вращении месильных лопастей происходит перемешивание



эмульсии в деже. Крутящий момент, характеризующий энергию перемешивания, рассчитывается по усилию, регистрируемому тензодатчиком, по приведенной выше формуле. Частота вращения шпинделя регулируется вариатором клиноременной передачи и измеряется перед началом эксперимента с помощью счетчика оборотов. Установка снабжается лабораторным микроскопом, с помощью которого измеряется равномерность перемешивания ингредиентов суспензии.

Сигналы от тензодатчика и термопары вводятся в автоматический измерительный комплекс, построенный на базе персонального компьютера с использованием среды LabVIEW (Лабвью) – «Рабочее место конструктора виртуальных измерительных приборов».

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

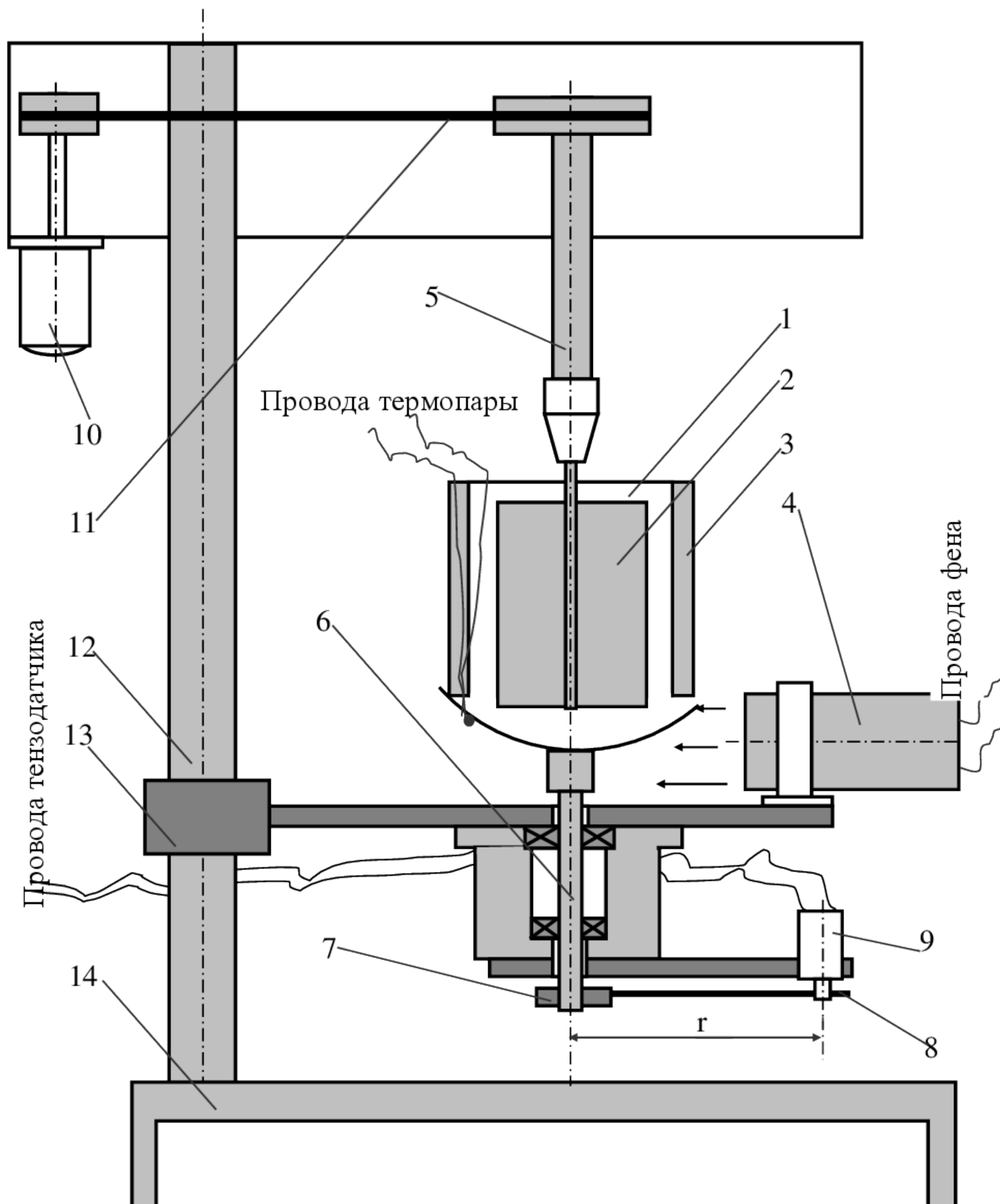


Рисунок 8.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – дежа; 2 – месильная лопасть; 3 – отбойная лопасть; 4 – фен;
 5 – шпиндель; 6 – вал крепления дежи; 7 – держатель упругого стержня;
 8 – упругий стержень; 9 – тензодатчик; 10 – двигатель;
 11 – клиноременная передача; 12 – стойка; 13 – держатель столика;
 14 – основание

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

В данной лабораторной работе на экран лицевой панели выводится мнемосхема экспериментальной установки, и показания датчиков в зависимости от времени.

На графике обработки экспериментальных данных отображаются: мощность N , затрачиваемая на перемешивание, критерий Эйлера, средний размер капель воды в смеси в зависимости от времени. Эти зависимости могут определяться для различных органов перемешивания. По окончании эксперимента выполняется регрессионный анализ зависимости размеров частиц воды в масле от времени, и результат представляется экспоненциальной зависимостью. Для получения зависимости критерия Эйлера от критерия Рейнольдса необходимо несколько раз повторить эксперимент при вариациях параметров, влияющих на критерий Рейнольдса и при измерениях вязкости смеси, которая в данной лабораторной работе не измеряется.

Для определения равномерности перемешивания ингредиентов суспензии используется следующая методика. В заранее выбранные моменты времени из дежи отбираются микропробы эмульсии, и из них на предметное стекло микроскопа наносятся капли для последующего анализа. После окончания переходных процессов в каплях (они продолжаются около 5 минут) капли помещаются под микроскоп. Перемещая микрометрическим винтом столик микроскопа с предметным стеклом в поле зрения по прямой линии, измеряют средние размеры капель воды в смеси, используя для этого шкалу микроскопа. Результаты записывают. Используя приведенную в приложении программу обработки статистических данных аппроксимируют их экспоненциальной зависимостью от времени.

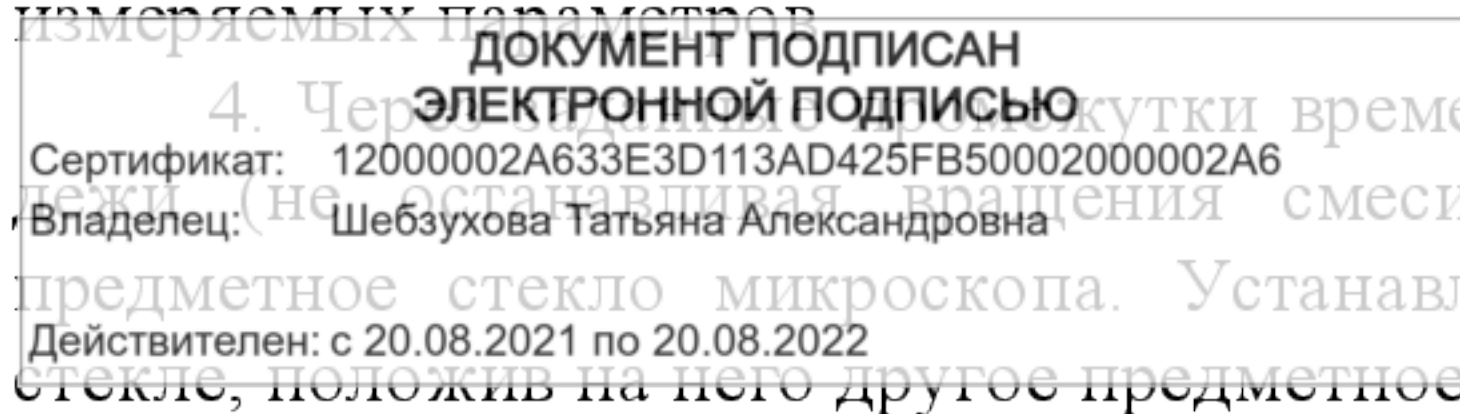
Порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе приготавливается продукт в виде смеси свиного жира и воды, который изменяет свои характеристики в процессе охлаждения. Эмульсия состоит из 100 мл воды и 200 мл сала свиного топленого.

В первый период приготовления, когда температура продукта превышает $35...40^{\circ}\text{C}$, он имеет свойства эмульсии. Равномерность перемешивания в этот период увеличивается по времени. Крутящий момент при этом также несколько увеличивается, что может быть объяснено увеличением вязкости с уменьшением температуры. При уменьшении температуры ниже $30...35^{\circ}\text{C}$ смесь загустевает и перемешивание прекращается. Лопастные мешалки как бы «выфрезеровывают» выемку в продукте, после чего крутящий момент резко уменьшается. Изменение равномерности перемешивания после этого прекращается.

Ознакомившись с устройством установки и системы измерений, выполняют эксперименты в следующей последовательности.

1. Включают систему измерений и проверяют ее функционирование.
2. Закладывают в дежу ингредиенты будущего продукта.
3. Включают вращение мешалки, устанавливая рекомендуемую частоту вращения шпинделя - 12 об/мин. На экране компьютера наблюдают изменения измеряемых параметров.
4. Через заданные промежутки времени (1, 3, 5, 10, 20, 30 мин) отбирают из дежи (не останавливая вращения смесителя) каплю смеси и наносят ее на предметное стекло микроскопа. Устанавливают толщину капли на предметном стекле, положив на него другое предметное стекло.



5. Наблюдая за каплей на предметном стекле под микроскопом «на просвет», измеряют размеры трех самых больших капель в поле зрения микроскопа и вычисляют их среднее значение.

6. Результаты измерений максимальных размеров капель наносят на график зависимости этих размеров от времени. Зависимость должна быть близка к экспоненциальной.

Таблица 8.1 Протокол испытаний.

Измеряемые и вычисляемые параметры	Продолжительность перемешивания, мин					
Крутящий момент на валу смесителя, Н·м						
Мощность перемешивания, Вт						
Максимальный диаметр капль воды в смеси, мм (средний по результатам измерений трех наибольших диаметров)						
Температура продукта, °С						

7. Результаты изменения мощности, потребляемой на перемешивание, и температуры смеси наносят на график их зависимости от времени. Обращают внимание на то, что в процессе остывания приготавливаемой смеси изменяется ее консистенция и мощность, затрачиваемая на перемешивание. Продукт приобретает новые качественные показатели. Этот график перестраивается в график зависимости крутящего момента от температуры.

8. Делают выводы об изменении равномерности перемешивания и мощности, потребляемой на перемешивание, от времени. Делают также вывод о реализации в данной работе процесса приготовления продукта в виде смеси свиного жира с водой.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы составляют процесс перемешивания?
2. Какими параметрами можно характеризовать равномерность перемешивания?
3. Какие параметры характеризуют критерии Эйлера и Рейнольдса при перемешивании?
4. Какими признаками определяется экспоненциальный характер изменения равномерности перемешивания по времени?
5. Почему для определения статистических характеристик равномерности перемешивания ингредиентов эмульсии достаточно выполнить измерения размеров капель в ограниченном объеме, например, вдоль одной прямой в поле видения микроскопа?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

6. Почему результаты экспериментальных исследований, как правило, представляются в критериальной форме? Не проще ли представлять их в той форме, в какой ведется конструкторский расчет – в виде зависимостей конечных результатов от действующих размерных параметров?

7. Какие способы перемешивания вы знаете?

8. Перечислить достоинства недостатки лопастных мешалок.

9. Выведите формулу критерия мощности при механическом перемешивании.

10. Как осуществляется циркуляционное и поточное перемешивание?

11. Поясните принцип пневматического перемешивания.

12. Что называется эффективностью перемешивания?

13. Какой процесс называют гомогенизацией?

14. Как осуществляется перемешивание сыпучих материалов в промышленности?

15. Как можно интенсифицировать процессы перемешивания сыпучих материалов?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа № 12

Тема: Изучение процесса псевдоожижения

- Цель работы:*
1. Повысить уровень знаний о процессе псевдоожижения;
 2. Повысить уровень знаний о процессе сушки в псевдоожиженном слое.
 3. Получить экспериментальные данные о параметрах псевдоожиженного слоя и о сушке в нем.

Приборы и материалы: лабораторная установка, термоанемометр, термопары, водяной манометр, линейка, компьютер.

Краткие теоретические сведения

За последние годы широкое применение в промышленности нашли процессы взаимодействия газов и жидкостей с твердыми зернистыми материалами. При проведении этих процессов твердые частицы приобретают подвижность относительно одна другой за счет обмена энергией с взвешивающим потоком. Такое состояние зернистого материала получило название псевдоожиженный слой из-за внешнего сходства с поведением обычной капельной жидкости: псевдоожиженный слой принимает форму вмещающего его аппарата, поверхность псевдоожиженного слоя (без учета всплесков) — горизонтальная. Одновременно обнаруживаются и другие свойства, аналогичные свойствам жидкости, — текучесть и поверхностное натяжение. Тела, имеющие меньшую плотность, чем псевдоожиженный слой, всплывают в нем, а большую — тонут.

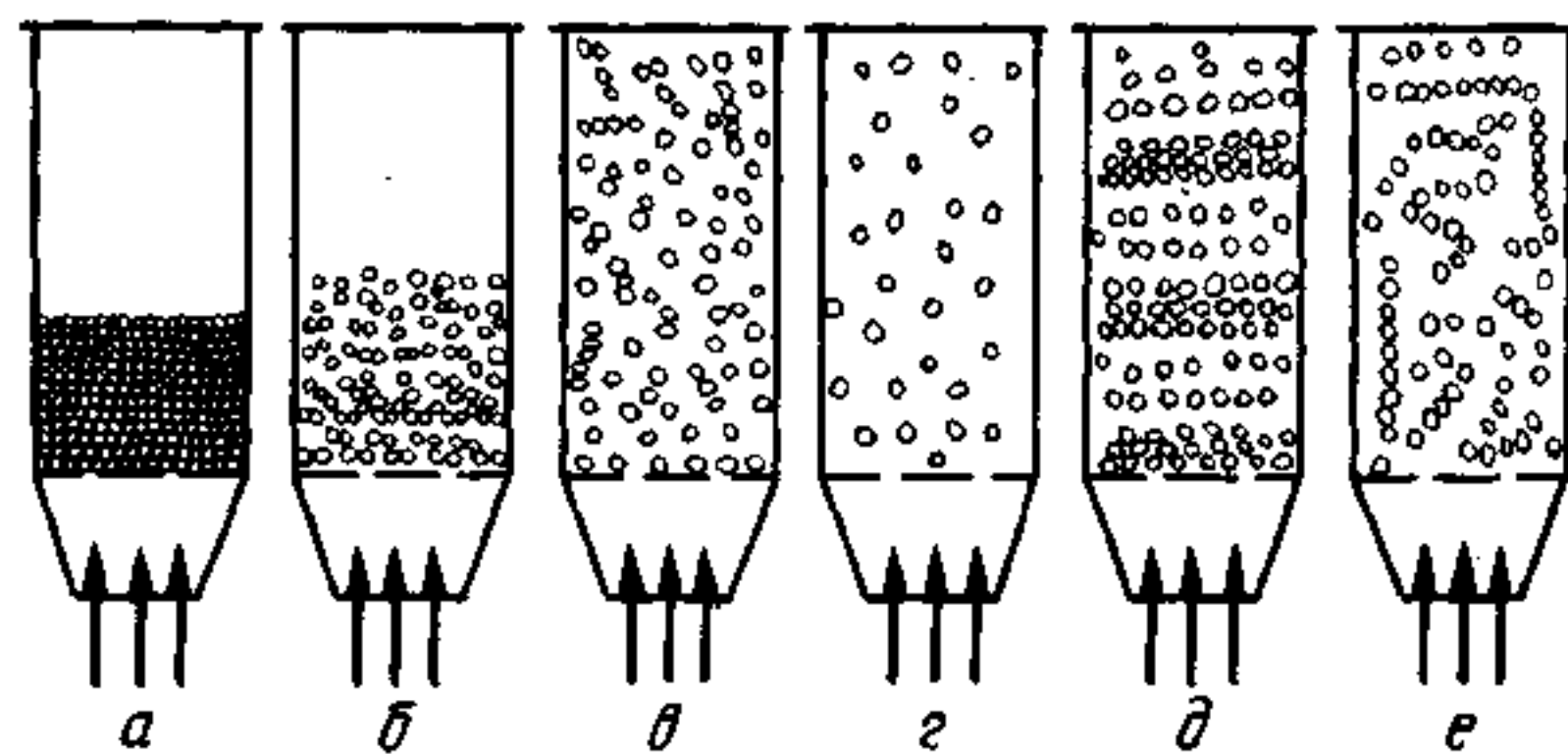


Рисунок 9.1 - Состояние слоя зернистого материала при разных режимах:

- а — неподвижный слой (режим фильтрации);
- б — однородный псевдоожиженный слой при $V \geq V_{кр}$;
- в — неоднородный псевдоожиженный слой; г — унос твердых частиц;
- д — псевдоожиженный слой с поршнеобразованием;
- е — псевдоожиженный слой с каналообразованием

Широкое применение псевдоожижения в промышленную практику обусловлено рядом преимуществ. Зернистый материал можно перемещать по трубе, что позволяет осуществлять непрерывно. Особенно выгодно применять псевдоожиженный слой для процессов, скорость которых определяется термическим или диффузионным сопротивлением в газовой фазе. Эти сопротивления в условиях псевдоожижения уменьшаются в десятки, а иногда в сотни раз, а ско-

рость процессов соответственно увеличивается. Благодаря интенсивному перемешиванию твердых частиц в псевдоожигенном слое практически выравнивается поле температур, устраняется возможность значительных локальных перегревов и связанных с этим нарушений в ходе ряда технологических процессов. Наряду с достоинствами псевдоожигенному слою свойственны и некоторые недостатки. Так, вызванное интенсивным перемешиванием твердых частиц выравнивание температур и концентраций в слое приводит к уменьшению движущей силы процесса. Возможность проскока значительных количеств газа без достаточного контакта с твердым зернистым материалом также снижает выход целевого продукта. Отрицательным следует считать износ самих твердых частиц, эрозию аппаратуры, возникновение значительных зарядов статического электричества, необходимость установки мощных газоочистительных устройств.

Гидродинамическая сущность процесса псевдоожигения заключается в следующем. Если через слой зернистого материала, расположенного на поддерживающей перфорированной решетке аппарата, проходит поток псевдоожигающего газа, то состояние слоя зернистого материала оказывается разным (рисунок 9.1) в зависимости от скорости этого потока. При плавном увеличении скорости потока от 0 до некоторого первого критического значения происходит обычный процесс фильтрования, при котором твердые частицы неподвижны.

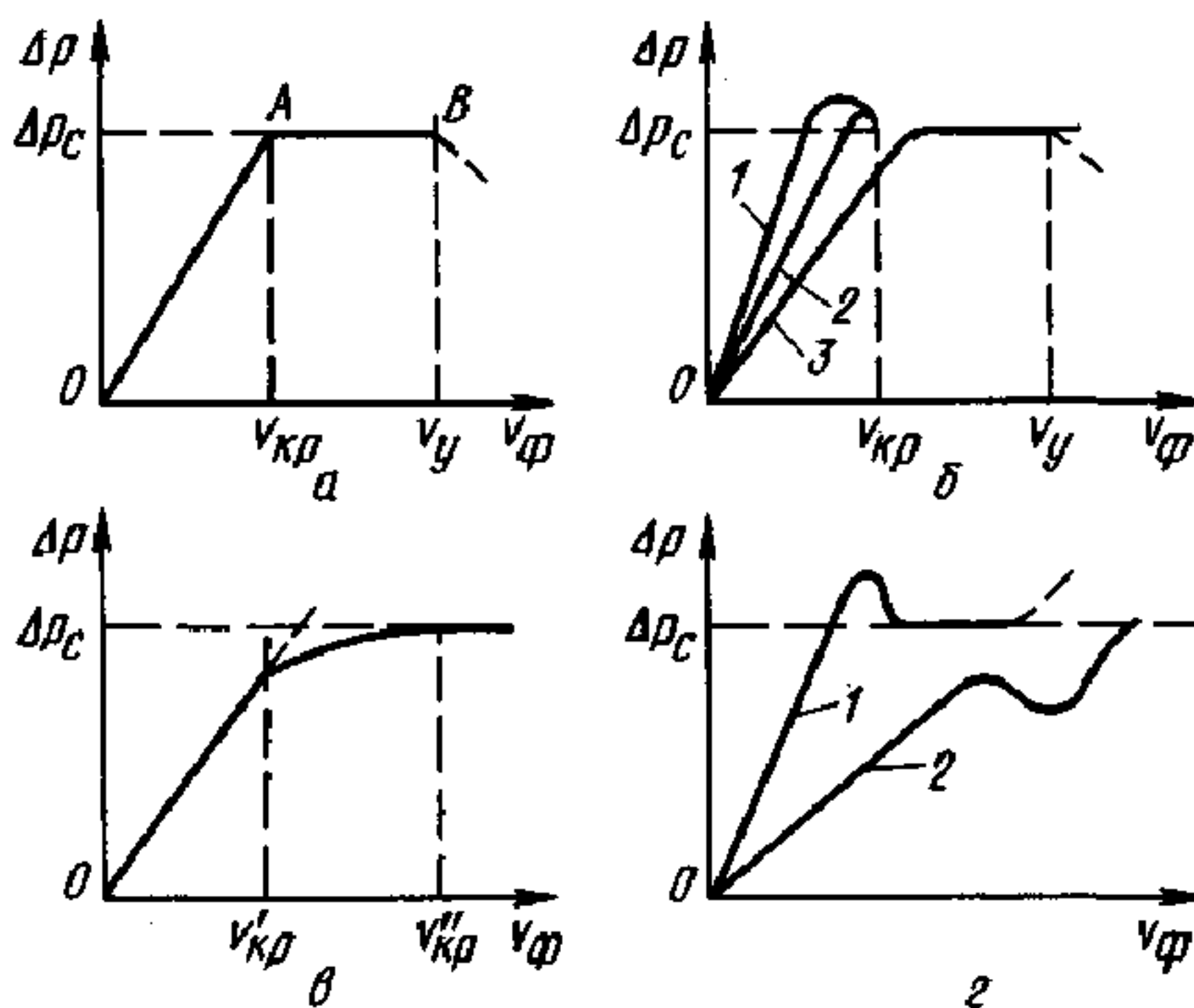


Рисунок 9.2 - Кривые псевдоожигения:

а—идеальная; б — реальная; в — полидисперсного материала; г — слоя с поршнеобразованием и каналообразованием

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

псевдоожигения (рисунок 9.2 а), выражающем зависимость перепада статического давления в слое зернистого материала от скорости потока псевдоожигающего агента, процессу фильтрования соответствует восходящая ветвь ОА. В случае малого размера частиц и невысоких скоростей

фильтрации псевдоожигающего агента режим движения последнего в слое материала ламинарный и ветвь ОА прямолинейна (рисунок 9.2, а). В слое крупных частиц при достаточно высоких скоростях псевдоожигающего агента перепад давления может расти нелинейно с увеличением скорости (переходный и турбулентный режимы).

Переход от режима фильтрации к состоянию псевдоожигания соответствует на кривой псевдоожигания критической скорости псевдоожигающего агента $u_{кр}$ (точка Л), называемой скоростью начала псевдоожигания. В момент начала псевдоожигания вес зернистого материала G_c , приходящийся на единицу площади поперечного сечения аппарата f , уравнивается силой гидравлического сопротивления слоя:

$$\Delta p_c = \frac{G_c}{f}$$

С учетом архимедовых сил, действующих на частицы слоя, выражение для Δp_c можно представить в виде:

$$\Delta p_c = (\rho - \rho_s) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot h_0$$

где ρ , ρ_s — плотность твердых частиц и псевдоожигающего агента;

h_0 — высота неподвижного слоя;

ε_0 — порозность неподвижного слоя, т. е. относительный объем пустот в неподвижном слое.

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}$$

V_0 и V — объем неподвижного слоя и объем частиц;

ρ_0 — плотность материала.

Начиная со скорости $u_{кр}$ в начале псевдоожигания и выше, сопротивление слоя сохраняет практически постоянное значение и зависимость $\Delta p_c = f(u_{\phi})$ выражается прямой АВ, параллельной оси абсцисс. Это объясняется тем, что с ростом скорости псевдоожигающего агента контакт между частицами уменьшается и они получают большую возможность хаотического перемещения по всем направлениям. При этом возрастает среднее расстояние (просветы) между частицами, т. е. увеличивается порозность слоя ε и, следовательно, его высота h . Так как перепад давления в псевдоожиганном слое Δp_c практически остается постоянным, высоту такого расширившегося слоя можно определить из условия:

$$\Delta p_c = (\rho - \rho_s) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot h_0 = (\rho - \rho_s) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot h$$

откуда

$$h = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} \cdot h_0$$

В зависимости от свойств псевдоожигающего потока и его скорости можно наблюдать несколько стадий процесса псевдоожигания. При скорости псевдоожигающего агента, превышающей $u_{кр}$, т. е. при $u \geq u_{кр}$, наблюдается однофазное («спокойное») псевдоожигание (рисунок 9.2, б). По мере роста скорости при псевдоожигании газом в слое возникают компактные массы газа («пузыри», «каверны»), интенсивно турбулизирующие твердые частицы и образующие всплески зернистого материала на поверхности. При этом наблюдаются значительные пульсации ста-

тического и динамического напоров псевдоожигающего агента. Такой характер гидродинамики слоя называется неоднородным псевдоожигением (рисунок 9.2, г). Наконец, при достижении некоторого второго критического значения скорости v_y , называемой скоростью уноса, твердые частицы начинают выноситься из слоя (рисунок 9.2, г) и их количество в аппарате уменьшается. Порожность такого слоя стремится к 1, и сопротивление слоя правее точки В (рисунок 9.2, а) также падает. Кривая ОАВ называется кривой идеального псевдоожигения.

На практике действительная кривая псевдоожигения (рисунок 9.2, б) отличается от идеальной кривой. Крутизна восходящей ветви реальной кривой псевдоожигения определяется плотностью первоначальной упаковки (засыпки) твердых частиц: при более плотной упаковке сопротивление слоя несколько выше и восходящая ветвь идет круче (кривая 1), при более рыхлой — полого (кривая 2). В момент перехода слоя в псевдоожигенное состояние наблюдается пик давления, обусловленный необходимостью затраты дополнительной энергии на преодоление сил сцепления. Величина пика давления определяется плотностью первоначальной упаковки частиц, их формой и состоянием их поверхности.

При постепенном уменьшении скорости псевдоожигающего агента и переходе слоя от псевдоожигенного состояния к плотному кривая 3 располагается ниже кривых 1 и 2 (рисунок 9.2, б), что соответствует более рыхлой структуре плотного слоя для этого случая. Для полидисперсных материалов, как правило, наблюдается переходный диапазон скоростей между режимами фильтрования и псевдоожигения (рисунок 9.2, в). Вначале при некоторой скорости $v'_{кр}$ приходят в движение наиболее мелкие частицы. По мере приближения к скорости $v''_{кр}$ все большая доля частиц взвешивается и наступает полное псевдоожигение.

В реальных условиях поведение слоя во многом зависит от конструктивных особенностей аппаратов. Так, в аппаратах с большим отношением h/D (т. е. в узких и высоких аппаратах) пузыри газа, сливаясь по мере подъема, могут образовать сплошные газовые «пробки», перемещающиеся движущимися «поршнями» псевдоожигенного зернистого материала (рисунок 9.2, д). Сопротивление слоя при этом начинает превышать расчетную величину Δp_c (рисунок 9.2, г, кривая 1).

Напротив, при малых отношениях h/D и наибольших скоростях псевдоожигающего агента в аппаратах с перфорированными газораспределительными решетками могут возникать сквозные каналы, по которым устремляется основная часть газового потока — слой с каналобразованием (рисунок 9.2, е). При этом в зернистом материале образуются застойные зоны, и общее сопротивление слоя оказывается меньше его веса, т. е. меньше расчетной величины (рисунок 9.2, г, кривая 2).

Для характеристики интенсивности перемешивания частиц в кипящем слое используется число псевдоожигения

$$N = \frac{v_{\phi}}{v_{кр}}$$

где v_{ϕ} — фактическая скорость фильтрования воздуха;

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

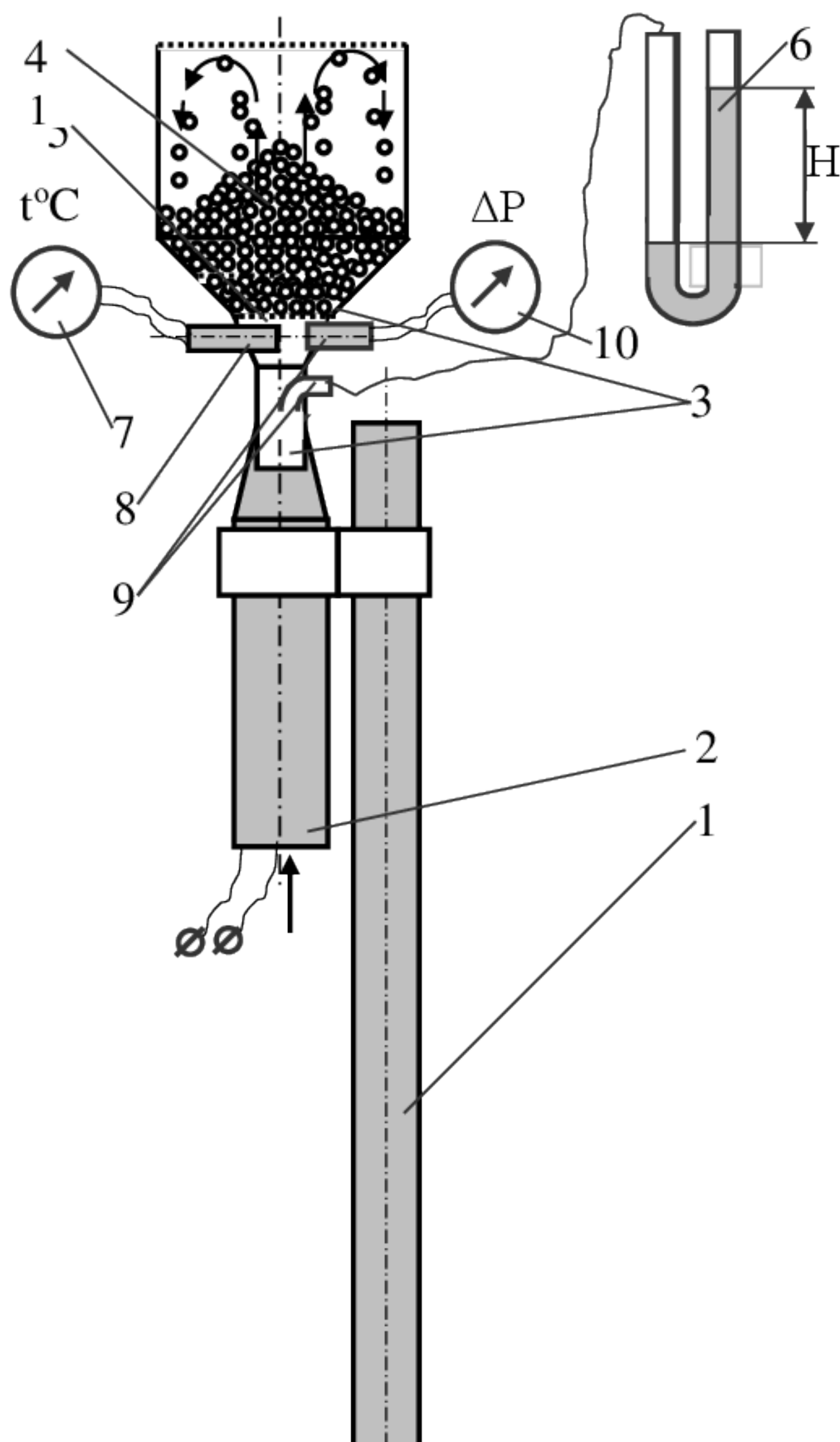
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Описание экспериментальной установки

В ней на опорной стойке (1) укреплен подогреватель воздуха (2), подающий нагретый воздух к сменным сосудам (3), в которых на опорной решетке (5) находится сыпучий продукт (4), продуваемый подогретым воздухом. Установка содержит датчик температуры (8) и регистратор температуры (7), а также датчики давления с регистраторами давления (6) и (10). При работе подогревателя воздуха (2) нагретый воздух продувает слой сыпучего продукта, в результате чего в зависимости от того, какой сменный рабочий орган установлен в качестве сосуда с сыпучим продуктом, реализуется либо псевдооживленный, либо фонтанирующий слой продукта.

- термоанемометр для измерения скорости потока перед входом потока на решетку псевдоожиженного слоя;
- термопары для измерения температуры перед слоем сыпучего материала и на выходе из него.



Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 9.3 – Схема установки

Высота слоя сыпучего материала в цилиндрической трубке измеряется визуально по рискам метрической шкалы, нанесенной на трубке.

Перепад давлений на слое сыпучего материала измеряется водяным манометром, представляющим собой U-образную трубку, заполненную водой.

При проведении экспериментов рекомендуется выбирать следующие значения варьируемых параметров:

- температура воздуха на входе в слой сыпучего материала в интервале 20-30 °С;
- сыпучий материал: пшено любой кондиции, мак, рапс;
- скорость воздуха 1...5 м/с;
- диаметр трубки для реализации псевдооживленного слоя 10...15 мм.

Результаты измерений температуры и скорости воздуха вводятся в компьютер и строятся графики их изменения во времени.

Порядок выполнения работы

В начале выполняются визуальные наблюдения структуры слоя сыпучего материала при реализации различных стадий псевдооживления и фонтанирующего течений. Результаты описываются в отчете о лабораторной работе. В моменты времени, выбранные по указанию преподавателя, рассчитывается пористость материала.

По результатам одновременных измерений перепада давлений на слое материала ΔP и скорости потока V , измеренной с помощью компьютера, строится зависимость $\Delta P(V)$ и из нее находятся характерные скорости потока воздуха: критическую или скорость начала псевдооживления и скорость уноса материала потоком воздуха. В наших экспериментах аналог кривой сушки можно строить в координатах «Влажность отходящего воздуха-время». Преимущество этой кривой в том, что она может строиться автоматически компьютером без прерывания сушки на взвешивание материала. С уменьшением содержания влаги в материале влажность отходящего воздуха также уменьшается и потому одна кривая (любая) соответствует другой и может тарироваться по ней.

Обработка экспериментальных данных

1. Определяем число Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot d_c^3 \cdot (\rho_c - \rho_s) \cdot \rho_s}{(\mu_s)}$$

2. Определяем число Рейнольдса для начала оживления:

$$Re_n = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}};$$

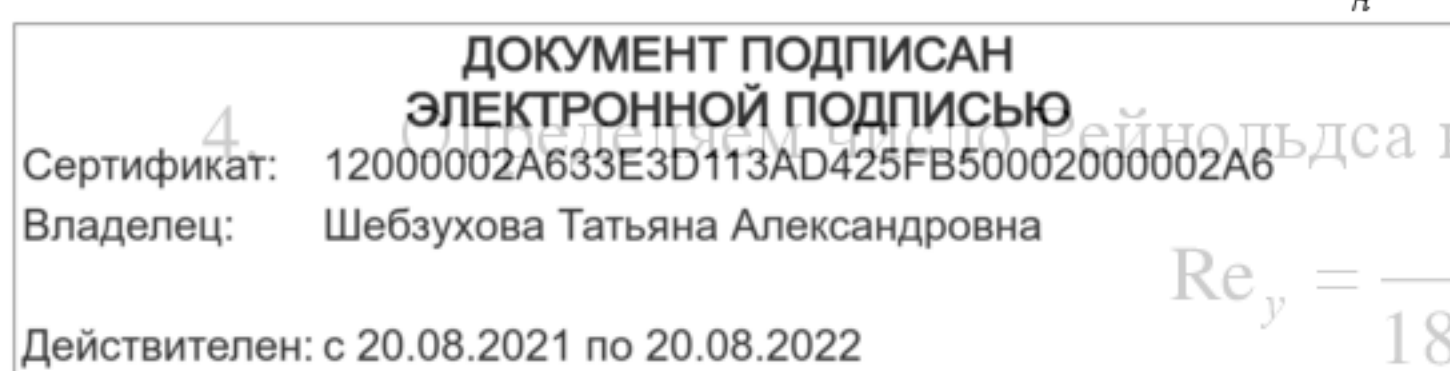
3. Определяем скорость начала оживления:

$$\omega_n = \frac{Re_n \cdot \mu_s}{d_c \cdot \rho_s};$$

4. Определяем число Рейнольдса начала уноса частиц:

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}};$$

5. Определяем скорость начала уноса частиц:



$$\omega_y = \frac{Re_y \cdot \mu_c}{d_q \cdot \rho_c};$$

6. Определяем относительную погрешность между экспериментальными и вычисленными величинами:

$$\Delta_1 = \frac{\omega - \omega_{y.э}}{\omega_y} \cdot 100\%; \quad \Delta_2 = \frac{\omega_y - \omega_{y.э}}{\omega_y} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы

1. Что понимают под псевдоожижением?
2. Какое состояние псевдоожижения называют «кипящим слоем»?
3. Дать характеристику различных стадий псевдоожижения.
4. Что такое скорость фильтрования и критическая скорость фильтрования?
5. Как изменяется гидродинамическое сопротивление псевдоожиженного слоя с увеличением скорости фильтрования?
6. Какая зависимость существует между порозностью псевдоожиженного слоя и числом псевдоожижения?
7. Как влияет псевдоожижение на интенсивность процесса нагревания сыпучего материала?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа № 13

Тема: Исследование комбинированного теплообмена горизонтальной трубы с окружающей средой в условиях свободной и вынужденной конвекции

Цель работы: 1. выявить различные механизмы переноса тепла, расчетное и экспериментальное определение основных характеристик комбинированного теплообмена: количества тепла, передаваемого от ее поверхности тепловым излучением и конвекцией, коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы и степени черноты ее поверхности;
2. Определить коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала.

Приборы и материалы: лабораторная установка, цифровой вольтметр, амперметр, цифровой мультиметр, хромель-копелевые термопары, лазерный инфракрасный термометр.

Краткие теоретические сведения

Существует три основных механизма переноса тепла, каждый из которых имеет свою физическую природу и описывается своими законами и уравнениями. Это - теплопроводность, тепловая конвекция и тепловое излучение.

В практике все эти механизмы чаще всего действуют одновременно. Если они могут быть каким либо образом дифференцированы и определены, то в дальнейшем за счет различных технических средств, возможно, скорректировать в нужном направлении действия того или иного механизма переноса тепла. При этом независимо от механизма переноса, тепловой поток всегда направлен от более нагретого тела к менее нагретому телу и основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена, является разность температур.

В настоящей работе на примере нагретой горизонтальной трубы необходимо определить количество тепла, выделяемого внутренним источником - трубчатым электронагревателем, установленным внутри трубы; вычислить плотность теплового потока, передаваемого от нагревателя через цилиндрический слой теплоизоляционного материала к ее наружной поверхности и рассеиваемого тепловым излучением и конвекцией в окружающую среду. В условиях стационарного теплообмена и отсутствия утечек тепла по узлам крепления трубы ее тепловой баланс выражается соотношением:

$$\dot{Q}_{\Sigma} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_L \quad (1)$$

где $\dot{Q}_{\Sigma}$ – тепловая мощность, выделяемая электронагревателем, $\dot{Q}_K$ – тепловой поток, отдаваемый поверхностью трубы конвекцией, $\dot{Q}_L$ – тепловой поток, отдаваемый излучением.

Различают свободную и вынужденную конвекцию. Вынужденная конвекция возникает под действием внешних сил при движении тела в неподвижной среде или

при обтекании его сплошным потоком жидкости или газа. В отличие от этого свободная или естественная конвекция возникает исключительно за счет разности температур тела и окружающей среды и локализована в небольшой области вокруг тела, называемой пограничным слоем. Жидкость или газ, нагреваясь или охлаждаясь в этом слое, изменяет свою плотность и за счет действия выталкивающих Архимедовых сил начинает двигаться, интенсифицируя теплообмен по сравнению с чистой теплопроводностью. Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, как правило, на несколько порядков ниже, чем при вынужденной. Измерив напряжение U и силу тока I , температуры наружной поверхности $t_{ст}$ и окружающей среды - t_0 , можно экспериментально определить коэффициент теплоотдачи горизонтальной трубы. Дополнительно в настоящей работе он рассчитывается и по критериальным соотношениям, полученным на основании теории подобия.

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n,$$

где Nu - безразмерное число (критерий) Нуссельта, характеризующее отношение теплового потока, отдаваемого поверхностью тела конвекцией к тепловому потоку, передаваемому теплопроводностью через слой среды толщиной, равной диаметру трубы.

Gr - критерий Грасгофа, равный отношению выталкивающей силы, действующей на нагретые объемы жидкости или газа к силам вязкости.

Pr - критерий Прандтля, характеризующий соотношение вязкости и температуропроводности среды.

В таблицах 10.1 и 10.2 приводятся необходимые данные для расчета критериев подобия Nu , Gr , Pr .

Таблица 10.1 - Теплофизические свойства сухого воздуха при $P=0,101$ МПа

$t_0, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$c, \text{Дж/г}\cdot\text{К}$	Pr
0	1,293	0,0244	$13,2 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,707
20	1,205	0,0259	$15,1 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,703
40	1,128	0,0267	$17,0 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,699
60	1,029	0,0290	$18,0 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,696
80	1,000	0,0305	$21,1 \cdot 10^{-6}$	1,009	0,692
100	0,946	0,0321	$23,1 \cdot 10^{-6}$	1,009	0,690

Таблица 10.2. Значения C и n критериального уравнения $Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$

Режим свободной конвекции	$(Gr \cdot Pr)$	C	n
Пленочный	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5	0
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Турбулентный Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	$5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
	$2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
	$1 \cdot 10^{15}$	0,135	0,33

Если дополнительно измерить температуру на поверхности нагревателя - t_n , то по формулам стационарной теплопроводности бесконечного цилиндра можно также определить коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) теплоизоляционного материала, находящегося между электрическим нагревателем и наружной поверхностью трубы.

Описание экспериментальной установки

Рабочая часть установки представляет собой модель теплоизолированного трубопровода и выполнена в виде трубы с наружным диаметром 34 мм, длиной 360 мм, внутри которой установлен трубчатый нагреватель диаметром 20 мм (рисунок 10.1). Пространство между нагревателем и наружным кожухом из полированного алюминия заполнено теплоизолирующим материалом. Для исключения утечек тепла по торцам трубы они заизолированы, а сама труба вывешена на точечных опорах. Электрическое напряжение U , подаваемое на нагреватель, регулируется с помощью автотрансформатора и измеряется цифровым вольтметром. Величина тока I - измеряется с помощью амперметра. В качестве датчиков температуры используются хромель-копелевые термопары, ЭДС которых измеряется цифровым мультиметром. Его показания проградуированы в градусах Цельсия. Степень черноты поверхности определяется сравнением ее температур, измеренных термопарой и лазерным инфракрасным термометром.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, таблицы 10.1- 10.2 для расчетного определения коэффициента теплоотдачи и таблицу 10.3 для записи результатов измерений и вычислений.

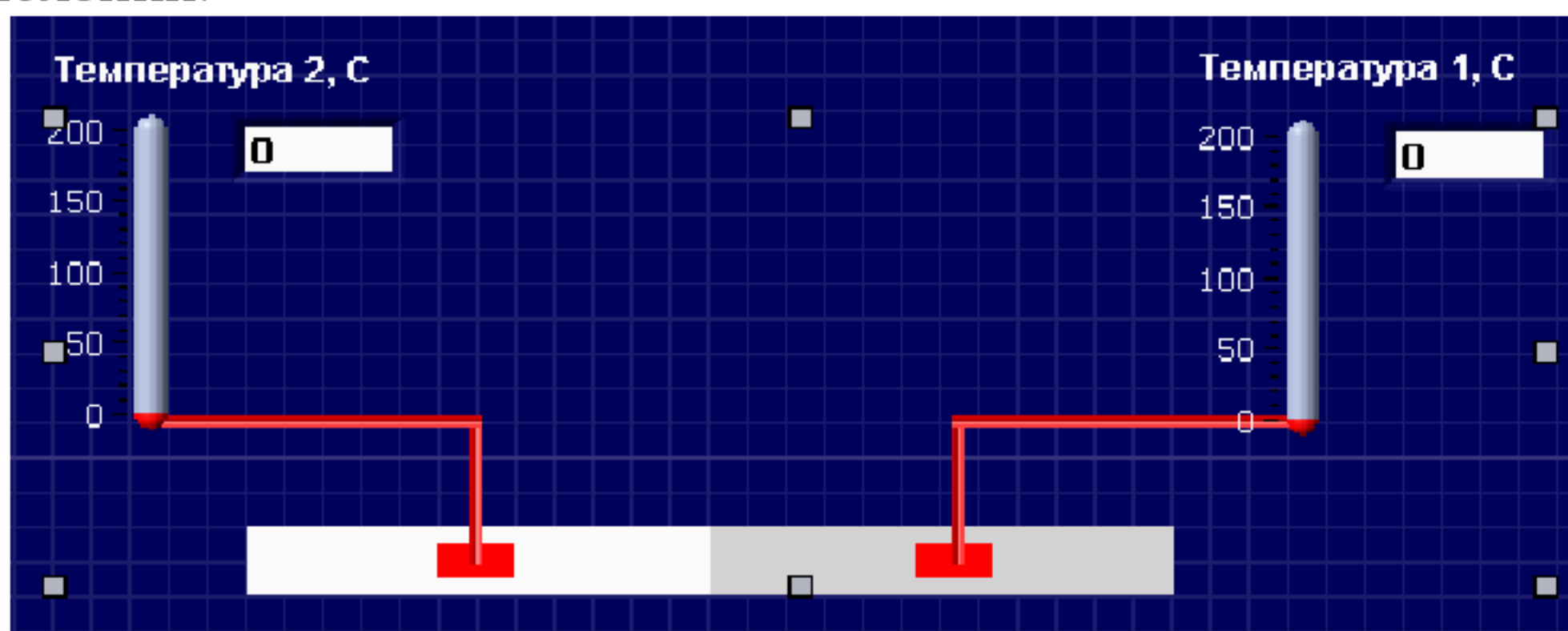


Рисунок 10.1 Схема лабораторной установки

2. При достижении стационарного режима (не менее 20 минут после включения нагревателя) произвести измерения величин I , U , t_n , $t_{ст}$ и t_0 . Результаты занести в таблицу 10.3. Обратить внимание на характер изменения температур t_n , $t_{ст}$ в процессе нагревания трубы.

3. Вычислить значения Q_{Σ} и Q_L по формулам (1- 9) и занести в таблицу 3 значения Q_{Σ} , Q_L и t_0 .
4. Перенести в таблицу данные, полученные для других значений I , U , t_n , $t_{ст}$ и t_0 .

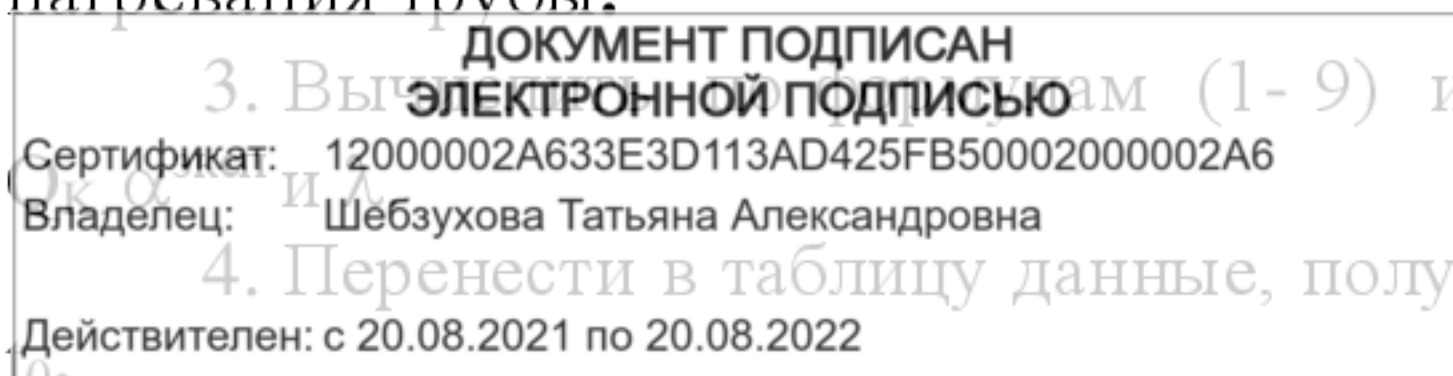


Таблица 10.3 - Результаты измерений и вычислений

N, п/п	U, В	I, А	t _н , °С	t _{ст} , °С	t ₀ , °С	Q _Σ , Вт	Q _л , Вт	Q _к , Вт	α ^{эксп} , Вт/ м²К	λ, Вт/м*К	α ^{расч} , Вт/ м²К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Обработка экспериментальных данных

- 1) по результатам выполненных измерений рассчитывается количества тепла, выделяемое электронагревателем

$$Q_{\Sigma} = I \cdot U, \quad (2)$$

- 2) по закону Стефана-Больцмана рассчитывается поток тепла, отдаваемый поверхностью трубы в окружающую среду тепловым излучением

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{см}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где ε - степень черноты наружной поверхности трубы (для нержавеющей стали $\varepsilon = 0,43$; для масляной краски $\varepsilon = 0,78$),

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ - коэффициент теплового излучения абсолютно черного тела,

$F = \pi \cdot d \cdot L$ - площадь поверхности трубы, (м²),

D_2 - ее наружный диаметр, (м),

L - длина трубы, (м),

$T_{\text{ст}}$, T_0 - температура наружной стенки трубы и окружающей среды, (К).

- 3) поток тепла, отдаваемый конвекцией, определяется как разность

$$Q_k = Q_{\Sigma} - Q_{\text{л}}, \quad (4)$$

- 4) величина коэффициента теплоотдачи $\alpha^{\text{эксп}}$ рассчитывается по формуле

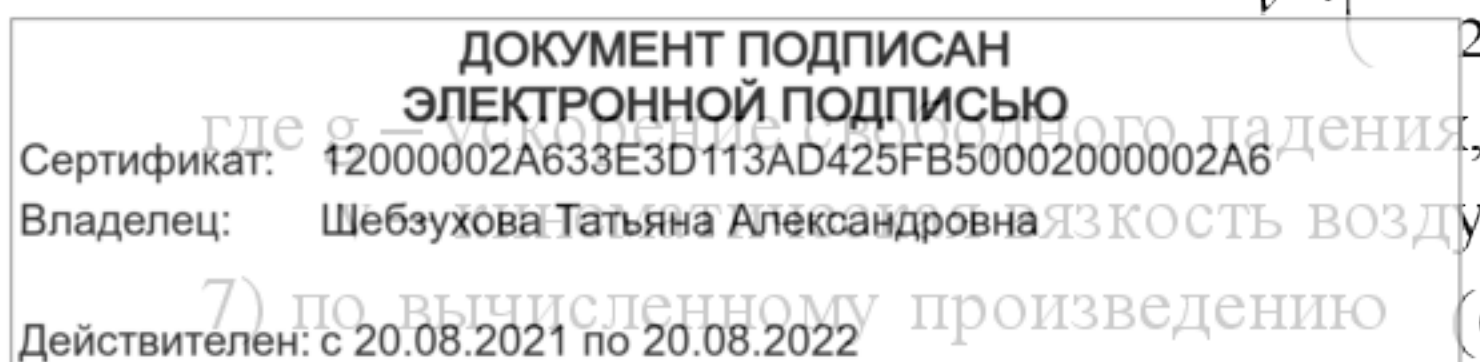
$$\alpha^{\text{эксп}} = \frac{Q_k}{F \cdot (t_{\text{см}} - t_0)}, \quad (5)$$

здесь $t_{\text{ст}}$, t_0 - температура наружной стенки трубы и окружающей среды, (°С).

- 5) полученные значения $\alpha^{\text{эксп}}$ заносятся в таблицу и строится график зависимости коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы при свободной конвекции от разности температур ($t_{\text{ст}} - t_0$).

6) расчетное значение коэффициента теплоотдачи может быть определено на основе приведенного ранее критериального уравнения, постоянные величины C и n которого, зависят от режима свободной конвекции. Они определяются в зависимости от произведения критерия Грасгофа и критерия Прандтля. Значение критерия Прандтля для заданной температуры наружной поверхности трубы можно взять из таблицы 10.1, а значение критерия Грасгофа, рассчитывается по формуле

$$Gr = g \cdot d^3 \cdot \frac{t_{\text{см}} - t_0}{\nu^2 \cdot \left(\frac{t_{\text{см}} + t_0}{2} + 273 \right)}, \quad (6)$$



где $\alpha^{\text{расч}} = C \cdot Gr^n$ - коэффициент теплоотдачи, (Вт/м²К), ν - коэффициент вязкости воздуха (таблица 10.1)

- 7) по вычисленному произведению $(Gr \cdot Pr)$, пользуясь таблицей 10.2, определить режим свободно конвективного течения воздуха у нагретой трубы и коэффици-

циенты C и n критериального уравнения (7) и вычислить значение критерия Нуссельта

$$Nu = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n, \quad (7)$$

8) по вычисленному критерию Нуссельта рассчитать значение $\alpha^{\text{расч}}$

$$\alpha^{\text{расч}} = \frac{\lambda}{d_2 \cdot Nu}, \quad (8)$$

здесь $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха (таблице 10.1).

Нанести $\alpha^{\text{расч}}$ на график $\alpha = F(t_{\text{ст}})$. Сравнить между собой $\alpha^{\text{расч}}$ и $\alpha^{\text{эксп}}$.

9) определить коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) теплоизоляционного материала, находящегося между электрическим нагревателем и наружной поверхностью трубы

$$\lambda = \frac{Q_{\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{d_2}{d_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{\text{ст}} - t_0)}, \quad (9)$$

10) Сделать выводы по работе, которые должны содержать: краткое описание содержания выполненной работы и основные характеристики экспериментальной установки; численные значения экспериментально определенных показателей; оценку их изменения от режимных параметров; сравнения с данными, полученными расчетным путем, и оценку возможных ошибок измерения.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются друг от друга различные механизмы переноса тепла?
2. Какие технологические процессы в промышленности сопровождаются нестационарной теплопроводностью, свободной конвекцией, тепловым излучением?
3. Как изменяется теплопроводность различных тел при повышении температуры?
4. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
5. Почему для расчета конвективного теплообмена используются критериальные зависимости? Каков физический смысл критериев подобия, используемых в данной работе?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа № 14

Тема: Испытание теплообменного аппарата

Цель работы: 1. Закрепить сведения о физической сущности переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному;
2. Провести анализ факторов, влияющих на оптимизацию теплопередачи процесса;
3. Приобрести навыки экспериментального исследования теплообменных аппаратов.

Приборы и материалы: лабораторная установка, расходомер, мерный бак, секундомер.

Краткие теоретические сведения

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смесительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку, которая называется поверхностью нагрева теплообменного аппарата.

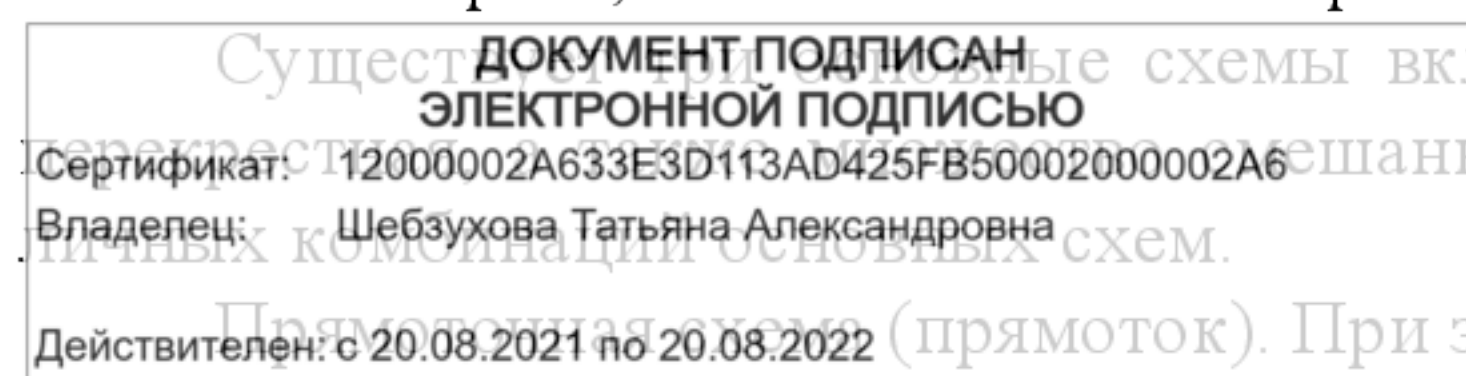
Интенсивность работы теплообменного аппарата характеризуется количеством тепла, передаваемого через единицу поверхности нагрева в единицу времени. Эта величина зависит от физических свойств теплоносителей (вязкость, теплопроводность, плотность, теплоемкость), от режима их движения, от конструктивных особенностей аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева), от средней по поверхности нагрева разности температур между греющей и обогреваемой средой.

При расчете теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчетную формулу среднего логарифмического температурного напора Δt . Влияние остальных факторов учитывают введением коэффициента теплопередачи k , который по физическому смыслу представляет собой количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности нагрева при разности температур между теплоносителями в один градус. Формула для расчета количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате за единицу времени, имеет вид:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t.$$

Значение среднего логарифмического напора Δt зависит от начальных t_1 и t_3 и конечных t_2 и t_4 температур теплоносителей, а также от схемы включения теплообменного аппарата, т.е. от взаимных направлений движения теплоносителей.

Существуют три основные схемы включения: прямоточная, противоточная и смешанная. В прямоточной схеме движения теплоносителей совпадают, в противоточной – противоположны, в смешанной – частично совпадают. В результате разности температур на входе и выходе аппарата получаются различные значения среднего логарифмического напора. При этой схеме движения горячий и холодный теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении так, что на входе в аппарат тепло передается от горячего теплоносителя к холодному при



относительно большой разности температур. На выходе из аппарата тепло передается от остывшего горячего теплоносителя к холодному при меньшей разности температур. Противоточная схема (противоток). При этой схеме движения теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в противоположных так, что входящий в аппарат горячий теплоноситель отдает тепло уже подогретому теплоносителю.

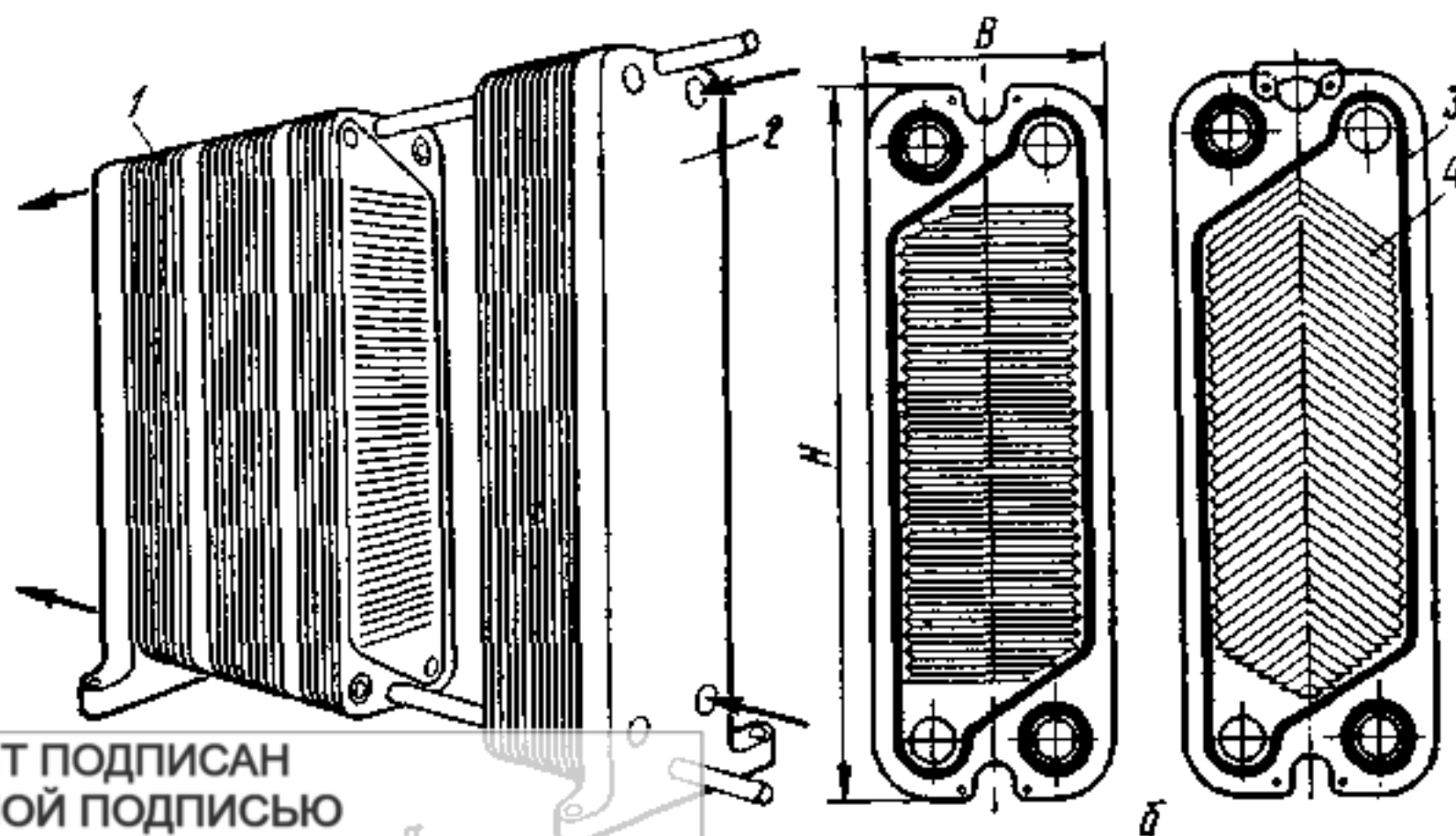
Для определения коэффициента теплопередачи требуется количество тепла, переданного за единицу времени в теплообменном аппарате, среднюю разность температур Δt между горячим и холодным теплоносителями и размер поверхности F . Количество тепла определяется по расходу теплоносителей, их теплоемкости и изменению их температуры в теплообменном аппарате. В идеальном аппарате, работающем без теплообмена с окружающей средой, количество тепла, отданное горячим теплоносителем Q_1 , должно равняться количеству тепла Q_2 , полученному холодным теплоносителем:

$$Q_1 = Q_2 = k \cdot F \cdot \Delta t; \quad K = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}.$$

где Δt – средний логарифмический напор, определяется по температурам в зависимости от движения теплоносителей.

Пластинчатые теплообменные аппараты используют в качестве пастеризационно-охладительных агрегатов. Основным элементом этих теплообменников являются пластины 1, отштампованные на станине 2, образуется своеобразный «пакет». Поверхность пластин имеет выступы 4, которые образуют многочисленные каналы между пластинами. По этим пластинам тонкими слоями протекают жидкости. Слои жидкостей чередуются, поэтому теплообмен у каждого слоя жидкости происходит через обе ограничивающие поверхности. Уплотнение пластин обеспечивается резиновыми прокладками 3, приклеенными по периферии. Зачастую пластины komponуются в группы. Группа пластин, образующих систему параллельных каналов, в которых данный теплоноситель движется только в одном направлении, составляет пакет. Такой пакет подобен пучку одного хода многоходового кожухотрубного теплообменника.

Различная компоновка пластин в группах, групп в пакетах и пакетов на раме приводит к большому разнообразию компоновочных схем, наилучшим образом приспособленных для выполнения определенных технологических функций.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Рисунок 1.1. Пластинчатый теплообменник:
а — общий вид; б — пластины; 1 — пластины, 2 — станина, 3 — резиновые прокладки, 4 — выступы пластин
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Аппараты могут быть как разборные, состоящие из отдельных пластин, так и полуразборные, в которых пластины попарно сварены. В условном обозначении компоновочной схемы указывают: в числителе (сумма) – число пакетов для горячего теплоносителя, в знаменателе – то же, для холодного теплоносителя. Каждое слагаемое означает число параллельных пакетов в каждом пакете (см. рисунок 11.2).

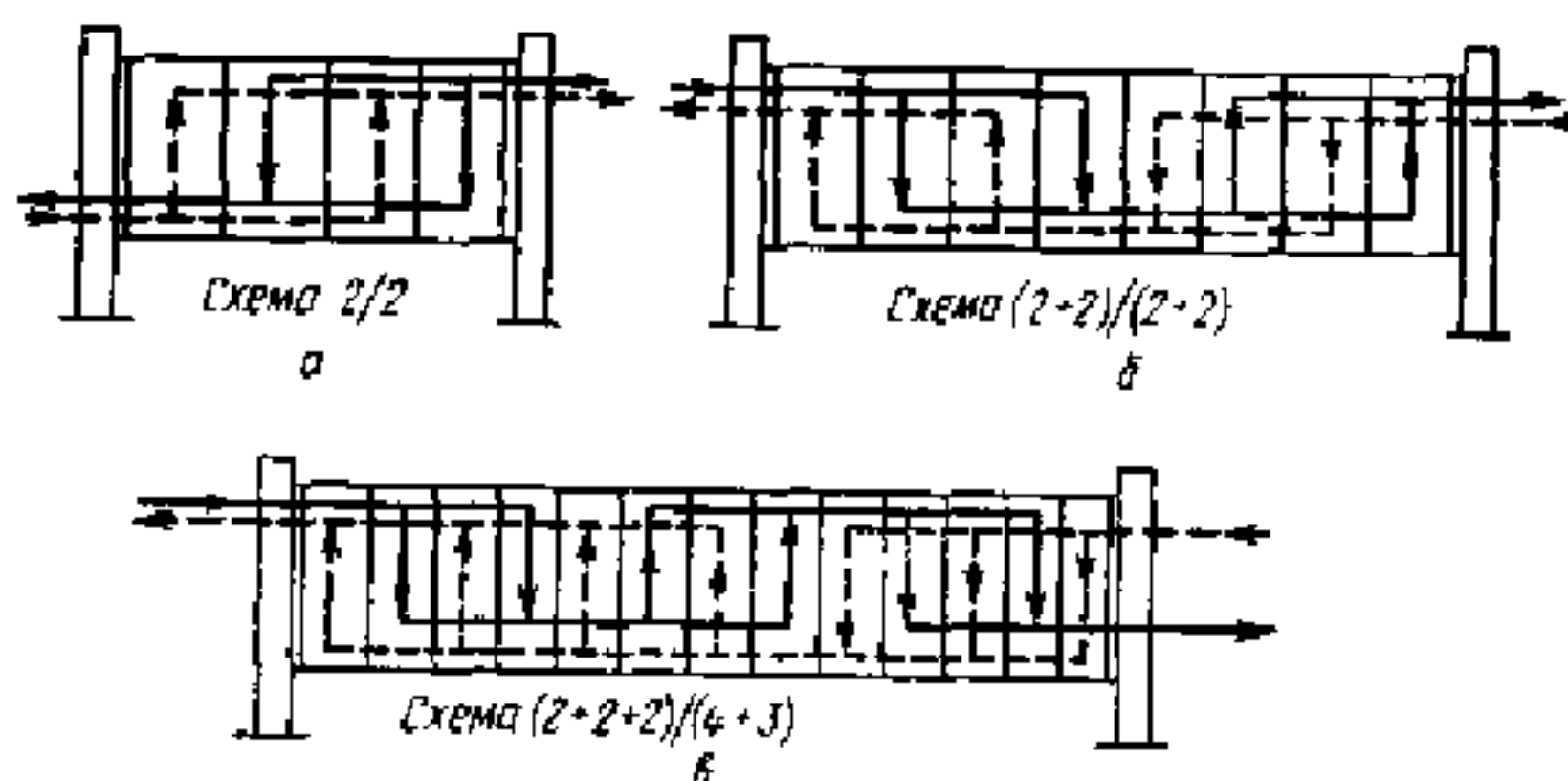


Рисунок 11.2 - Примеры компоновочных схем пластинчатых теплообменников: пятипакетная схема (три пакета для горячего теплоносителя, два – для холодного)

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (Рисунок 11.3) состоит из котла, нагревающего воду до необходимой температуры, которая регулируется переключателем. Теплая вода по трубопроводу насосом подается в пластинчатый теплообменник, поверхность теплообмена которого определяется по формуле:

$$F = F_1 \cdot (n - 1) - F_1 .;$$

где F_1 – площадь поверхности одной пластины, м^2 ;

n – число пластин в теплообменнике, шт.

По второму контуру теплообменника подается холодная вода из центрального водоснабжения. Для измерения температур теплоносителей служат термодары 1, 2, 3, 4, установленные на входе и выходе из пластинчатого теплообменника. Объем горячей воды измеряется расходомером, холодной – мерной колбой.

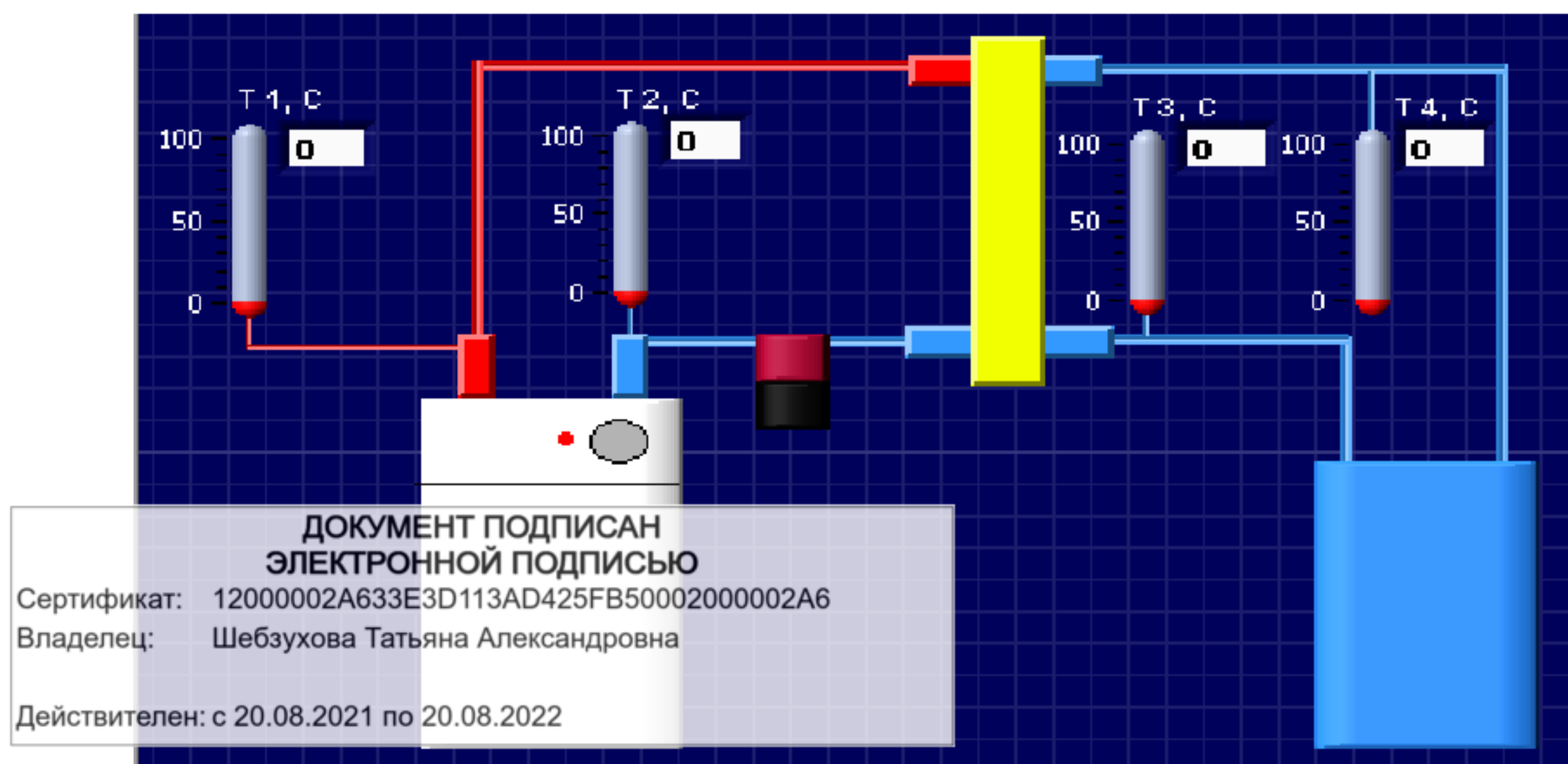


Рисунок 11.3 – Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов.
2. Включить установку и дать прогреться котловой воде.
3. После включения холодной воды измеряют расход горячего и холодного теплоносителя и время проведения опыта.
4. Изменение температур теплоносителей в процессе фиксируется датчиками. Результаты измерений выводятся на компьютер.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить расход горячего и холодного теплоносителей:

$$G = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3 / \text{с};$$

где V – объем теплоносителя, м^3 ;
 τ – время проведения опыта, с.

2. Определение количества получаемой и отдаваемой теплоты:

$$Q_1 = G_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot (t_1 - t_3);$$

$$Q_2 = G_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot (t_4 - t_2),$$

где $\rho_1 = \rho_2$, $\text{кг}/\text{м}^3$ – плотности теплоносителей;
 $c_1 = c_2$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – удельная массовая теплоемкость воды при определяющей температуре $t_m = 0,5 \cdot (t_1 + t_3)$.

3. Определить разность температур на входе и выходе из теплообменника:

$$\Delta t_n = t_1 - t_3; \quad \Delta t_k = t_4 - t_2.$$

4. Средний логарифмический температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}};$$

5. Определяем коэффициент теплопередачи по формуле:

$$K = \frac{Q_2}{F \cdot \Delta t},$$

6. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Результаты измерений и вычислений

№, п/п	Расход горячего теплоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$	Расход холодного теплоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$	Количество получаемой теплоты, кДж	Количество отдаваемой теплоты, кДж	Разность температур на входе в теплообменник, Δt_n	Разность температур на выходе из теплообменника, Δt_k	Средний логарифмический напор, $^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: 2 Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Контрольные вопросы

1. Для каких целей предназначены теплообменные аппараты?
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков его физический смысл?
3. Какие величины влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. В чем заключается преимущество противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчете теплообменника можно пользоваться средним арифметическим температурным напором?
7. Дать характеристику пластинчатому теплообменнику.
8. Расскажите схему лабораторной установки и принцип ее действия.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа № 15

Тема: Исследование различных способов сушки пищевых материалов

Цель работы: 1. Повысить уровень знаний о сушке;
2. Экспериментально построить кривые сушки при различных способах ее организации: конвективной, сушке в поле СВЧ-излучения, сушке в поле инфракрасного излучения.

Приборы и материалы: СВЧ-печь, термопара, регистратор температуры, измеритель массы, датчик влажности, компьютер.

Краткие теоретические сведения

Сушка – это процесс разделения однородных или неоднородных систем, заключающийся в удалении влаги с использованием тепловых и диффузионных явлений [3]. При сушке влага материала передается сушильному агенту и вместе с ним удаляется из рабочей зоны сушилки.

При феноменологическом описании процесса сушки в качестве обобщенной действующей силы принимают разность концентраций влаги ΔC в фактическом C и равновесном C_p состояниях системы

$$\Delta C = C - C_p.$$

Фактическая ее концентрация C изменяется в процессе сушки, а равновесная C_p является константой и определяется как состоянием продукта, так и влажностью окружающей среды. При помощи воздуха с определенной влажностью невозможно удалить из материала всю влагу.

При конвективной сушке влага перемещается от центра материала к поверхности, с которой она удаляется сушильным агентом. Это – диффузионный процесс; его движущей силой является разность концентраций влаги на единице длины окружающей среды ($\frac{dC}{dX}$). Поэтому феноменологическое выражение для влагопереноса m_w можно записать в виде:

$$m_w = -D_1 \cdot F \cdot \frac{dC}{dX}, \text{ кг/с,}$$

где F – омываемая поверхность материала, m^2 ;

D_1 – постоянная, называемая также феноменологическим коэффициентом или коэффициентом диффузии.

Влага, находящаяся в порах материала, и осмотически связанная влага мигрируют к поверхности в жидком виде, а адсорбционно-связанная – в виде пара.

Процесс сушки включает нагревание сушильного агента и приведение его в соприкосновение с высушиваемым материалом в сушильной камере. Это вызывает отъем влаги с поверхности материала, который включает три этапа:

1) перемещение пара от поверхности материала сушильному агенту, сопровождающаяся осушением поверхностных слоев материала и переходом пара в окружающую среду;

2) перемещение пара в окружающей среде;

3) диффузия влаги из глубины тела к поверхности.

Первый из этих процессов побуждает два других как следствие. Испарение влаги возможно как внутри тела, так и на его поверхности. В обоих случаях дальнейшее движение испаренной влаги происходит от поверхности.

На поверхности материала образуется воздушно-паровой слой, который находится в равновесии с влагой материала; он является насыщенным при температуре материала. Движущая сила диффузии влаги с поверхности материала в окружающую среду – разность парциальных давлений (ΔP) водяного пара в пограничном слое (P_H) и в окружающей среде (P_B):

$$\Delta P = P_H - P_B.$$

Парциальное давление пара в пограничном слое материала называют давлением насыщенного пара.

Феноменологическая зависимость массового расхода диффундирующего пара (m) от этих параметров имеет вид:

$$m = B_1 \cdot (P_H - P_B) \cdot F, \text{ кг} \cdot \text{Па} / \text{с},$$

где $B_1 = \text{Const}$,

или в величинах относительных давлений:

$$m = B \cdot \frac{P_H - P_B}{P_{\text{бар}}} \cdot F, \text{ кг} \cdot \text{Па} / \text{с},$$

где $B = \text{Const}$,

$P_{\text{бар}}$ – барометрическое давление окружающей среды, Па.

Последнее выражение называется законом Дальтона для испарения с влажной поверхности. Постоянная B в нем равна $0,007 \text{ кг} / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при скорости обдувающего воздуха до $0,58 \text{ м} / \text{с}$ и $0,011$ при скорости обдува $1,57 \text{ м} / \text{с}$.

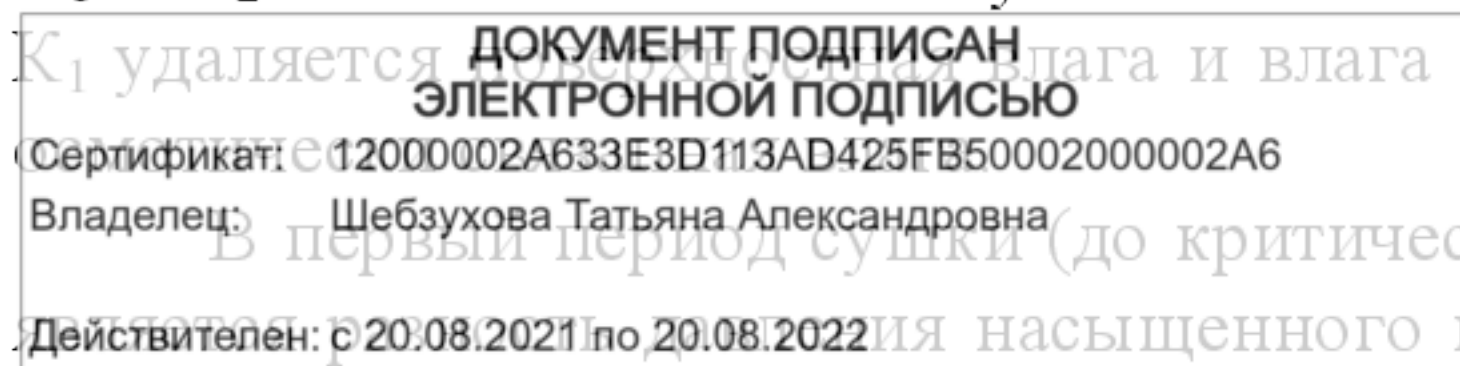
Расход влаги должен быть равен потоку влаги, подведенному изнутри к поверхности. Изменение этого потока влаги или связанных с ним величин во времени называют кривыми сушки. На рисунке 12.1а изображена кривая сушки, а на рис. 12.1б – производная по времени от нее, или кривая скорости сушки.

В начале сушки материал подогревается, и скорость массового потока удаляемой влаги возрастает от нуля до некоторой постоянной величины. В этот период удаляется влага, механически связанная с материалом (поверхностная и капиллярная). Процесс продолжается до т. K_1 на кривой скорости сушки. В этот период температура материала, покрытого влагой, равна температуре мокрого термометра. Во втором периоде скорость сушки уменьшается. В этот период удаляется влага, более прочно связанная с материалом, в частности осмотическая, адсорбированная химически связанная.

Зависимости изображенной на рисунке 12.1б, соответствуют кривые: 1 – для грубопористых материалов; 2 – для тканей, кожи, макаронного теста; 3 – для пористых керамических материалов; 4 – для сухарей; 5 – для глины.

На кривой скорости сушки можно видеть одну или две критические точки K_1 и K_2 . Обе они соответствуют изменению механизмов удаления влаги: до точки

K_1 удаляется влага и влага пор, после точки K_2 – адсорбционно или (до критической точки K_1) движущей силой процесса пара или давления в пограничном слое материала и парциального давления пара в окружающей среде ($P_H - P_B$). Скорость



сушки в этот период определяется приведенной выше феноменологической зависимостью Дальтона. В этот период скорость диффузии не влияет на скорость сушки.

Во второй период сушки давление паров вблизи поверхности материала ниже

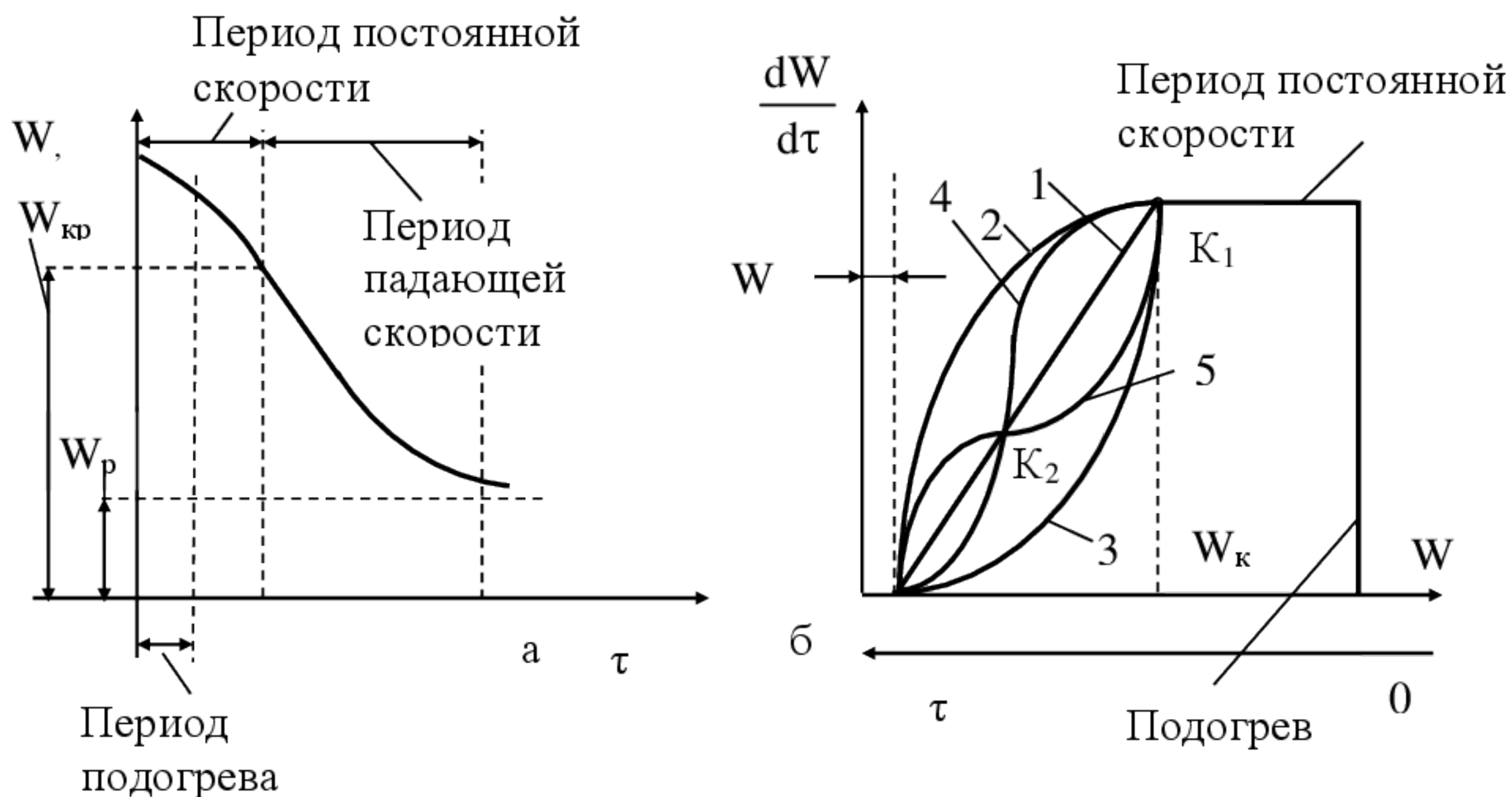


Рисунок 12.1 - Кривые сушки (а) и скорости сушки (б)

$W_{кр}$ – критическая влажность, W_p – равновесная влажность

1 – для грубопористого материала; 2 – для ткани, коже; 3 – для пористой керамики; 4 – для сухарей; 5 – для глины

равновесного, и определяющее влияние на скорость сушки оказывает диффузия влаги в нем. Движущей силой процесса в этот период можно считать разность фактического и равновесного влагосодержаний высушиваемого материала ($W - W_p$). Тогда феноменологическая зависимость для скорости процесса примет вид:

$$\frac{dW}{d\tau} = K \cdot (W - W_p); K = \text{Const.}$$

Начальное влагосодержание для этого периода сушки соответствует критическому $W_{к1}$, а конечное ($W_{к2}$) определяется относительной влажностью сушильного агента. Проинтегрировав это уравнение в указанных пределах, получим:

$$\ln \frac{W_{к1} - W_p}{W_2 - W_p} = k \cdot \tau_2,$$

где τ_2 – продолжительность второго периода сушки.

Формула определяет экспоненциальную зависимость влажности от времени τ .

Коэффициент "k" определяется обработкой экспериментальных данных.

Обычно он представляется следующей аппроксимирующей зависимостью для сложного последовательно протекающего процесса внешнего и внутреннего влагопереноса:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$K = \frac{1}{R}$$

$$\frac{1}{\beta} + \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{R}{\alpha}$$

где R – определяющий геометрический размер высушиваемого тела (для пластины – половина толщины, для шара – радиус), м;

β – коэффициент внешнего влагообмена, м/ч;

α –коэффициент потенциалопроводности внутреннего массопереноса, м²/ч.

Наиболее интересные явления при сушке связаны с явлением термодиффузии. Термодиффузия заключается в перетекании влаги в глубину высушиваемого материала за счет разности температур его поверхностных и глубинных слоев. При повышении температуры сушильного агента термодиффузия усиливается.

Удаление влаги, мигрировавшей в глубину высушиваемого изделия, затруднено. Вследствие этого попытки ускорить сушку повышением подогрева объекта сушки зачастую приводят к миграции влаги в глубину, высушиванию и подгоранию поверхностных слоев изделий. При последующем охлаждении поверхностные слои изделия вновь увлажняются вследствие обратной миграции влаги диффузией.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 12.2.

Высушиваемый материал (4) подвешивается на весах в СВЧ-печи (6), и подвергается воздействию СВЧ-излучения от источника электромагнитных волн (3), инфракрасному излучению от нагревателя-гриля (2); конвективному тепловому воздействию теплого воздуха, поток которого создается вентилятором (9) и подогревается нагревателем гриля (2). При этом он сушится, что регистрируется с помощью весов (6), а также по уменьшению влажности отходящего воздуха с помощью датчика влажности (7).

В установке используются следующие измерительные средства:

- термопара для измерения температуры воздушного потока;
- весы для взвешивания высушиваемого продукта;
- датчик влажности воздуха на выходе из установки.

Все датчики заведены в компьютерную систему измерений, их показания обрабатываются в среде LabVIEW и регистрируются на графиках в этой же языковой среде.

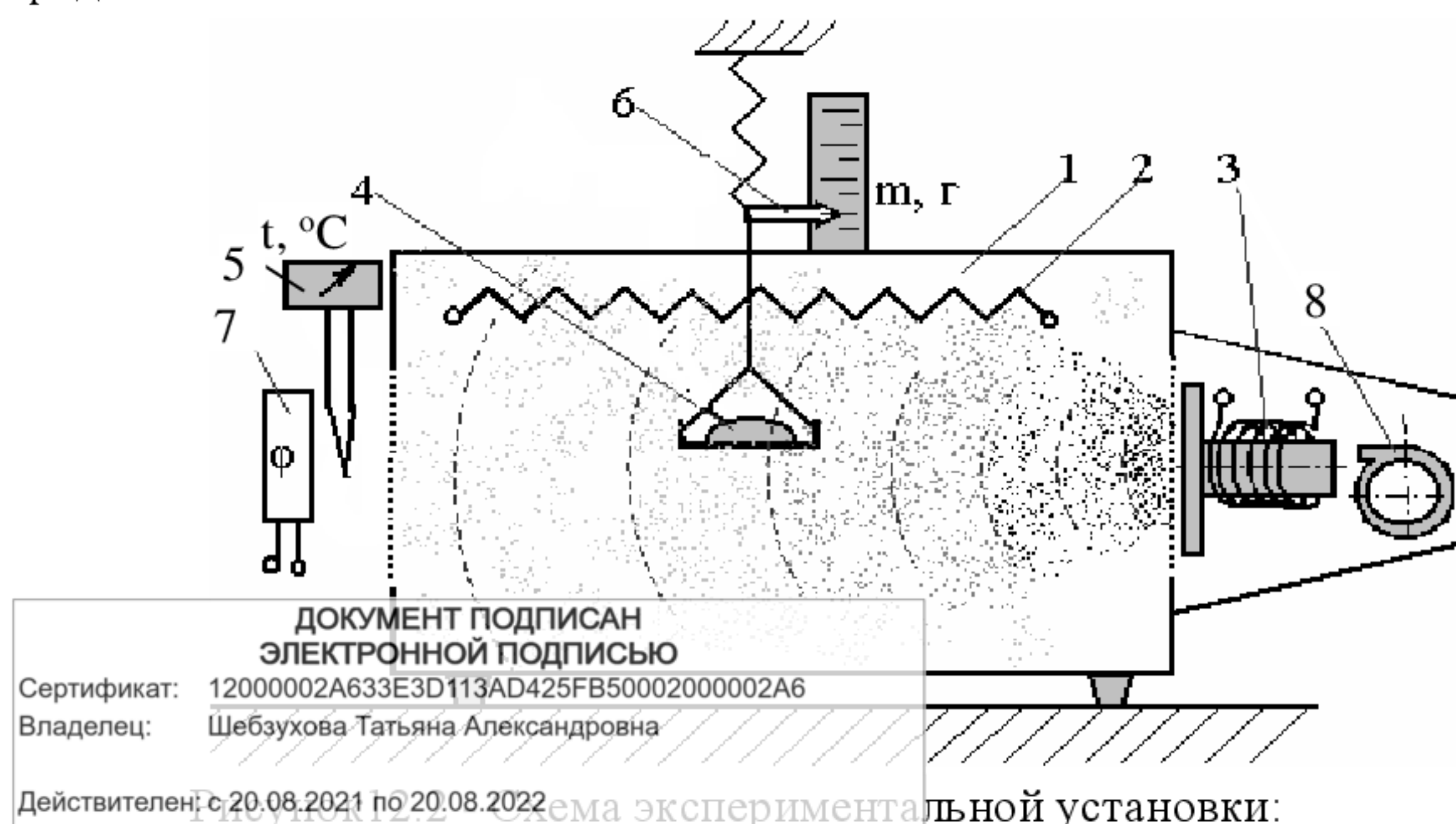


Рисунок 12.2. Схема экспериментальной установки:

1 – СВЧ-печь; 2 – ИК-нагреватель; 3 – источник СВЧ-излучения;
4 – экспериментальный материал; 5 – термопара и регистратор температуры; 6 – измеритель массы; 7 – датчик влажности;
8 – вентилятор

Порядок выполнения работы

Высушиваемый материал (4) помещается на чашу весов (6) и подвергается высушиванию одним из пяти возможных способов. Кривая сушки (изменение массы материала по времени) регистрируется компьютером вместе с показаниями всех других датчиков. Особое внимание в экспериментах обращается на демонстрацию процесса термодиффузии. Это реализуется сравнением результатов измерений параметров сушки в экспериментах, различающихся температурой в печи. При резком повышении температуры печи влажность отходящего воздуха должна уменьшиться до уровня, соответствующего более сухому изделию, а масса не должна измениться, что имеет место при отсутствии сушки.

Обработка экспериментальных данных

На основании полученных графиков, фиксирующих различные значения регистрируемых параметров и различные способы сушки, делаются выводы о влиянии этих факторов на исследуемый процесс.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о физических основах процесса сушки.
2. Какие вам известны способы связи влаги с высушиваемым материалом?
3. Что такое термодиффузия и как она влияет на сушку?
4. Что является обобщенной движущей силой сушки?
5. Что является обобщенной движущей силой процесса диффузии влаги из глубины высушиваемого материала?
6. Почему на морозе хорошо сохнет мокрое белье?
7. Для чего воздух в сушилках подогревают?
8. Почему наружная поверхность влажного изделия может подгореть при сушке?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа № 16

Тема: Изучение процесса сушки сыпучих веществ в псевдоожиженном слое.

Цель работы: 1. Повысить уровень знаний о процессе псевдоожижения;
2. Повысить уровень знаний о процессе сушки в псевдоожиженном слое.
3. Получить экспериментальные данные о параметрах псевдоожиженного слоя и о сушке в нем.

Приборы и материалы: лабораторная установка, термоанемометр, термопары, измеритель влажности воздуха, водяной манометр, датчик измерения массы, линейка, компьютер.

Краткие теоретические сведения

При течении двухфазных систем, одна из фаз которых является твердой, возникает явление обтекания твердых частичек газом или жидкостью. Вследствие взаимодействия между ними возникают сила (R) и момент (M) сопротивления. Их главные значения и проекции на оси декартовых координат определяются формулами:

$$R = C \cdot F \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}; \quad M = R \cdot L;$$
$$R_x = C_x \cdot F_x \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}; \quad R_y = C_y \cdot F_y \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}; \quad R_z = C_z \cdot F_z \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2};$$
$$M_x = R_x \cdot L_x; \quad M_y = R_y \cdot L_y; \quad M_z = R_z \cdot L_z,$$

где C , C_x , C_y , C_z – коэффициенты аэродинамического сопротивления частицы и его проекции на оси координат;

F , F_x , F_y , F_z – площадь миделевого сечения частицы и ее проекции на плоскости, нормальные направлениям соответствующих проекций вектора скорости, m^2 ;

ρ – плотность газа, kg/m^3 ;

L – характерная длина частицы (расстояние между точкой приложения силы сопротивления и центром масс частицы), m ;

V – относительная скорость частицы и воздуха, m/s ;

R_x – сила лобового сопротивления частицы, N ;

R_y – подъемная сила, N ;

R_z – сила бокового смещения, N .

Из этих формул видно, что при достаточно большой разности скоростей

можно получить усилия, достаточные для того, чтобы частица была поднята вверх. Автоматически устанавливается такая, чтобы в результате данного взаимодействия при фактически заданных параметрах и массах частиц.

Рассмотрим движение потока воздуха снизу вверх через цилиндрический бункер, заполненный сыпучим продуктом (зерном или другими твердыми части-

цами). На каждую из них действует в вертикальном направлении сила лобового сопротивления R_x и сила веса, равная G . При малых скоростях V имеем $R_x < G$, и среда продувается воздухом, оставаясь неподвижной. С увеличением скорости V до $V_{кр}$ наступает равенство $R_x = G$. Это условие называется условием витания (парения) частицы. При этом теряется силовое взаимодействие между отдельными частицами, и силы трения покоя в структуре сыпучей среды исчезают. Такое состояние сыпучей среды называют ее псевдооживлением или кипением. Среда приобретает свойства идеальной жидкости (без внутреннего трения).

Таким образом, псевдооживление – явление исчезновения трения покоя между частицами твердой дисперсной фазы под действием продуваемого снизу вверх газового или жидкостного потока. В псевдооживленном состоянии частицы твердой фазы становятся подвижными; они перемещаются в пределах объема (слоя) и вращаются. Слой в целом обладает характеристиками маловязкой жидкости.

Явление псевдооживления (кипения) наблюдается при достижении скоростью газа первой критической величины. При достижении более высокой второй критической скорости твердые частицы переходят во взвешенное состояние и уносятся потоком газа. Первая критическая скорость (скорость начала псевдооживления) может быть рассчитана из критериального уравнения $Re = A \cdot Fe^n$, в котором:

$$Fe = d_s \cdot \sqrt{\left(\frac{4 \cdot g}{3 \cdot \nu}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_c} - 1\right)}; \quad Re = \frac{V \cdot d_s}{\nu};$$

где Fe , Re – критерии Федорова и Рейнольдса;

A , n – постоянные; при $Fe = 40 \dots 200$ имеем $A = 0,19$, $n = 1,56$;

d_s – эквивалентный диаметр твердых частиц, м;

m – масса частиц в слое, кг;

ρ , ρ_c – плотность частиц и среды.

Особенностью псевдооживленного слоя является его удержание во взвешенном состоянии за счет перепада давлений по газовому слою. Это позволяет определить данный перепад давлений (ΔP) из условий его уравнивания силой веса (G) слоя твердых частиц по уравнению:

$$\Delta P = \frac{G}{S}; \quad G = h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot g,$$

где S – площадь поперечного сечения слоя, m^2 ;

h – его высота, определяемая без продувки, м;

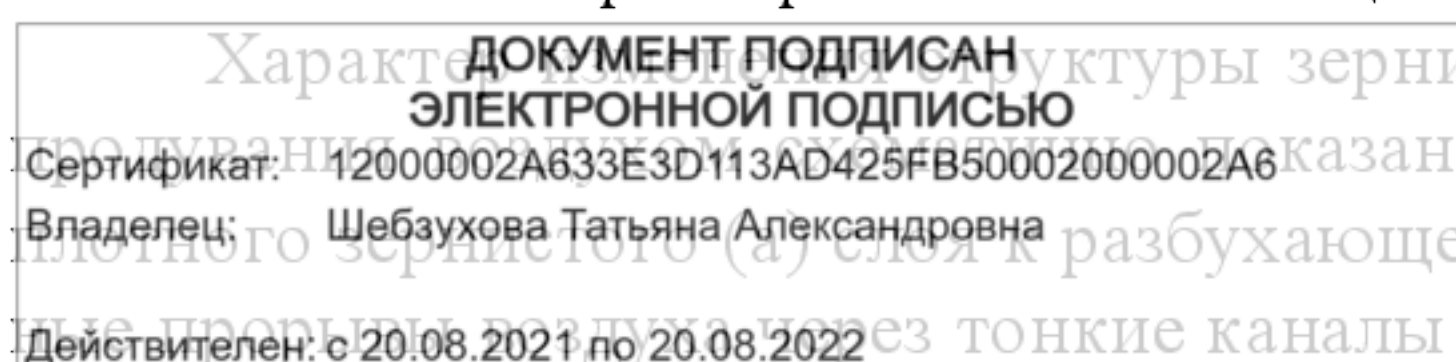
ρ – плотность материала твердых частиц, kg/m^3 ;

g – ускорение силы тяжести, m/s^2 ;

ε – пористость слоя.

При дальнейшем увеличении скорости продувки до $V = V_2$ происходит увлечение частиц потоком и вынос их из бункера. Величины скоростей $V_{кр}$ и V_2 являются комплексными характеристиками частиц.

Характеристики структуры зернистого слоя при увеличении скорости его продувания показаны на рисунке 13.1. Видны переходы от плотного зернистого (а) слоя к разбухающему или разрыхленному слою (б), начальная стадия (в) псевдооживления, первая (г) и вторая (д) стадии псевдооживления. На второй стадии реализуются вихревые течения в слое. Визуальное наблюдение этих переходов структуры является одной из задач



лабораторной работы. Если канал над опорной решеткой сыпучего слоя расширяется, поток истекающего воздуха не всегда может равномерно распределиться по всему поперечному сечению канала. Ближе к оси струи он более плотный. В этом случае часто реализуется фонтанирующий слой. Фотография с его изображением представлена на рис. 13.2. На ней видно, что частицы сыпучего слоя поднимаются в ядре воздушного потока в виде фонтана, отбрасываются к периферии и там опускаются вниз. Их траектории образуют замкнутые вихри. Вблизи стенок сосуда частицы движутся в сплошном слое, а ближе к оси струи образуются вихревые потоки.

Пористость зернистого слоя может быть определена экспериментально с использованием следующих зависимостей. Пусть по определению пористость ε равна отношению объема (V_{Π}) пор к объему материала в целом (V), причем общий объем материала равен сумме объемов пор и твердых частиц ($V_{\text{ТВ}}$):

$$\varepsilon = \frac{V_{\Pi}}{V} = \frac{V - V_{\text{ТВ}}}{V} = 1 - \frac{V_{\text{ТВ}}}{V}.$$

Для плотного (непродуваемого) слоя того же материала запишем аналогичное выражение с индексом «о» в виде:

$$\varepsilon_o = 1 - \frac{V_{\text{ТВ}}}{V_o} \quad \text{или} \quad V_{\text{ТВ}} = V_o(1 - \varepsilon_o),$$

где ε_o – пористость плотного слоя (при проведении наших экспериментов – постоянная). Для пшеницы $\varepsilon_o = 0,4$.

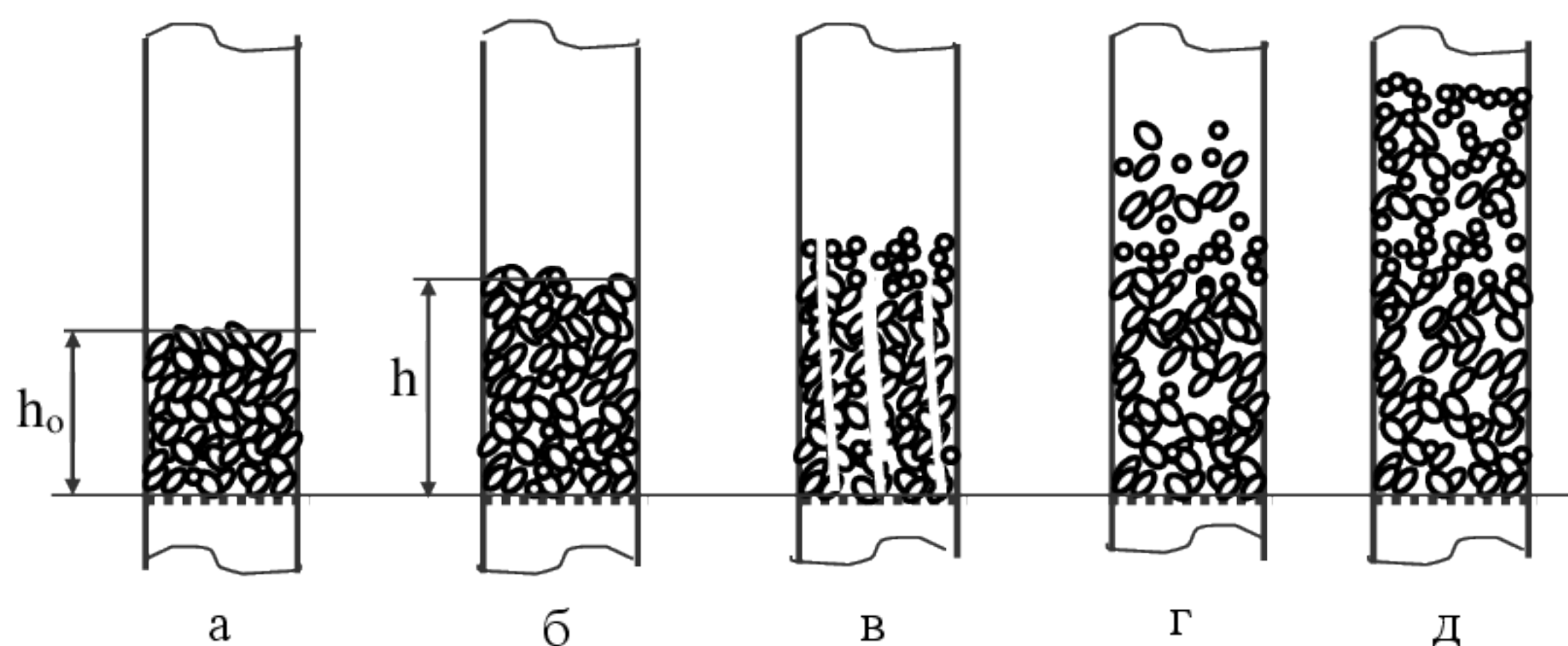


Рисунок 13.1 - Изменения структуры зернистого слоя в зависимости от скорости воздушного потока:

а – плотный слой; б – разрыхленный слой; в – начало псевдооживления (канальный прорыв воздуха); г – первая стадия псевдооживления (кипящий слой); д – вторая стадия псевдооживления (вихревой слой)

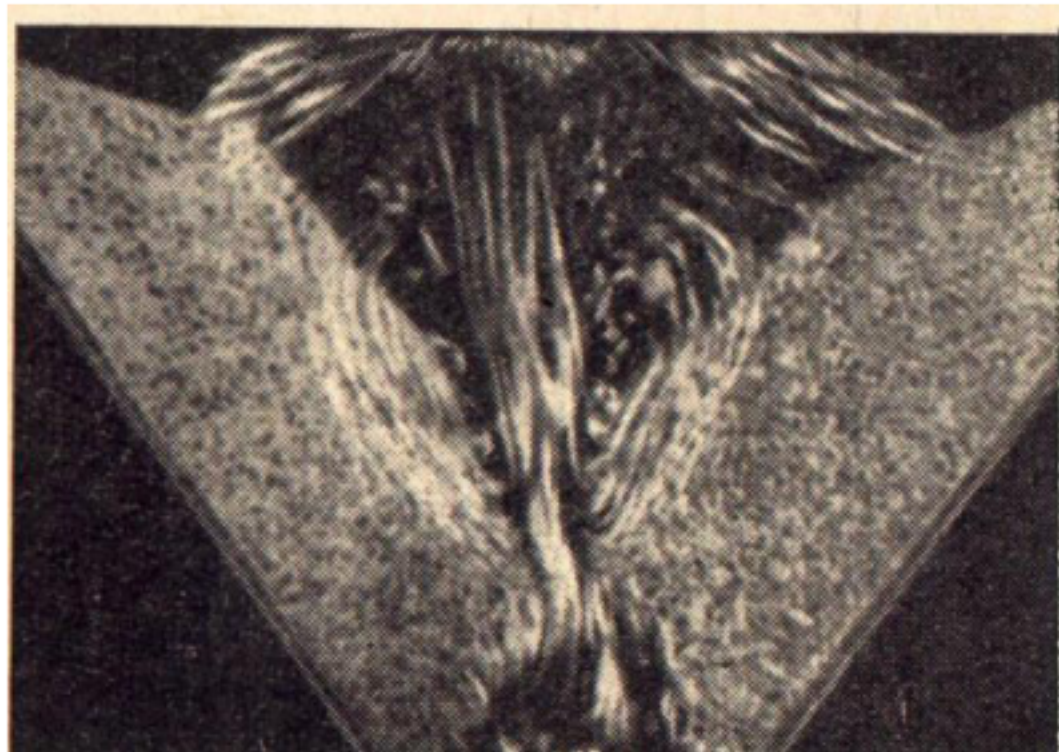


Рисунок 13.2 - Структура ядра фонтанирующего слоя (фотография)

Из этих выражений получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_o}{V} (1 - \varepsilon_o)$$

или для цилиндрического сосуда с зернистым материалом:

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_o}{h} \cdot (1 - \varepsilon_o),$$

где h , h_o – высоты зернистого слоя материала в продуваемом и плотном слоях материала.

Таким образом, измерив высоты слоев сыпучего материала в исходном состоянии и при продувке, рассчитываем пористость при продувке в соответствии с приведенным выражением.

Сушка в псевдоожиженном слое применяется для ее интенсификации с одновременным сокращением времени пребывания продукта при повышенной температуре, что особенно важно для термолабильных продуктов. Интенсификация сушки достигается непрерывным обновлением поверхности контакта сушильного агента и материала при движении его зерен в кипящем слое. Такого движения нет при сушке в плотном слое, поэтому в нем скорость сушки определяется более медленными процессами тепло- и массообмена между неподвижной поверхностью материала и сушильного агента с удалением паров из пространства между зерен.

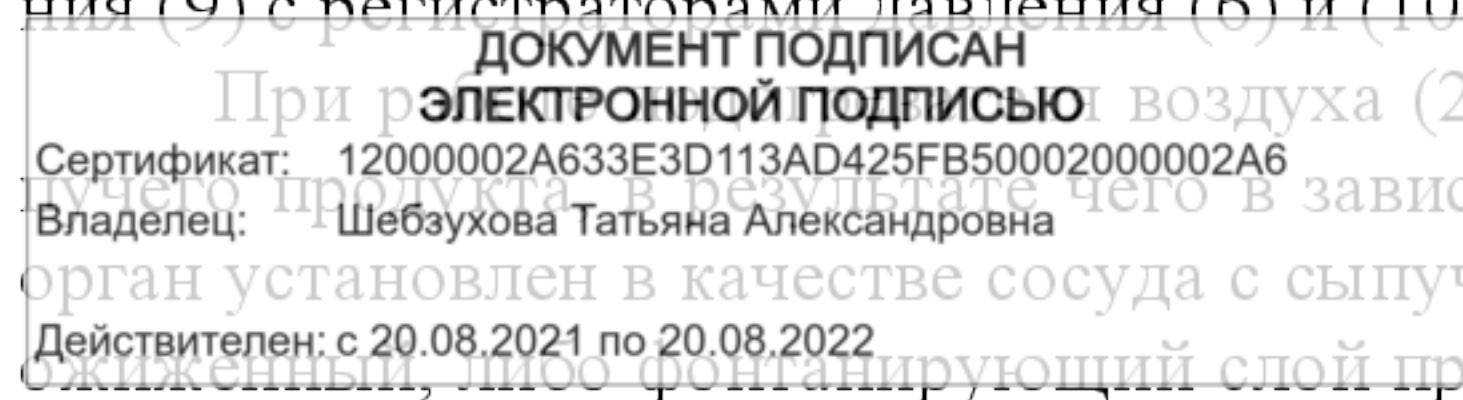
Сушка в фонтанирующем слое называется аэрофонтанной. Ее эффективность близка к эффективности сушки в кипящем слое.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 13.3.

В ней на опорной стойке (1) укреплен подогреватель воздуха (2), подающий подогретый воздух к сменным сосудам (3), в которых на опорной решетке (5) находится сыпучий продукт (4), продуваемый подогретым воздухом. Установка содержит датчик температуры (8) и регистратор температуры (7), а также датчики давления (9) с регистраторами давления (6) и (10).

При продувке воздуха (2) подогретый воздух продувает слой сыпучего продукта, в результате чего в зависимости от того, какой сменный рабочий орган установлен в качестве сосуда с сыпучим продуктом, реализуется либо псевдоожиженный, либо фонтанирующий слой продукта.



При проведении экспериментов рекомендуется выбирать следующие значения варьируемых параметров:

- температура воздуха на входе в слой сыпучего материала в интервале 30 - 60 °С;
- сыпучий материал: пшено любой кондиции, мак, рапс;
- скорость воздуха 1 ... 5 м/с;
- диаметр трубки для реализации псевдоожиженного слоя 10 ... 15 мм.

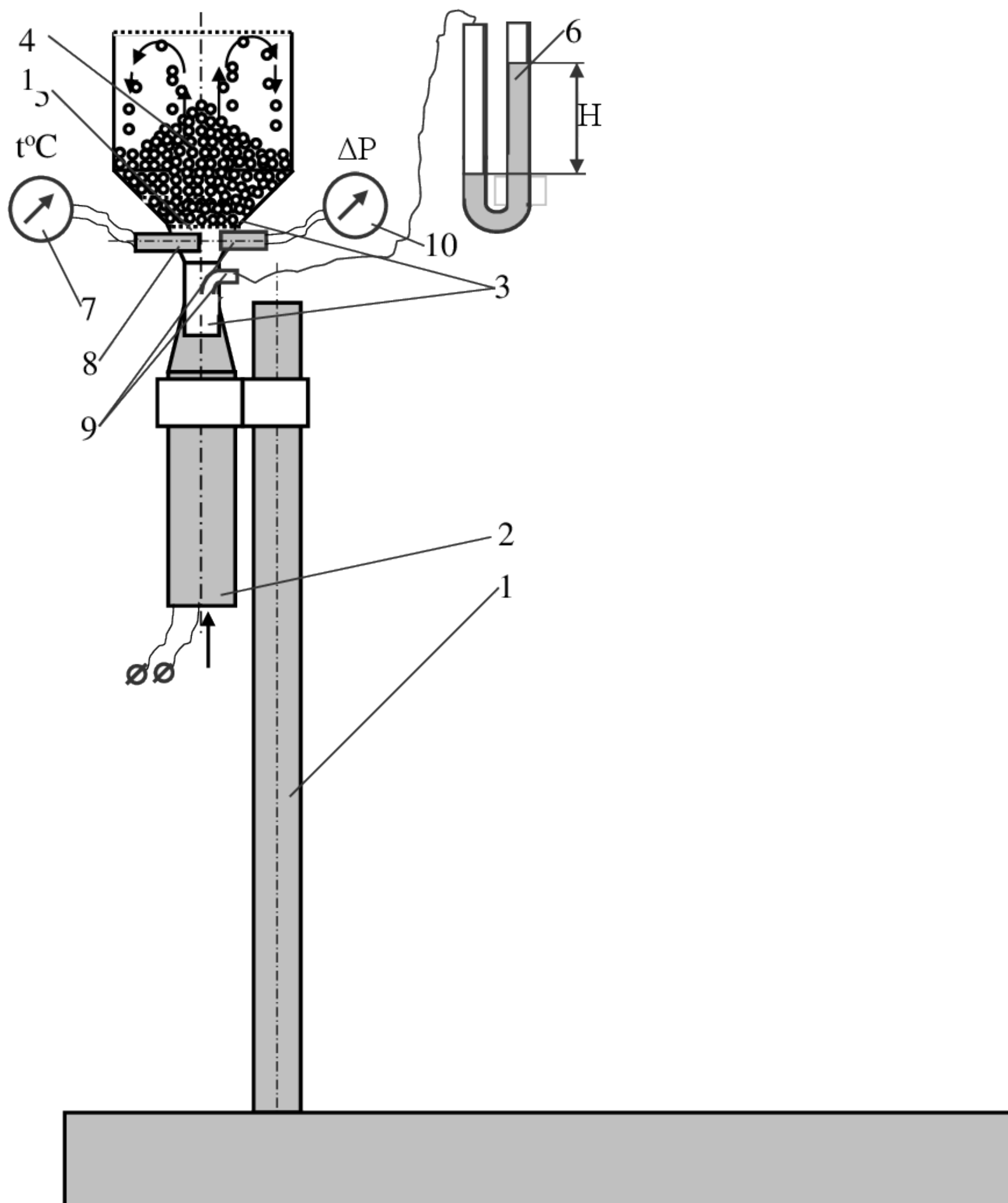


Рисунок 13.3 – Схема установки

В установке используются следующие средства измерений:

- термометры для измерения температуры скорости потока перед входом потока на трубку псевдоожиженного слоя;
- термометры для измерения температуры перед слоем сыпучего материала и на выходе из него;
- измеритель влажности воздуха на выходе из установки.

Высота слоя сыпучего материала в цилиндрической трубке измеряется визуально по рискам метрической шкалы, нанесенной на трубке.

Перепад давлений на слое сыпучего материала измеряется водяным манометром, представляющим собой U–образную трубку, заполненную водой.

Кроме того, предусматривается возможность периодической выгрузки высушиваемого материала из рабочей зоны установки с целью его взвешивания и определения потери влаги.

Результаты измерений температуры и скорости воздуха вводятся в компьютер и строятся графики их изменения во времени.

Порядок выполнения работы

В начале выполняются визуальные наблюдения структуры слоя сыпучего материала при реализации различных стадий псевдоожижения и фонтанирующего течений. Результаты описываются в отчете о лабораторной работе. В моменты времени, выбранные по указанию преподавателя, рассчитывается пористость материала.

По результатам одновременных измерений перепада давлений на слое материала ΔP и скорости потока V , измеренной с помощью компьютера, строится зависимость $\Delta P(V)$ по образцу, представленному на рисунок 13.4, и из нее находятся характерные скорости потока воздуха: критическую или скорость начала псевдоожижения и скорость уноса материала потоком воздуха.

Аналогичная зависимость может строиться и для аэрофонтанной сушилки.

Кривая сушки материала может строиться в координатах «Масса удаленной воды – время» (рисунок 13.5). Для ее построения необходимо периодически прерывать сушку и взвешивать высушиваемый материал. Разность масс в начальный и текущий моменты времени (τ) равна массе удаленной воды (ΔM).

Обработка экспериментальных данных

При обработке результатов заполняется таблица 13.1, в которую заносятся результаты измерения массы высушиваемого материала вместе с кюветой в разные моменты времени.

Таблица 13.1 – Протокол испытаний

Время, τ мин					
Масса кюветы с материалом, G , г					
Масса удаленной воды, $G_s = G - G_0$, г					

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Высушенная масса воды, удаленной из высушиваемого материала за время сушки, и строится график массы материала от времени, называемый кривой сушки.

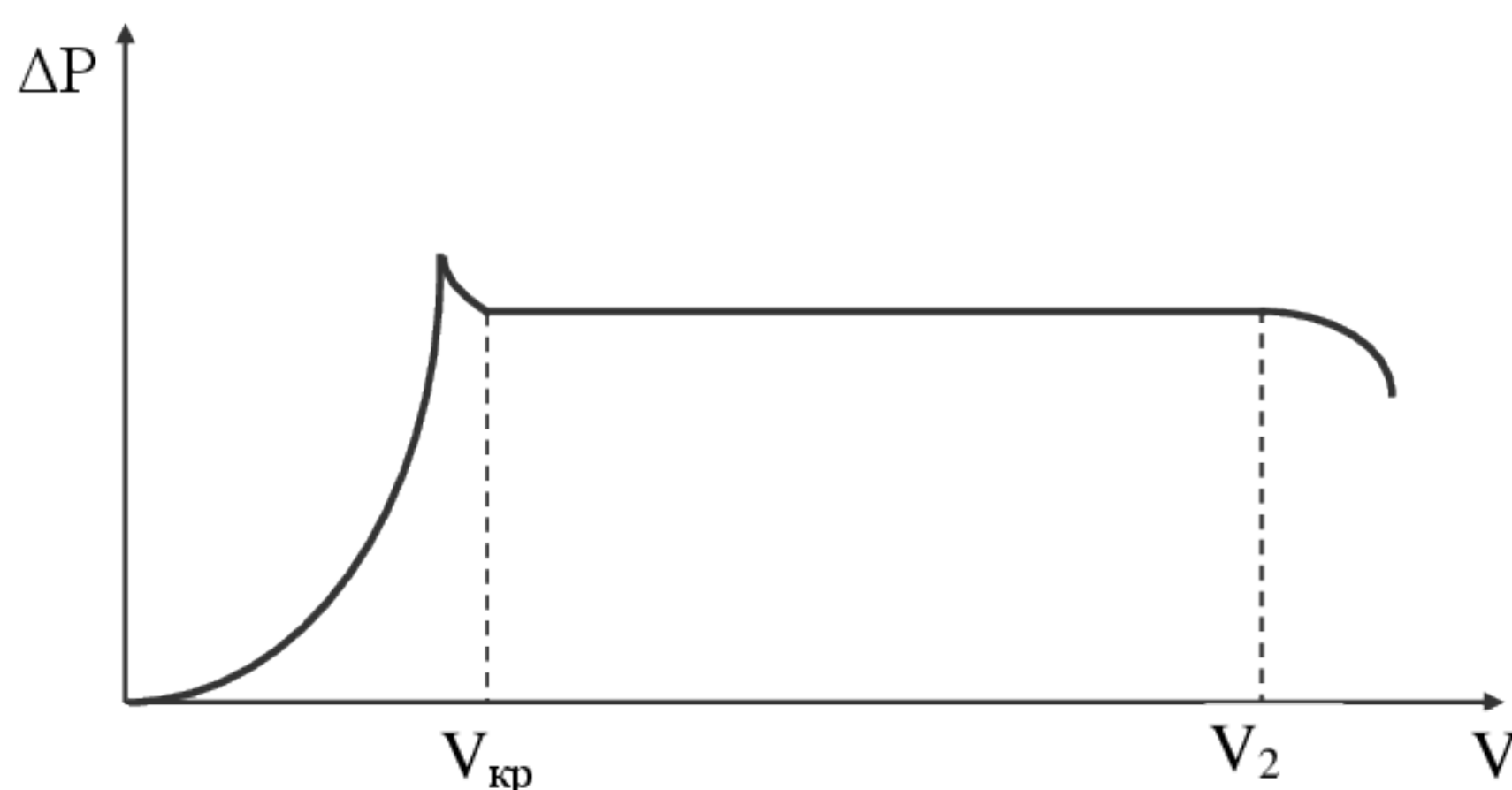


Рисунок 13.4 - Зависимость перепада давлений на слое материала ΔP от скорости потока воздуха V

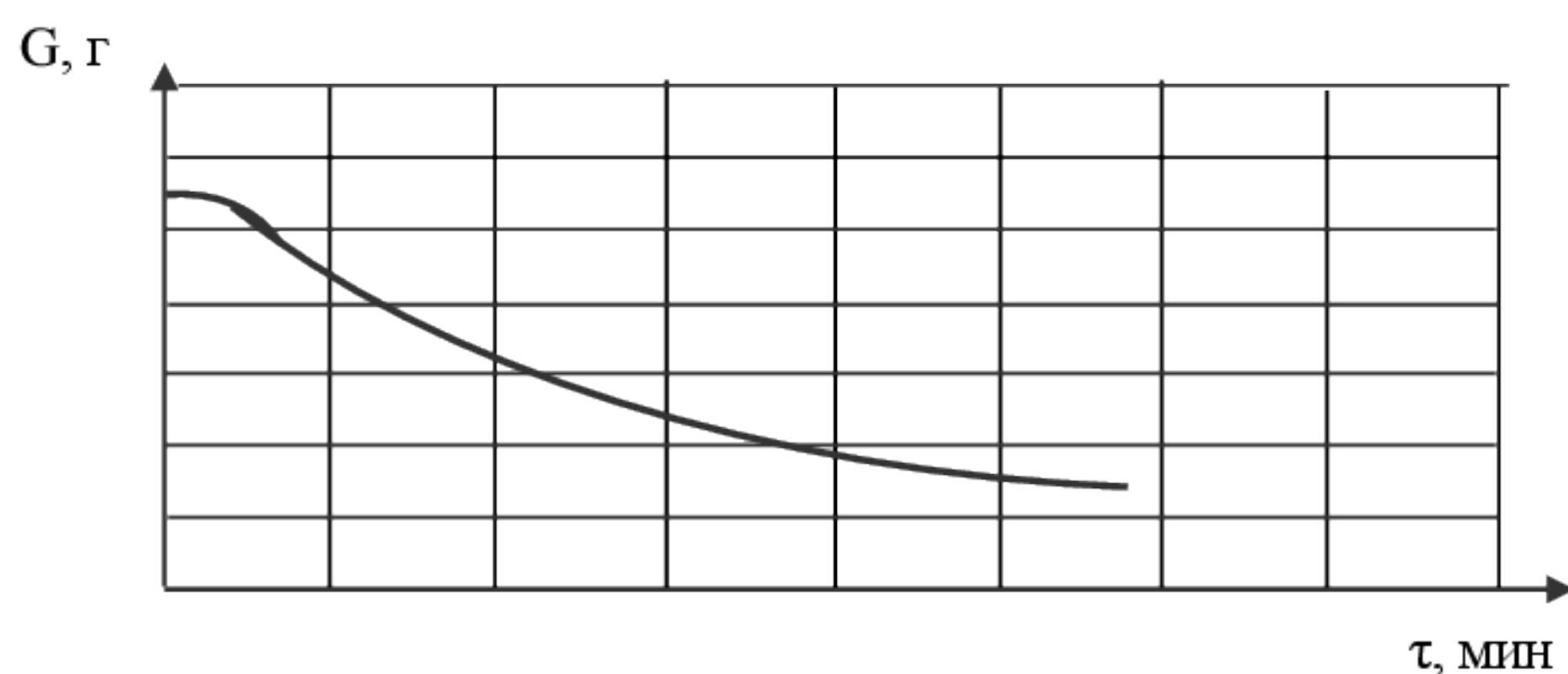


Рисунок 13.5 – Кривая сушки

В наших экспериментах аналог кривой сушки можно строить в координатах «Влажность отходящего воздуха-время». Преимущество этой кривой в том, что она может строиться автоматически компьютером без прерывания сушки на взвешивание материала. С уменьшением содержания влаги в материале влажность отходящего воздуха также уменьшается и потому одна кривая (любая) соответствует другой и может тарироваться по ней.

Контрольные вопросы

1. Как устроена аэрофонтанная сушилка?
2. Почему в псевдооживленном и фонтанирующем слоях сыпучего материала сушка протекает быстрее, чем в плотном слое?
3. Каковы характерные структуры сыпучего слоя, подвергаемого продувке с различными скоростями воздуха?
4. Как по результатам эксперимента определяется критическая скорость воздуха?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

5. Почему на кривой $\Delta P(V)$ при скоростях потока, меньших критической, перепад давлений на слое сыпучего материала больше, чем при больших скоростях?
6. Почему безэмпирической скорости сушки различных материалов можно судить по зависимости влажности отходящего воздуха от времени?

7. Покажите на лицевой панели установки, изображенной на компьютере, основные узлы установки и объясните их назначение.
8. Почему аэрофонтанная сушилка почти так же эффективна, как и сушилка с псевдоожижением сыпучего материала?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа № 17

Тема: Испытание ректификационной колонны

Цель работы: 1. Ознакомиться с работой ректификационной установки периодического действия в пусковом и рабочем режимах;
2. Определить количества и концентрации продуктов перегонки;
3. Экспериментально определить флегмовое число;
4. Рассчитать количество теоретических тарелок колонны;
5. Рассчитать удельный расход энергии.
6.

Приборы и материалы: лабораторная установка, спиртометр, колбы, термометры, расходомер, часы, цифровой вольтметр, компьютер.

Краткие теоретические сведения

Перегонка – это процесс разделения однородных смесей жидкостей по признаку их летучести. Летучими называют жидкости, давление насыщенных паров над которыми существенно отличается от нуля.

В основе теории перегонки лежат представления об образовании жидких растворов и смеси паров над ними. При кипении смесей летучих жидкостей пары жидкостей обогащаются более летучим компонентом. При частичной конденсации таких паров они разделяются на паровую фазу и жидкость (флегму). В оставшейся паровой фазе содержание более летучего компонента дополнительно повышается. Концентрация более летучего компонента в паровой фазе над бинарным раствором повышается потому, что более летучая жидкость кипит при меньшей температуре. Поэтому при температуре перегонки она кипит, а менее летучая жидкость испаряется без кипения. Такие смеси называются раздельнокипящими. Для идеальных растворов они реализуются при любых концентрациях.

Для неидеальных растворов существуют области концентраций, в которых оба компонента бинарной смеси кипят одновременно. Такие области называются областями азеотропии или областями нераздельнокипящих (азеотропных) жидкостей. В азеотропной области концентрации жидкой и паровой фаз бинарных смесей одинаковы, и потому при их перегонке повысить концентрацию жидкой фазы невозможно. По мере увеличения количества отбираемого дистиллята содержание низкокипящего компонента в нем стремится к его содержанию в исходной смеси, и при перегонке всей исходной жидкой смеси она станет равной концентрации исходной смеси. Суждение о концентрации конечного продукта в отбираемом дистилляте можно составить в соответствии с таблицей 14.1.

Таблица 14.1. Концентрация спирта в дистилляте

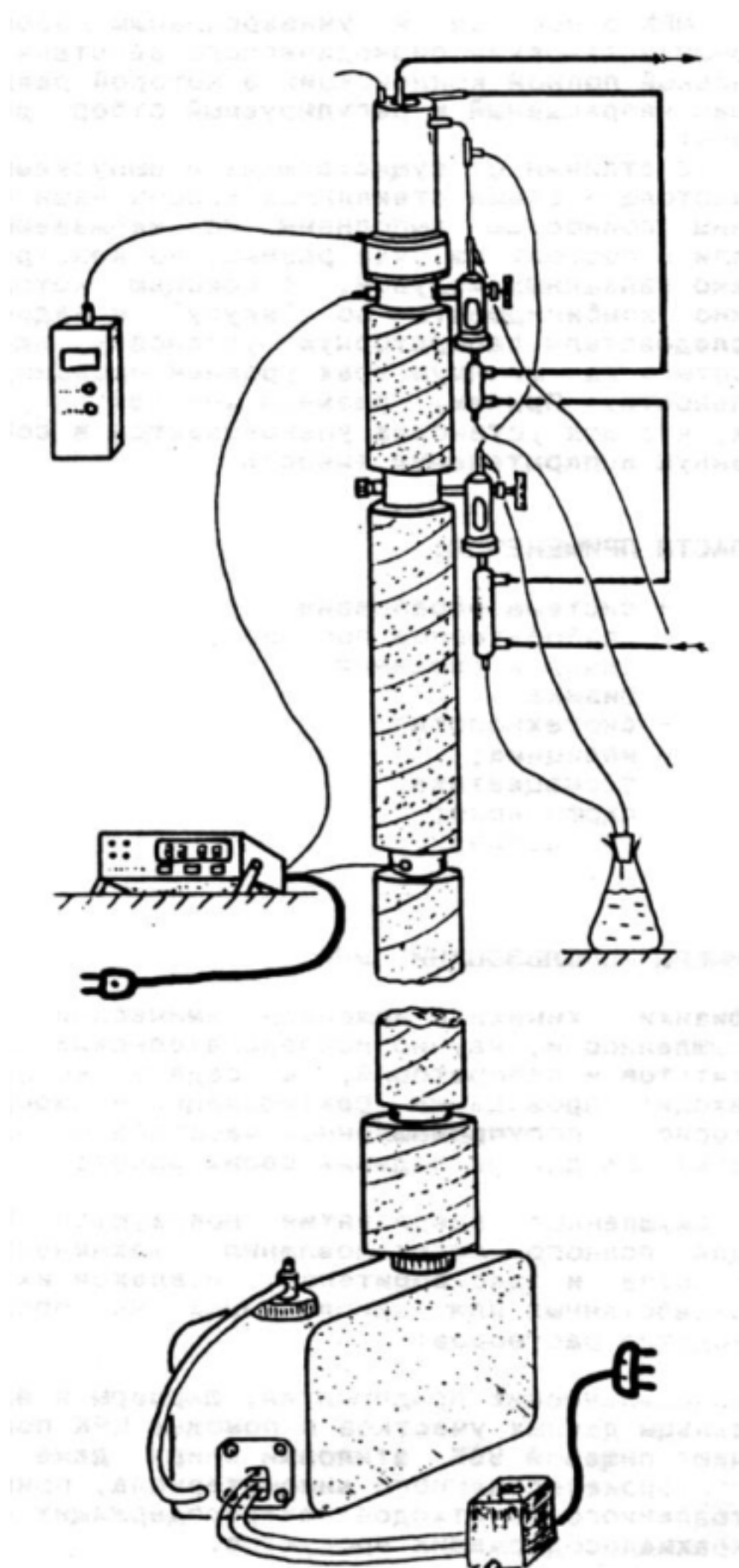
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022			
Содержание низкокипящего компонента в навалке, %	Отбор дистиллята к массе навалки, %		
	10	25	50
0	65	58	39,4

30	74	69	58
40	75	73,2	68
50	77	76	74
60	80	78,5	78
70	83	82,2	81
75	84	83	81,5

Рисунок 14.1 – Схема лабораторной установки

Для определения необходимого числа тарелок или единичных переносов колонны можно воспользоваться графическим изображением рабочих линий и кривых фазового равновесия. Эти линии представляют собой зависимости концентраций более летучего компонента в паровой фазе (Y) от аналогичных концентраций в жидкой фазе (X).

Линия фазового равновесия водно-спиртовой смеси находится по справоч-



Эти данные приведены в таблице 14.2. Рабочая линия для нашей колонны строится по формуле:

$$Y = \frac{X}{\nu + 1} + \frac{\nu}{\nu + 1} \cdot X,$$

где X, Y – концентрации спирта в жидкой и паровой фазах в произвольном сечении колонны;

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

X_d – концентрация спирта в дистилляте после окончания перегонки;
 v – флегмовое число, при котором выполнена перегонка.

Таблица 14.2 – Равновесные составы жидкости и пара и температуры кипения смеси этиловый спирт – вода при давлении 10^5 Па

Содержание спирта в жидкости		Температура кипения, °C	Содержание спирта в парах		Содержание спирта в жидкости		Температура кипения, °C	Содержание спирта в парах	
% мас	% мол		% мас	% мол	% мас	% мол		% мас	% мол
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,01	0,004	99,9	0,13	0,53	35,00	17,41	83,75	73,2	51,67
0,10	0,04	99,8	1,3	0,5	36,00	18,03	83,7	73,5	52,04
0,15	0,055	99,7	1,95	0,77	37,00	18,68	83,5	73,8	52,43
0,20	0,08	99,6	2,6	1,03	38,00	19,34	83,4	74,00	52,68
0,30	0,13	99,5	3,8	1,57	39,00	20,00	83,3	74,3	53,09
0,40	0,16	99,4	4,9	1,98	40,00	20,68	83,1	74,6	53,46
0,50	0,19	92,3	2,48	2,48	41,00	21,38	82,95	74,8	53,76
0,60	0,23	99,2	7,1	2,90	42,00	22,07	82,78	75,1	54,12
0,70	0,27	99,1	8,6	2,33	43,00	22,79	82,61	75,4	54,54
0,80	0,31	99,0	9,0	3,725	44,00	23,51	82,5	75,6	53,80
0,90	0,35	98,9	9,9	4,12	45,00	24,25	82,45	75,9	55,22
1,00	0,39	98,75	10,75	4,51	46,00	25,00	82,35	76,1	55,48
2,00	0,79	97,65	19,7	8,76	47,00	25,75	82,15	76,5	56,03
3,00	1,19	96,65	27,2	12,75	48,00	26,53	82,15	76,5	56,03
4,00	1,61	95,8	33,3	16,34	49,00	27,32	82,00	76,8	56,44
5,00	2,01	94,96	37,00	18,64	50,00	28,12	81,9	77,00	56,71
6,00	2,43	94,15	41,1	21,45	51,00	28,93	81,8	77,3	57,12
7,00	2,86	93,35	44,6	23,46	52,00	29,80	81,7	77,5	57,41
8,00	3,29	92,6	47,6	26,21	53,00	30,61	81,6	77,7	57,70
9,00	3,73	91,9	50,0	28,12	54,00	31,47	81,5	78,00	55,11
10,00	4,16	91,3	52,2	29,92	55,00	32,34	81,4	78,3	58,39
11,00	4,61	90,8	54,1	31,56	56,00	33,23	81,3	78,5	58,78
12,00	5,07	90,5	55,8	33,06	57,00	34,16	81,25	78,7	59,10
13,00	5,51	89,7	57,4	34,51	58,00	35,09	81,2	79,0	59,55
14,00	5,98	89,2	58,8	36,83	59,00	36,02	81,1	79,2	60,29
15,00	6,46	89,0	60,0	36,98	61,00	37,97	80,95	79,7	60,58
16,00	6,86	88,3	61,1	38,06	62,00	38,95	80,85	80,00	61,02
17,00	7,41	87,9	62,2	39,16	63,00	40,00	80,75	80,3	61,44
18,00	7,95	87,7	63,2	40,18	64,00	41,02	80,73	80,5	61,76
19,00	8,41	87,4	64,3	41,27	65,00	42,09	80,6	80,8	62,22
20,00	8,92	87,0	65,00	42,09	66,00	43,17	80,5	81,0	62,52
21,00	9,42	86,7	65,8	42,94	67,00	4,27	80,45	81,3	62,99
22,00	9,93	86,4	66,6	43,82	68,00	45,41	80,4	81,6	63,43
23,00	10,48	86,3	67,3	44,61	69,00	46,55	80,3	81,9	63,91
24,00	11,0	85,95	68,00	45,41	70,00	47,72	80,2	82,1	64,21
25,00	11,53	85,7	68,6	46,08	71,00	48,92	80,1	82,4	64,70
26,00	12,08	85,4	69,3	46,90	72,00	50,16	80,00	82,8	65,34
27,00	12,64	85,2	69,8	47,49	73,00	51,39	79,95	83,1	65,81
28,00	13,19	85,0	70,3	48,08	74,00	52,68	79,85	83,4	66,28
29,00	13,77	84,8	70,8	48,68	75,00	54,00	79,75	83,8	66,93
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30,00	14,35	84,7	71,3	49,30	76,00	55,34	79,72	84,1	67,42
31,00	14,95	84,5	71,1	49,77	77,00	6,71	79,7	84,5	68,07
32,00	15,55	84,3	72,1	50,27	78,00	58,11	79,65	83,9	68,76
33,00	16,15	84,2	72,5	50,78	79,00	59,55	79,55	85,4	69,59
34,00	16,77	83,85	72,9	51,27	80,00	61,02	79,5	85,8	70,29
81,00	62,52	79,4	86,4	71,4	89,00	75,99	78,6	90,7	79,26
82,00	64,05	79,4	86,4	71,85	90,00	77,88	78,5	91,3	80,42
83,00	65,04	79,4	86,4	72,71	91,00	79,82	78,4	92,0	81,83
84,00	67,27	79,4	86,4	73,61	92,00	81,82	78,3	92,55	83,15
85,00	68,92	78,95	88,3	74,69	93,00	83,87	78,27	92,4	84,70
86,00	70,62	78,85	88,9	75,81	94,00	85,97	78,2	94,2	86,40
87,00	72,36	78,75	89,5	76,93	95,00	88,15	78,18	95,05	88,25
88,00	74,15	78,65	90,1	78,00	95,57	89,41	78,15	95,57	89,41

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Нанеся рабочую и равновесную линии на график, изображенный на рисунке 14.2, графическим построением, представленным на рисунке, найдем число эквивалентных единичных переносов колонны, при которых выполнена перегонка. Термин «эквивалентный» применен здесь потому, что в насадочной колонне нет тарелок, и им эквивалентны соответствующие участки насадки.

Начальной концентрацией спирта в воде, от которой начинается перегонка, является его концентрация в кубовом остатке X_k , а конечной – концентрация дистиллята X_d .

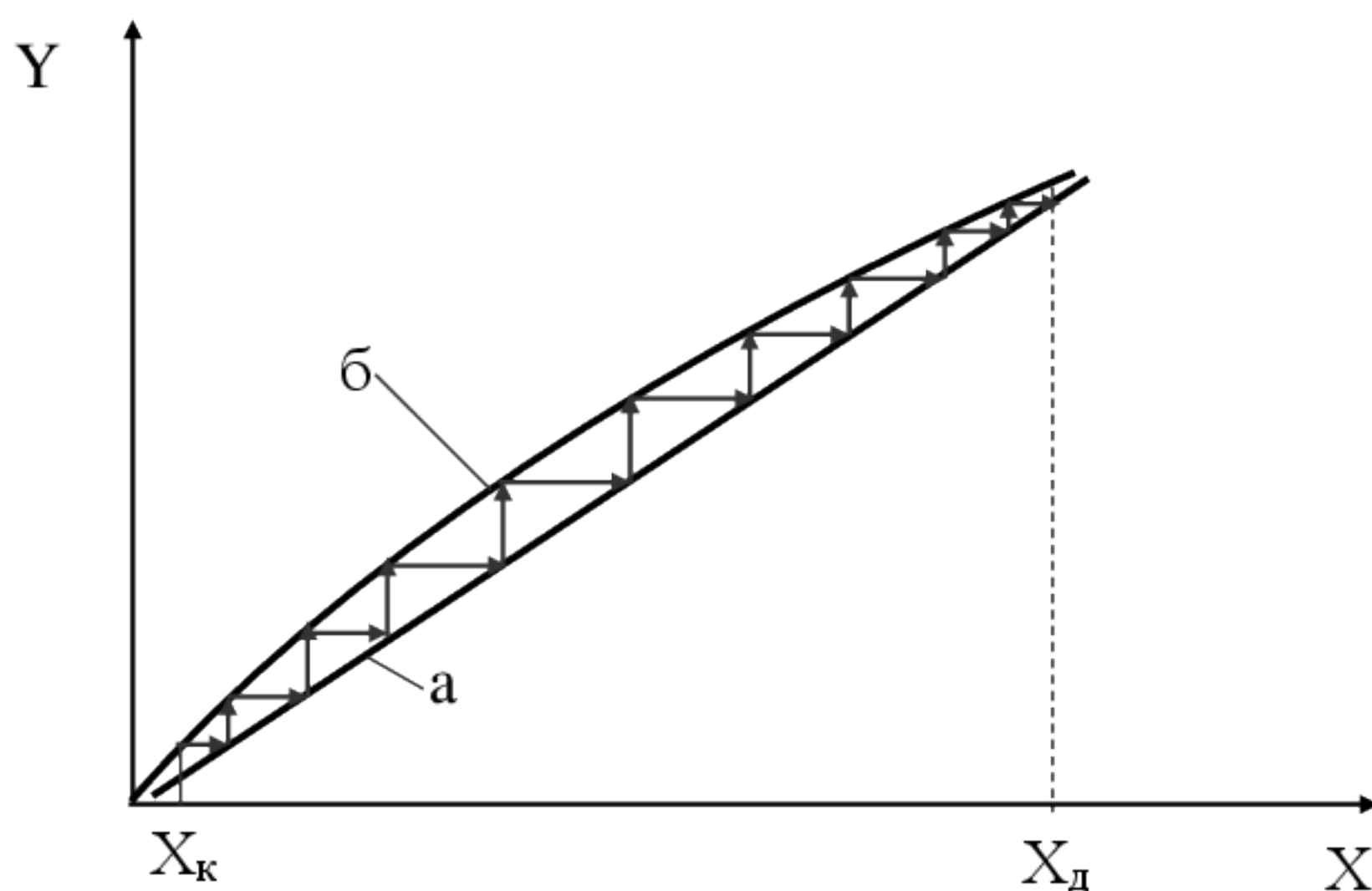


Рисунок 14.2 - Графическое определение необходимого числа тарелок:
а – рабочая линия колонны; б – линия фазового равновесия

Рассчитывая параметры перегонки после ее окончания, используем следующие зависимости.

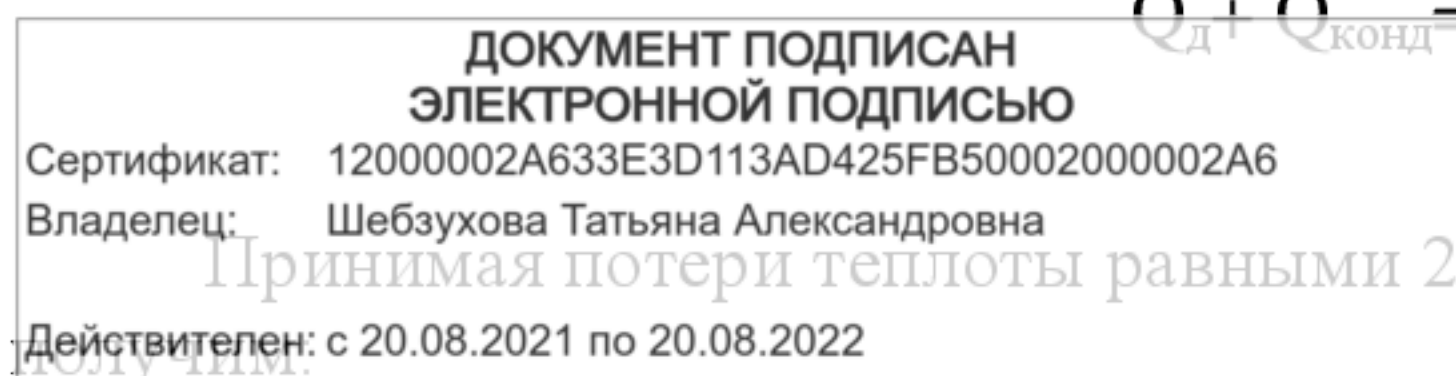
1. Измеряемые спиртомерами объемные концентрации исходной смеси (X_n) и дистиллята (X_d) переводят в массовые и находят плотность водно-спиртовой смеси при этих концентрациях по таблице 14.3.

2. Зная массы исходной смеси (G_n) и дистиллята (G_d) в кг, из уравнения материального баланса находят массу кубового остатка (G_k) и его концентрацию:

$$G_k = \frac{G_n \cdot \rho_n}{1000} - \frac{G_d \cdot \rho_d}{1000}; \quad X_k = \frac{G_n \cdot X_n - G_d \cdot X_d}{G_k}.$$

3. Составляют тепловой баланс дефлегматора и холодильника. Этот баланс отражает равенство расходов теплоты, отдаваемых дефлегматором (Q_d) и дистиллятором или конденсатором ($Q_{конд}$), теплосъему водой (Q_v) и потерям теплоты ($Q_{потерь}$):

$$Q_d + Q_{конд} = Q_v + Q_{потерь}.$$



Принимая потери теплоты равными 20 % от теплосъема охлаждающей водой,

$$Q_d + Q_{конд} = 1,2 \cdot Q_v.$$

Таблица 14.3 – Соотношение объемных и массовых концентраций (%) и плотности жидких вводно-спиртовых смесей при 20°С

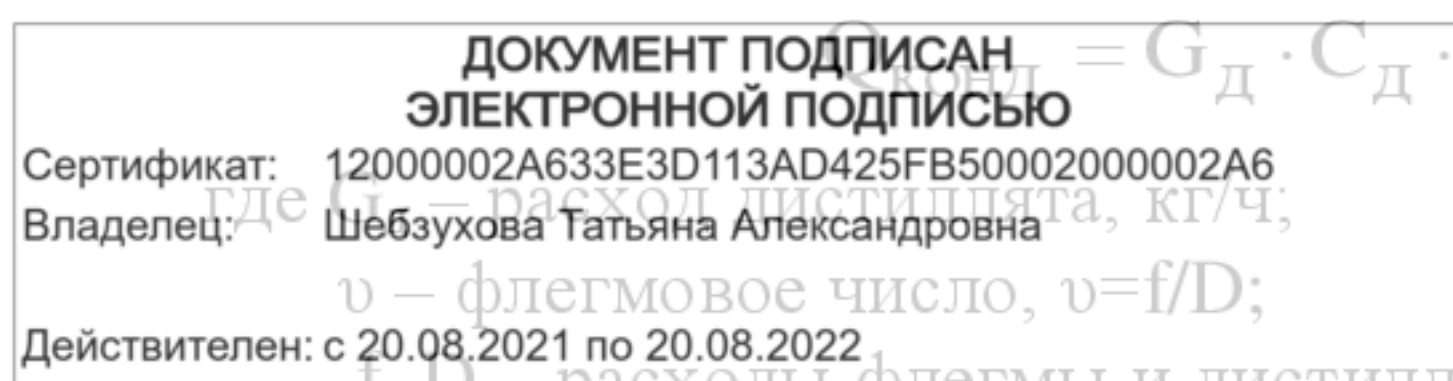
С об %	С мас %	ρ, кг/м ³	С об. %	С масс %	ρ, кг/м ³	Со об %	Смас %	ρ, кг/м ³
0	0,00	998	34	28,01	957	68	60,27	890
1	0,79	996	35	28,91	955	69	61,33	887
2	1,59	995	36	29,78	954	70	62,39	885
3	2,38	993	37	30,65	952	71	63,46	883
4	3,18	992	38	31,53	951	72	64,54	880
5	3,98	991	39	32,44	949	73	65,63	878
6	4,78	989	40	33,30	948	74	66,72	875
7	5,59	988	41	34,19	946	75	67,83	872
8	6,40	987	42	35,09	944	76	68,94	870
9	7,20	985	43	35,99	943	77	70,06	867
10	8,01	985	44	36,89	941	78	71,19	864
11	8,83	983	45	37,80	939	79	72,33	862
12	9,64	982	46	38,72	937	80	73,48	859
13	10,46	981	47	39,69	935	81	74,64	856
14	11,27	980	48	40,56	934	82	75,81	853
15	12,09	979	49	41,49	932	83	77,00	850
16	12,91	977	50	42,53	931	84	78,19	848
17	13,74	976	51	43,37	928	85	79,40	845
18	14,56	975	52	44,31	926	86	80,62	842
19	15,39	974	53	45,26	924	87	81,86	839
20	16,21	973	54	46,22	922	88	83,11	836
21	17,04	972	55	47,18	920	89	84,38	832
22	17,88	971	56	48,15	918	90	85,66	829
23	18,71	970	57	49,13	916	91	86,97	826
24	19,54	969	58	50,11	911	92	88,29	822
25	20,38	968	59	51,10	910	93	89,63	819
26	21,22	966	60	52,09	909	94	91,00	815
27	22,06	965	61	53,09	907	95	92,41	811
28	22,91	964	62	54,09	904	96	93,84	807
29	23,76	963	63	55,11	902	97	95,30	803
30	24,61	962	64	56,13	899	98	96,81	799
31	25,46	961	65	57,15	897	99	99,38	794
32	16,32	959	66	58,19	895	100	100,00	789
33	17,18	958	67	59,23	892			

Расходы теплоты, отнимаемые дефлегматором и конденсатором, можно определить из выражений:

$$Q_{\text{д}} + Q_{\text{конд}} = 1,2 \cdot G_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} (t_{\text{в.к.}} - t_{\text{в.н.}}), \text{ кДж.}$$

$$Q_{\text{д}} = (G_{\text{д}} + \nu \cdot G_{\text{д}}) r = G_{\text{д}} \cdot (\nu + 1) r_{\text{ф}}, \text{ кДж,}$$

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot \varphi \cdot (t_{\text{конд}} - t_{\text{д}}), \text{ кДж,}$$



$r_{\text{ф}}$ – удельная теплота парообразования флегмы, кДж/кг. Находится из

таблицы 14.4 в зависимости от концентрации спирта в парах $X_{\phi} = X_d$ а массовых %;

C_d – теплоемкость дистиллята, кДж/кг. Определяется по таблице 14.5 в зависимости от концентрации X_d при средней температуре дистиллята t_{cp}

$$t_{cp} = \frac{t_{конд} - t_d}{2};$$

$t_{конд}$ – температура конденсации, равная температуре флегмы t_{ϕ} , °С. Измеряется в сборнике дистиллята или принимается равной 17...20 °С;

ϕ – коэффициент неравномерности поступления дистиллята. Обычно принимают $\phi=2$;

G_n, C_v – расход воды охлаждения, кг/ч и ее теплоемкость, кДж/(кг·К);

$t_{в.н.}$ – температуры воды конечная и начальная, °С.

Из уравнения теплового баланса определяют среднее флегмовое число колонны за время перегонки:

$$\psi = 1,2 \cdot \frac{G_v \cdot C_v \cdot (t_{в.к.} - t_{в.н.}) - G_d \cdot C_d \cdot \phi \cdot (t_{конд} - t_d)}{G_d \cdot r_{\phi}} - 1.$$

4. Выполняют пересчет концентраций исходной смеси X_n и дистиллята X_d из массовых % в мольные:

$$X_{моль} = \frac{\frac{X_{мас}}{46,07}}{\frac{X_{мас}}{46,07} + \frac{100 - X_{мас}}{18,02}},$$

где 46,07 и 18,02 – мольные массы этанола и воды, кмоль/кг.

5. Рассчитывают удельный расход энергии на ректификацию безводного спирта, кВтч/кг :

$$q = \frac{100 \cdot N \cdot \tau}{G_d \cdot X_d},$$

где N – мощность электронагревателя, кВт;

τ – продолжительность перегонки, с.

Порядок выполнения работы

1. Студенты под руководством преподавателя изучают устройство перегонной колонны.

2. Под руководством преподавателя куб экспериментальной установки заливается спиртом с заданной массовой концентрацией.

3. Включается подогрев куба и установка выводится на устойчивый режим перегонки.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Спирто-водяная смесь перегоняется до получения дистиллята в заранее оговоренном количестве. В процессе перегонки измеряются параметры, указанные в протоколе наблюдений.

5. Полученные данные обрабатываются по приведенной далее методике. Пример расчетов приводится ниже.

Таблица 14.4 – Протокол испытаний (пример)

Параметры		№ испытания
1. Количество исходной смеси, л	G_H	3,5
2. Концентрация исходной смеси, % об.	X_H	41
3. Количество дистиллята, л	G_D	1,0
4. Концентрация дистиллята, % об.	X_D	96,3
5. Продолжительность процесса ректификации, ч	τ	1
6. Температура воды на входе в холодильник, °С	$t_{в.н.}$	11
7. Температура воды на выходе дефлегматора, °С	$t_{в.к.}$	33
8. Потребляемая мощность, кВт	N	0,65
9. Температура флегмы, °С	t_ϕ	74,5
10. Расход воды, л/ч	G_B	24

Обработка экспериментальных данных

Пересчет концентрации исходной смеси и дистиллята из % об в % мас и плотность спирто-водяной смеси:

$$X_H = 41 \text{ \% об.} \rightarrow 34,19 \text{ \% мас; } \rho_H = 946 \text{ кг/м}^3,$$

$$X_D = 96,3 \text{ \% об.} \rightarrow 93,84 \text{ \% мас; } \rho = 807 \text{ кг/м}^3.$$

1. Количество кубового остатка:

$$G_K = \frac{3,5 \cdot 946}{1000} - \frac{1,0 \cdot 807}{1000} = 2,5 \text{ кг} \quad G_D = \frac{1,0 \cdot 807}{1000} = 0,807 \text{ кг.}$$

2. Конечная концентрация (концентрация кубового остатка):

$$X_K = \frac{34,19 \cdot 3,5 - 93,84 \cdot 1,0}{2,5} = 10,33 \text{ \% мас.}$$

3. Флегмовое число:

$$\psi = 1,2 \cdot \frac{24 \cdot 4,19 \cdot (33 - 11) - 0,807 \cdot 2,9 \cdot 2 \cdot (74,5 - 20)}{0,807 \cdot 935,8} - 1 \approx 2,2,$$

где $C_\phi = 4,19$ – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$r_\phi = 935,8$ кДж/кг – теплота испарения флегмы при $X_D = 93,84 \text{ \% мас}$;

$C_D = 2,9$ кДж/кг – удельная теплоемкость дистиллята при $X_D = 93,84 \text{ \% мас}$ и

температуре $t_{cp} = \frac{74,2 + 20}{2} = 47,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Концентрация исходной смеси и дистиллята в мольных %:

$$X_K = \frac{34,19}{46,07} = 18,88 \text{ \% моль,}$$

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$X_d = \frac{\frac{93,84}{46,07}}{\frac{93,84}{46,07} + \frac{100 - 93,84}{18,02}} = 85,4 \text{ \% моль.}$$

5. Диаграмма фазового равновесия в координатах X-Y (изображается по данным таблицы фазового равновесия). Здесь X, Y – содержание этанола в парах и в жидкости в % моль.

6. Рабочая линия колонны (наносится на ту же диаграмму фазового равновесия). Для этого высчитывается отрезок b , отсекаемый рабочей линией от оси 0-Y

$$b = \frac{85,4}{2,2 + 1} = 26,2.$$

Вторая точка рабочей линии находится как точка пересечения перпендикуляра, восстановленного к оси 0-X при $X=85,4$ % моль до диагонали графика.

7. Удельный расход энергии на ректификацию:

$$q = \frac{100 \cdot 0,65 \cdot 1}{0,807 \cdot 93,84} = 0,85 \text{ кВтч / кг.}$$

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл разделения однородной системы по летучести компонентов.
2. Что такое «азеотропная» смесь?
3. По каким закономерностям устанавливается давление паров над зеркалом бинарного раствора жидкостей разной летучести?
4. В чем заключается сущность закона Рауля?
5. Объясните физический смысл дефлегмации.
6. Что такое простая и сложная перегонка?
7. Объясните устройство и работу ректификационной колонны.
8. Чему равно давление паров над поверхностью бинарной смеси бензола и толуола?
9. Чему равно давление паров над поверхностью бинарной смеси бензола и воды?
10. Какие параметры связывает температурная диаграмма бинарных смесей?
11. Какой параметр является обобщенной действующей силой процесса перегонки?
7. Что такое «вторичный пар»?
10. Какой продукт является дистиллятом ректификационной колонны?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Список рекомендуемой литературы

Перечень основной литературы

1. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]; ред. А. Н. Остриков. - СПб. : ГИОРД, 2012. - 616 с.
2. Алексеев, Г. В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты пищевых производств" [Текст] : учеб. пособие / Г. В. Алексеев, И. И. Бриденко, Н. И. Лукин. - СПб.: "Лань", 2011. - 144 с.

Перечень дополнительной литературы:

1. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие/ А. Ф. Апальков - Ростов н/Д: Феникс, 2008.
2. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]. - СПб. : Изд-во РАПП, 2009. - 408 с.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. Электронно-библиотечная система IPRbooks
2. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека on-line»
3. Электронно-библиотечная система Лань

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

для обучающихся по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств»

Направление подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания

Направленность (профиль) Технология и организация ресторанного дела

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Пятигорск, 2022

Содержание

Введение	113
1.Общая характеристика самостоятельной работы студента	114
2. План - график выполнения самостоятельной работы	115
3.Методические рекомендации по изучению теоретического материала	115
3.1. Вид самостоятельной работы: самостоятельное изучение литературы	115
3.2. Вид самостоятельной работы: подготовка к лабораторным занятиям	116
4. Методические указания.....	116
5. Методические указания по подготовке к экзамену	116
Список рекомендуемой литературы	110

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Введение

Методические указания и задания для выполнения самостоятельной работы студентами по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» по направлению подготовки бакалавров: 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания.

Методическое пособие содержит весь необходимый материал для выполнения самостоятельной работы по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств».

В данном методическом пособии приведены темы и вопросы для самостоятельного изучения.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1.Общая характеристика самостоятельной работы студента

Самостоятельная работа – это вид учебной деятельности, выполняемый учащимся без непосредственного контакта с преподавателем или управляемый преподавателем опосредованно через специальные учебные материалы; неотъемлемое обязательное звено процесса обучения, предусматривающее прежде всего индивидуальную работу учащихся в соответствии с установкой преподавателя или учебника, программы обучения.

На современном этапе самостоятельную работу студента следует разделить на работу с бумажными источниками информации, т.е. учебниками, методическими пособиями, монографиями, журналами и т.д. и электронными источниками информации, т.е. доступ к электронным ресурсам через Интернет.

Сегодня самостоятельную работу студента невозможно представить без использования информационной сети – Интернет. Необходимость использования Интернета возникает не только при подготовке к практическим и семинарским занятиям, но, в большей степени, при написании различных исследовательских и творческих работ. Многие современные монографии, периодические журналы изданы только в электронном виде и с ними можно познакомиться только в Интернете.

Цели и задачи самостоятельной работы: формирование способностей к самостоятельному познанию и обучению, поиску литературы, обобщению, оформлению и представлению полученных результатов, их критическому анализу, поиску новых и неординарных решений, аргументированному отстаиванию своих предложений, умений подготовки выступлений и ведения дискуссий.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Наименование компетенции		
Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-3 Способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов	ИД-1 _{ОПК-3} Определяет эффективность и надежность процессов и аппаратов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов	Использует знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ОПК-5 Способен использовать теорию основных процессов пищевых производств и движущих сил, под действием которых они протекают для организации и контроля производства продукции питания	ИД-2 _{ОПК-5} Определяет эффективность и надежность процессов и аппаратов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов	Осуществляет контроль и управление производства продукции питания с использованием нормативных и технических документов, норм действующего законодательства и требований стандартов

	ИД-2 _{ОПК-5} Контролирует производство продукции питания с использованием нормативных и технических документов, норм действующего законодательства и требований стандартов	
--	---	--

2. План - график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
5 семестр					
ОПК-3 (ИД-1) ОПК-5 (ИД-1; ИД-2;)	Самостоятельное изучение литературы по темам № 1-17	Собеседование	32,805	3,645	36,45
ОПК-3 (ИД-1) ОПК-5 (ИД-1; ИД-2;)	Подготовка к лабораторным занятиям	Отчёт (устный)	3,645	0,405	4,05
Итого за 5 семестр			36,45	4,05	40,5
Итого			36,45	4,05	40,5

3. Методические рекомендации по изучению теоретического материала

3.1. Вид самостоятельной работы: самостоятельное изучение литературы

Изучать учебную дисциплину «Процессы и аппараты пищевых производств» рекомендуется по темам, предварительно ознакомившись с содержанием каждой из них в программе дисциплины. При теоретическом изучении дисциплины студент должен пользоваться соответствующей литературой. Примерный перечень литературы приведен в рабочей программе

Для более полного освоения учебного материала студентам читаются лекции по важнейшим разделам и темам учебной дисциплины. На лекциях излагаются и детально рассматриваются наиболее важные вопросы, составляющие теоретический и практический фундамент дисциплины.

Итоговый продукт: конспект лекций

Средства и технологии оценки: Собеседование

Критерии оценивания: Оценка «отлично» выставляется студенту, если в полном объеме изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если достаточно полно изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, недостаточно если полно изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если отсутствуют знания и практические навыки по данной дисциплине.

Темы для самостоятельного изучения:

1. Классификация оборудования.	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
2. Методы исследования процессов и аппаратов.	
3. Перемещение в хлоридных средах.	
4. Осаждение.	
5. Флотирование.	
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

6. Классификация сыпучих материалов.

7. Измельчение: дробление.

8. Основные положения теории подобия

8. Измельчение: резание.
9. Особенности теплообмена в пищевой аппаратуре.
10. Нагревание и охлаждение твердых тел.
11. Выпаривание. Конденсация.
12. Адсорбция и абсорбция.
13. Сушка.
14. Кристаллизация и растворение.
15. Экстрагирование.
16. Биохимические процессы.
17. Практическое применение теории процессов и аппаратов.

3.2. Вид самостоятельной работы: подготовка к лабораторным занятиям

Итоговый продукт: отчет по лабораторной работе

Средства и технологии оценки: защита отчета

Критерии оценивания: Оценка «отлично» выставляется студенту, если в полном объеме изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если достаточно полно изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, недостаточно, если полно изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если отсутствуют знания и практические навыки по данной дисциплине

4. Методические указания

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств», направления подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания.

5. Методические указания по подготовке к экзамену

Процедура проведения **экзамена** осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

В экзаменационный билет включаются три вопроса (один вопрос для проверки знаний и два вопроса для проверки умений и навыков студента).

Для подготовки по билету отводиться 30 минут.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования справочными таблицами

При проверке лабораторного задания, оцениваются:

- знание параметра;
- последовательность и рациональность выполнения.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Список рекомендуемой литературы

Перечень основной литературы

1. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]; ред. А. Н. Остриков. - СПб. : ГИОРД, 2012. - 616 с.
2. Алексеев, Г. В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты пищевых производств" [Текст] : учеб. пособие / Г. В. Алексеев, И. И. Бриденко, Н. И. Лукин. - СПб.: "Лань", 2011. - 144 с.

Перечень дополнительной литературы:

1. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие/ А. Ф. Апальков - Ростов н/Д: Феникс, 2008.
2. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]. - СПб. : Изд-во РАПП, 2009. - 408 с.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. Электронно-библиотечная система IPRbooks
2. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека on-line»
3. Электронно-библиотечная система Лань

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022