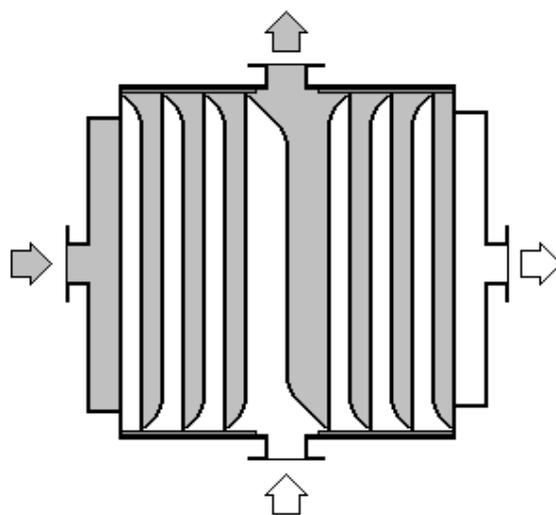


## ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

### **Часть II. Тепловые и массообменные процессы** Методические указания к лабораторным работам



Санкт-Петербург  
2005

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**Федеральное агентство по образованию**

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования

**"Санкт-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров"**

---

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
**Часть II. Тепловые и массообменные процессы**  
Методические указания к лабораторным работам

Факультет - автоматизированных систем управления  
технологическими процессами

- Специальности:
- 260300 – Технология химической переработки древесины
  - 250100 – Химическая технология органических веществ
  - 250500 – Химическая технология высокомолекулярных соединений
  - 072500 – Технология и дизайн упаковочного производства
  - 320700 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов
  - 170400 – Машины и оборудование лесного комплекса
  - 170500 – Машины и аппараты химических производств
  - 210200 – Автоматизация технологических процессов и производств ЦБП
  - 060800 – Экономика и управление на предприятии ЦБП

Санкт-Петербург  
2005

УДК 66.02/07 (076.5)

Процессы и аппараты химической технологии. Часть II.

Тепловые и массообменные процессы: Методические указания к лабораторным работам/ Сост. О.А.Кокушкин, В.С.Куров, М.В.Завьялов; Под ред. О.А.Кокушкина; СПб ГТУРП. СПб., 2005. 36 с.: ил. 7.

Во вторую часть методических указаний включены четыре лабораторных работы. Для каждой работы дано описание экспериментальной установки, методика проведения эксперимента, обработки опытных данных и выполнения расчета промышленной установки. Предназначаются для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата: 550800, 553500, 551800, 550900, 550200, 521500 и дипломированных специалистов: 655000, 655100, 656900, 656600, 651600, 655400, 657900 и 060000.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, Л.Н.Григорьев.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой процессов и аппаратов химической технологии ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол №2 от 2 ноября 2004 года).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета автоматических систем управления технологическими процессами ГОУВПО СПб ГТУРП (протокол № 6 от 11 января 2005 года)

© ГОУВПО Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2005

## РАБОТА №6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА ТРУБА В ТРУБЕ

Цель работы: сравнительная оценка коэффициента теплопередачи, вычисленного на основе экспериментальных данных и рассчитанного на основе теоретических уравнений.

#### Описание экспериментальной установки.

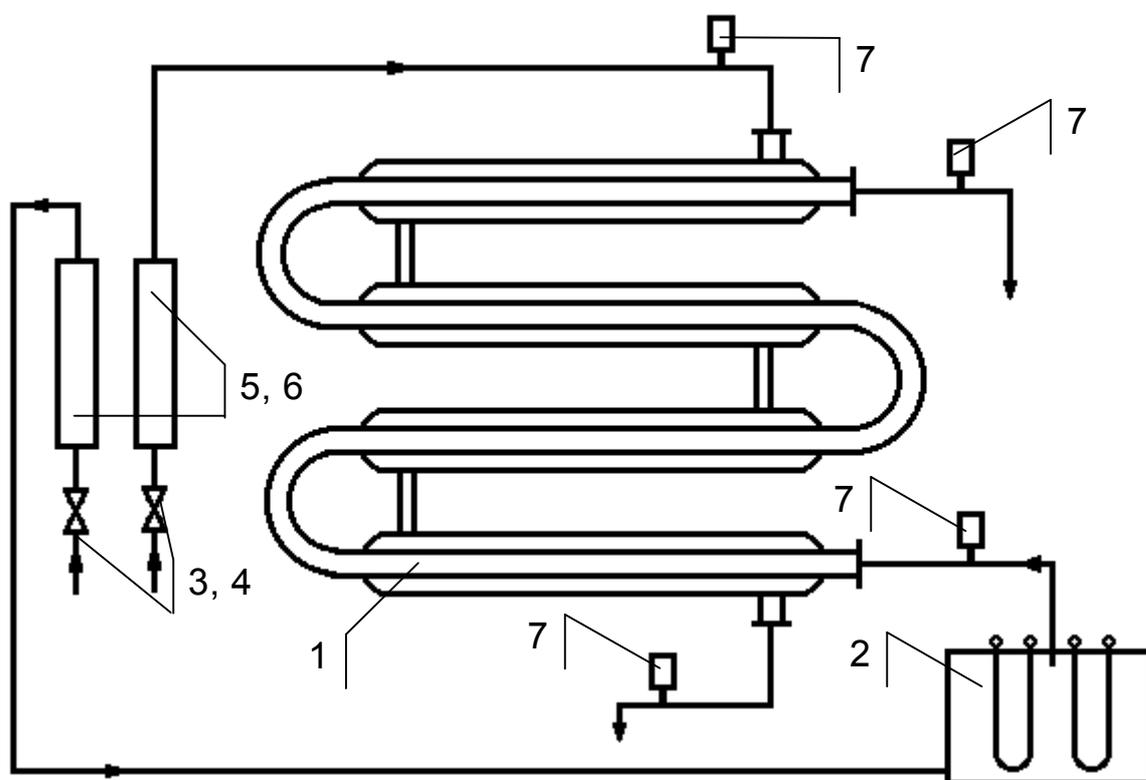


Рис.1. Схема экспериментальной установки:  
1- теплообменник типа “труба в трубе”, 2- электрический нагреватель;  
3, 4- вентили; 5, 6- ротаметры; 7- термометры

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из теплообменника 1 типа “труба в трубе”, электрического нагревателя 2 и контрольно-измерительных приборов.

Теплообменник состоит из четырех горизонтальных элементов, расположенных один над другим. Каждый элемент представляет собой две соосно расположенные трубы. Внутренние трубы соседних элементов соединены между собой калачами, а кольцевые пространства элементов - патруб-

ками. Материал труб - нержавеющая сталь. Общая рабочая длина поверхности теплообменника - 4 м.

Один поток воды из городского водопровода через ротаметр 5 поступает в электронагреватель 2, где его температура повышается на 15-35°C (в зависимости от расхода воды). Нагретая в электронагревателе 2 вода поступает во внутреннюю трубу диаметром 17×2\* нижнего элемента теплообменного аппарата, поднимаясь из одного элемента в другой по калачам, проходит все элементы теплообменника. Ее расход регулируется вентилем 3 и измеряется ротаметром 5 и должен составлять не менее 1,5 л/мин (10 делений по ротаметру).

Второй поток воды из городского водопровода поступает в верхний элемент теплообменника, движется по кольцевому сечению между внутренней и наружной трубами элемента и перетекает вниз из одного элемента в другой по патрубкам. Диаметр наружной трубы - 32×3. Расход холодного потока регулируют вентилем 4 и измеряют ротаметром 6.

Теплопередача происходит через стенку внутренней трубы. При этом холодный поток нагревается, а нагретый - охлаждается. Температура воды на входе и выходе каждого теплоносителя (нагретого и холодного потоков) измеряется термометрами 7.

#### Методика проведения работы

Для выполнения работы преподаватель задает значения расходов теплоносителей  $n_x$  и  $n_r$  в делениях по шкале ротаметров. По градуированному графику, который находится на установке, расходы теплоносителей из делений перевести в л/ч.

Открывая вентили 3 и 4, установить заданные расходы теплоносителей по показаниям ротаметров и включить электронагреватель. Отметить время начала эксперимента. Следить постоянно за показаниями ротаметров, поддерживая с помощью вентиля заданные расходы теплоносителей в течение всего времени проведения опыта. Колебания расходов теплоносителей не дают возможности быстро добиться установившегося режима работы теплообменника.

---

\* Первое число - наружный диаметр трубы, мм;  
второе число - толщина стенки трубы, мм.

Через 20÷25 минут определить по термометрам 7 и записать значения температур на входе и выходе каждого из теплоносителей. В дальнейшем значения температур снимают и записывают через каждые 5-6 минут. Опыт заканчивают (отключают нагрев и закрывают вентили), когда показания температур по любому из четырех термометров предыдущего и последующего замеров не изменяются. Это означает, что установка выведена на установившийся гидродинамический и тепловой режимы. Результаты наблюдений записывают в таблицу:

Холодный поток				Нагретый поток			
Расход		Температура, °С		Расход		Температура, °С	
$n_x$	$V_x$	$t_1$	$t_3$	$n_r$	$V_r$	$t_2$	$t_4$
делений	л/ч	на входе	на выходе	делений	л/ч	на входе	на выходе

#### Обработка опытных данных

Цель обработки данных - рассчитать экспериментальное значение коэффициента теплопередачи. Расчет ведут только по установившемуся режиму, т.е. по последней строке таблицы опытных данных в следующей последовательности.

Определить количество теплоты, которое нагретый теплоноситель передает холодному теплоносителю:

$$Q_r = G_r \cdot c_r \cdot (t_2 - t_4),$$

и количество теплоты, которое холодный теплоноситель принимает от нагретого при установившемся режиме работы установки;

$$Q_x = G_x \cdot c_x \cdot (t_3 - t_1),$$

где  $G_x$  и  $G_r$  - массовые расходы теплоносителей;

$c_x$  и  $c_r$  - их теплоемкости при средней температуре холодного и нагретого потоков.

Теплоемкости воды определить по таблице XXXIX [5].

Как Вы думаете, в чем причина, что  $Q_x$  не равно  $Q_r$ ? В дальнейших расчетах принимаем среднеарифметическое  $Q_{ср}$ .

Для расчета движущей силы теплопередачи (средней разности температур  $\Delta t_{ср}$ ) изобразите схему движения теплоносителей, проставьте на схеме

значения температур на входе и выходе каждого теплоносителя и в соответствии с пунктом 21, формулы 4.76 и 4.79 [5], рассчитайте  $\Delta t_{cp}$ .

Поверхность теплопередачи  $F$  рассчитать по среднему диаметру внутренней трубы, как поверхность цилиндра. Не забудьте, что теплообменник состоит из четырех горизонтальных элементов, длина каждого из которых равна 1 м.

Экспериментальное значение коэффициента теплопередачи  $K_3$  определить из основного уравнения теплопередачи (формула 4.72 [5]).

Сравните рассчитанное значение  $K_3$ , с его ориентировочными значениями в таблице 4.8 [5], сделайте вывод.

#### Расчет теоретического значения коэффициента теплопередачи

При теоретическом расчете коэффициента теплопередачи  $K_T$  необходимо вычислить значения коэффициентов теплоотдачи для холодного  $\alpha_x$  и нагретого  $\alpha_T$  потоков. Их находят из критерия Нуссельта, соответственно для холодного  $Nu_x$ , и нагретого  $Nu_T$  потоков. Выбор формулы для расчета критерия  $Nu$  определяется режимом движения жидкости, т.е. критерием Рейнольдса  $Re$ . Один из параметров, который необходимо знать при расчете  $Re$ , - средняя скорость потока жидкости. Поэтому расчет проводится для каждого из теплоносителей (холодного и нагретого) в следующей последовательности.

1. Рассчитать площади поперечного сечения потоков  $f_T$  и  $f_x$ . Для нагретого потока  $f_T$  определяется как площадь круга, диаметр которого равен внутреннему диаметру внутренней трубы элемента теплообменника. Для холодного потока  $f_x$  определяется как площадь кольца, через которое протекает холодный поток.
2. Рассчитать значения средних скоростей  $w_T$  и  $w_x$ , по формуле 1.17 [5], предварительно выразив найденные по градуировочному графику объемные расходы теплоносителей в единицах измерения системы СИ.
3. Применяя линейную интерполяцию, из таблиц VI и XXXIX [5] найти для воды при средних температурах нагретого  $t_T$ , и холодного  $t_x$  потоков значения коэффициентов: динамической  $\mu_T$  и  $\mu_x$  и кинематической  $\nu_T$  и  $\nu_x$  вязкости; теплопроводности  $\lambda_T$  и  $\lambda_x$ ; объемного расширения  $\beta_T$

и  $\beta_x$  и значения плотности  $\rho_g$  и  $\rho_x$ . Значения теплоемкости воды  $c_x$  и  $c_g$  найдены ранее. Из этих же таблиц найти значения  $\mu_{ст}$ ,  $\nu_{ст}$  и  $\lambda_{ст}$  для воды при температуре стенки  $t_{ст}$ , которая в данной установке определяется как среднеарифметическое значение из средних температур нагретого и холодного теплоносителей.

4. По формуле 4.13 [5] рассчитать критерии Рейнольдса  $Re_g$  и  $Re_x$  для нагретого и холодного потоков. Критерии Прандтля для нагретого  $Pr_g$ , и холодного  $Pr_x$  потоков, а также критерий  $Pr_{ст}$  для воды при температуре стенки  $t_{ст}$  рассчитать по формуле 4.12 [5], а критерии Грасгофа  $Gr_g$  и  $Gr_x$  по уравнению 4.15 [5], используя ранее найденные значения физико-химических констант при соответствующих температурах. Значения  $\Delta t$  в критерии  $Gr_g$  определяется как разность между средней температурой  $t_g$  нагретого потока и  $t_{ст}$ , а  $\Delta t$  для  $Gr_x$  берется как разность температур между  $t_{ст}$  и средней температурой холодного потока  $t_x$ . Определяющий геометрический размер в критериях подобия для нагретого потока - внутренний диаметр внутренней трубы, а для холодного - эквивалентный диаметр для кольца, которое является поперечным сечением холодного потока.

Рассчитанные значения критериев Прандтля можно проверить, найдя путем интерполяции из таблицы XXXIX [5]  $Pr_g$ ,  $Pr_x$  и  $Pr_{ст}$  соответственно при температурах  $t_g$ ,  $t_x$  и  $t_{ст}$ .

5. По рассчитанным критериям  $Re_g$  и  $Re_x$  устанавливаются режимы движения нагретого и холодного потоков и выбирают критериальные зависимости для расчета критериев Нуссельта  $Nu_g$  и  $Nu_x$ .

При  $Re < 3500$  расчет критерия  $Nu$  ведут по формуле 4.25 [5] или VII,45 [2]. При теплоотдаче в переходной области рекомендуется пользоваться графиком рис.4.1 [5]. При развитом турбулентном течении в прямых трубах и каналах справедливо критериальное уравнение 4.17 [5].

6. В соответствии с формулой 4.11 [5] рассчитать значения коэффициентов теплоотдачи для нагретого  $\alpha_g$  и холодного  $\alpha_x$  потоков.
7. По формуле 4.74 [5], раскрывая значение термического сопротивления стенки  $\tau_{ст}$  в соответствии с объяснениями к формуле 4.1 [5], рассчитать теоретическое значение коэффициента теплопередачи  $K_t$ . Значение ко-

эфициента теплопроводности для материала стенки (нержавеющая сталь) найти из таблицы XXVIII [5].

8. Рассчитать в процентах погрешность между коэффициентами теплопередачи  $K_3$  и  $K_T$ .

#### Контрольные вопросы

1. Как может распространяться теплота в газах, жидкостях и твердых телах?
2. Какое уравнение характеризует перенос теплоты в подвижных средах?
3. Как найти численное значение коэффициента теплопроводности? Каков его физический смысл?
4. В каких средах коэффициент теплопроводности имеет наибольшее, а в каких - наименьшее значение?
5. Какой процесс называют теплопередачей, а какой - теплоотдачей?
6. Каким уравнением определяется количество теплоты при теплоотдаче, а каким - при теплопередаче?
7. Как найти численное значение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи? Каков их физический смысл?
8. Почему при расчете коэффициентов теплоотдачи применяют теорию подобия?
9. Какой критерий при теплоотдаче является определяемым? Каков его физический смысл?
10. Какие критерии при теплоотдаче являются определяющими? Каков их физический смысл?
11. Как выбрать критериальное уравнение при расчете теплоотдачи?
12. Какой критерий входит в критериальное уравнение при ламинарном и отсутствует при турбулентном режиме движения жидкости? Почему?
13. Каков смысл отношения  $(Pr/Pr_{ст})$  в критериальных уравнениях?
14. Как рассчитать движущую силу теплопередачи при переменной разности температур теплоносителей?
15. Какое направление движения теплоносителей в теплообменнике предпочтительно и почему?
16. Как определить термическое сопротивление стенки при теплопередаче?

17. Как рассчитать количество теплоты, отдаваемое или принимаемое теплоносителями?
18. Какие теплообменные аппараты называют рекуператорами, регенераторами и теплообменниками смешения?
19. Как устроен и работает кожухотрубный теплообменник?
20. В чем достоинства (за счет чего они достигаются) и недостатки многоходовых кожухотрубных теплообменников по сравнению с одноходовыми?
21. Какие виды кожухотрубных теплообменников применяют для компенсации температурных расширений?
22. Как устроены и работают спиральные теплообменники? Почему спиральные теплообменники для системы "жидкость-жидкость" не применяют для системы "жидкость-пар"? В чем их отличие?
23. Как устроен и работает пластинчатый теплообменник? Почему при штамповке пластин их поверхность выполняют рифленой?

#### Библиографический список

[1], с.241-244; 252-254; 290-299; 308-319.

[2], с.260-265; 275-277; 296-298; 311-318; 326-335.

[3], с.265-268; 323-336.

[4], с.161-166; 177-188.

[5], глава 4 и справочные данные по таблицам VI, XXVIII и XXXIX.

## **РАБОТА №7**

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ

#### ВЫПАРНОГО АППАРАТА

*Цель работы:* исследование работы выпарной установки однократного действия, экспериментальное определение и теоретический расчет количества выпариваемой воды, сравнительная оценка коэффициентов теплопередачи и удельных расходов греющего пара при нагреве и кипении раствора.

## Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.2) состоит из выпарного аппарата с естественной циркуляцией раствора, парогенераторов 1, поверхностного конденсатора 5, сборника конденсата 6, вакуум-насоса 7, вспомогательного оборудования и контрольно-измерительных приборов.

Основные части выпарного аппарата: вынесенная греющая камера 2, в которой происходит нагрев и кипение раствора, сепаратор 3, предназначенный для отделения вторичного пара от раствора, и циркуляционная труба 4. Греющая камера 2 представляет собой вертикальный теплообменный аппарат типа "труба в трубе", а конденсатор вторичного пара 5 - кожухотрубчатый теплообменник.

Поверхность теплообмена  $F$  греющей камеры  $0,04 \text{ м}^2$ .

Обогрев греющей камеры 2 производится паром, поступающим из парогенераторов 1. Конденсат из кольцевого пространства греющей камеры непрерывно самотеком возвращается в парогенераторы. Таким образом, в парогенераторах обеспечивается постоянный уровень воды и поддерживается оптимальный уровень конденсата в греющей камере.

Установка работает под вакуумом, создаваемым при конденсации вторичного пара в конденсаторе 5. Неконденсируемые газы (воздух) отводятся через сборник конденсата 6 вакуум-насосом 7.

На установке выпаривают растворы хлористого натрия начальной концентрации от 2 до 7% (масс.). При такой концентрации раствора отложения накипи на внутренней поверхности греющей камеры практически отсутствуют, а расчет теплового баланса упрощается, так как теплотой гидратации можно пренебречь.

Установка работает периодически. Заполнение выпарного аппарата раствором соли перед началом и слив упаренного раствора по окончании опыта производится через кран 8. Охлаждающую воду в межтрубное пространство теплообменника-конденсатора подают из водопроводной сети.

Давление греющего пара в греющей камере и разрежение в сепараторе измеряют, соответственно, манометром и вакуумметром. Температура раствора в аппарате измеряется термометром.

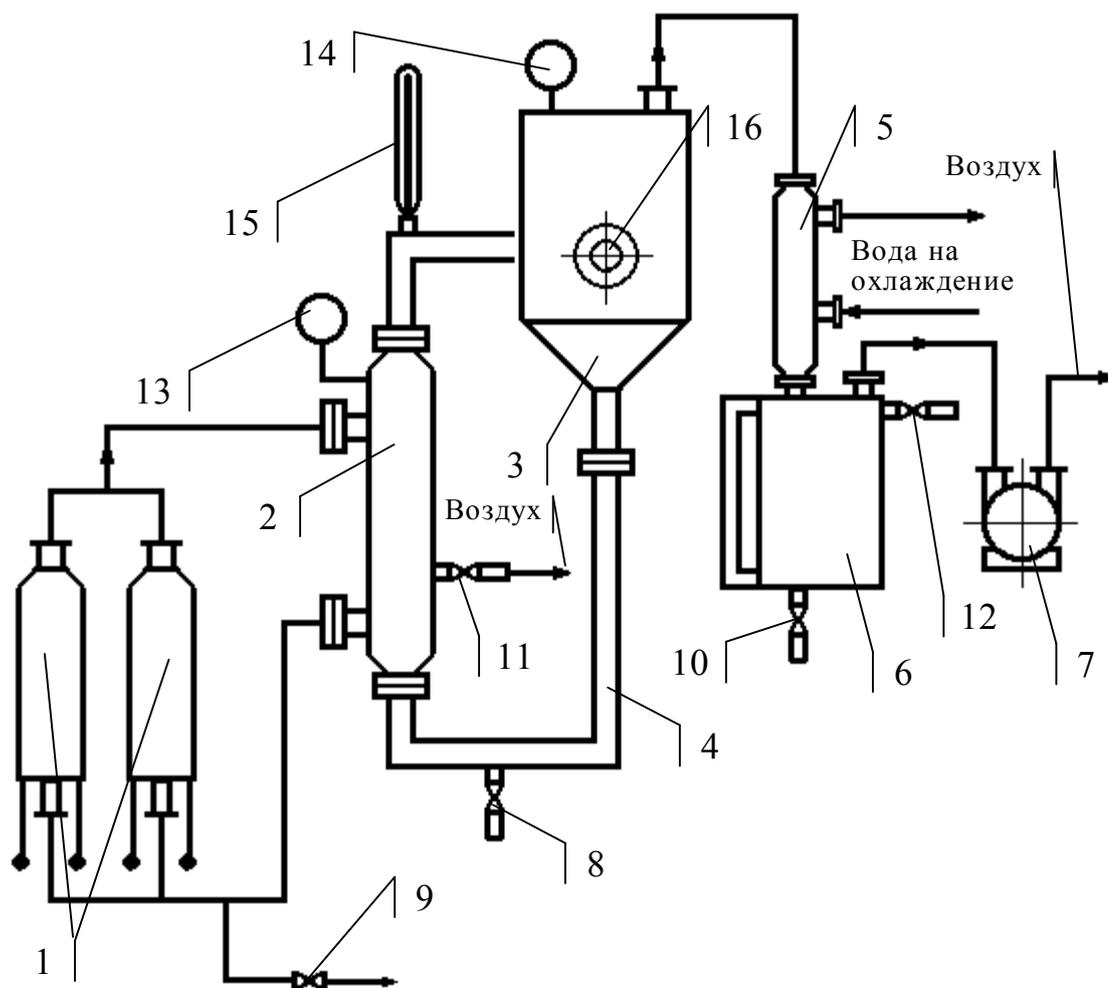


Рис.2. Схема экспериментальной установки:  
 1- парогенераторы; 2- греющая камера; 3- сепаратор; 4- циркуляционная труба; 5- конденсатор; 6- сборник конденсата; 7- вакуум-насос; 8, 9, 10, 11, 12- краны; 13- манометр; 14- вакуумметр; 15- термометр; 16- смотровое окно

### Методика проведения работы

Перед началом работы необходимо:

- ⇒ проверить уровень воды в парогенераторах. В случае необходимости через кран 9 заполнить парогенераторы до указанного на установке уровня;
- ⇒ убедиться в отсутствии конденсата в сборнике 6;
- ⇒ закрыть краны 8, 10, 11 и 12;
- ⇒ определить и записать объем исходного раствора. В случае необходимости приготовить раствор по указанию преподавателя;
- ⇒ отобрать исходный раствор в мерный цилиндр, довести его темпера-

туру до 15°C и ареометром измерить плотность исходного раствора. Записать значение плотности. Раствор из мерного цилиндра слить в емкость исходного раствора.

Пуск установки в работу производить в следующей последовательности:

1. Опустить гибкий шланг в емкость с исходным раствором.
2. Включить подсветку смотрового окна.
3. Открыть кран 8.
4. Включить вакуум-насос и за счет создаваемого в сепараторе разрежения заполнить аппарат раствором. Когда весь раствор из емкости поступит в аппарат, закрыть кран 8. Вакуум-насос продолжает работать.
5. Открыть кран (на схеме не показан) на линии охлаждающей воды на конденсатор 5.
6. Включить парогенераторы и, заметив время начала работы установки, снять по термометру 15 значение температуры исходного раствора в аппарате, а по вакуумметру 14 значение разрежения в сепараторе. Записать все значения в соответствующие столбцы таблицы наблюдений. По достижении максимального разрежения в сепараторе вакуум-насос можно отключить.

Наблюдая за показаниями термометра через каждую минуту от начала работы установки, определить время начала нагрева раствора  $\tau_{\text{нн}}$ . В дальнейшем, наблюдая за уровнем конденсата сокового пара, определить время начала отбора конденсата, которое будет соответствовать времени начала кипения раствора  $\tau_{\text{нк}}$ .

В процессе выполнения работы через каждые 5 минут измерять давление греющего пара по манометру 13, разрежение в сепараторе по вакуумметру 14, температуру раствора по термометру 15 и объем конденсата в сборнике 6.

В течение первых 10÷15 минут работы установки через каждые 1,5÷2 минуты производить сдувку неконденсируемого газа (воздуха) из кольцевого пространства греющей камеры с помощью крана 11. Слив конденсата (воды) из крана 11 в процессе сдувки недопустим. Вакуум-насос включается также периодически на 20÷30 секунд.

Последний замер данных (через 5 минут) производится, когда объем конденсата в сборнике 6 станет примерно равным объему конденсата, заданному преподавателем. После чего отключить парогенераторы и подсветку смотрового окна. Постепенно открывая кран 12, сбросить вакуум в выпарном аппарате. Через кран 8 слить упаренный раствор в приемную емкость. Отобратить в мерный цилиндр часть упаренного раствора, охладить его до 15°C и ареометром измерить плотность. После чего уточнить объем отобранного конденсата вторичного пара и через кран 10 слить его в приемную емкость.

Исходные данные и результаты наблюдений записывать в таблицу:

- объем исходного раствора -  $V_n, \text{ м}^3$ ;
- плотность исходного раствора -  $\rho_n, \text{ кг/м}^3$ ;
- плотность упаренного раствора -  $\rho_k, \text{ кг/м}^3$ .

Время от начала работы установки	Температура раствора,	Давление греющего пара	Разрежение в сепараторе	Объем отобранного конденсата
$\tau, \text{ мин}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_{\text{изб}}^*, \text{ ат}$	$B^*, \text{ ат}$	$V, \text{ л}$

\* - размерности  $p_{\text{изб}}$  и  $B$  уточнить в соответствии с градуировкой приборов.

#### Обработка опытных данных

1. По измеренным значениям плотности исходного  $\rho_n$  и упаренного  $\rho_k$  раствора по таблице L [5], применяя линейную интерполяцию, определить концентрацию соли в исходном  $x_n$  и упаренном  $x_k$  растворах.
2. По уравнению 5.3 [5] материального баланса процесса выпаривания вычислить теоретическое значение массы воды  $W_T$ , которую необходимо удалить из раствора соли для изменения его концентрации от  $x_n$  до  $x_k$ , и сравнить ее с массой конечного объема, конденсата вторичного пара  $W_k$ . Погрешность эксперимента составит  $\varepsilon = [(W_T - W_k) / W_k] \cdot 100 \%$ . Необходимое для расчета значение  $G_n$  можно вычислить, зная объем исходного раствора  $V_n$  и его плотность  $\rho_n$ .
3. По уравнению 5.5 [5] теплового баланса выпарного аппарата рассчитать расход теплоты на процесс выпаривания в лабораторной установке. При этом, первое слагаемое правой части уравнения представляет

собой количество теплоты  $Q_n$ , затраченное на нагрев раствора до конечной температуры его кипения в аппарате; второе слагаемое - количество теплоты  $Q_k$ , затраченное на образование и удаление из раствора  $W_k$  вторичного пара; а третье слагаемое - потери теплоты  $Q_{пот}$  в окружающую среду за счет теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией.

Значение теплоемкости  $c_n$  исходного раствора рассчитывают по уравнению 5.10 [5]. Энтальпию вторичного пара  $i_{вт}$  определяют, применяя линейную интерполяцию, по таблице LVII [5], рассчитав предварительно абсолютное давление в сепараторе  $p_c = p_{ат} - B$ , где  $p_{ат}$  - атмосферное давление, а  $B$  - показание вакуумметра в конце эксперимента. Для перевода давления  $p_{ат}$  в требуемую размерность воспользуйтесь таблицей LVIII [5]. Значение теплоемкости воды  $c_v$  находят по таблице XXXIX [5] по температуре раствора в конце опыта  $t_k$ . Расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду  $Q_{пот}$  принять равным 5% от суммы  $(Q_n + Q_k)$ .

4. Продолжительность нагрева раствора в аппарате составит:

$\Delta\tau_n = \tau_{нк} - \tau_{нн}$ , а продолжительность кипения раствора  $\Delta\tau_k = \tau_k - \tau_{нк}$ , где  $\tau_k$  - время окончания проведения эксперимента.

5. По уравнению 5.7 вычислить:

- расход греющего пара за рабочий период установки  $\tau_p = \Delta\tau_n + \Delta\tau_k$ .

Расход теплоты на выпаривание определяется уравнением 5.5 [5];

- расход греющего пара за период кипения раствора. Расход теплоты в этом случае определяется только вторым слагаемым правой части уравнения 5.5 [5].

В обоих случаях удельную теплоту конденсации  $r_{гп}$  находят по табл. LVII [5] по абсолютному давлению греющего пара  $p_{гп} = p_{ат} + p_{изб}$ , где  $p_{изб}$  - показание манометра в конце эксперимента. Вместо сухости греющего пара  $x$  может быть задана его влажность  $w_{гп}$ . Связь между ними определяется зависимостью  $x = 1 - w_{гп}$ .

6. По уравнению 5.8 [5] рассчитать удельные расходы греющего пара за рабочий период и за период кипения раствора. Рассчитанное значение за период кипения сравнить с литературными данными для однократного выпаривания.

7. Рассчитать коэффициент теплопередачи для периода нагрева раствора

$$k_H = \frac{Q_H}{(F \Delta t_{cp} \Delta \tau_H)},$$

где  $Q_H$  - количество теплоты, затраченное на нагрев раствора (см. пункт 3);  $F$  - поверхность теплообмена греющей камеры (см. описание экспериментальной установки);  $\Delta t_{cp}$  - средняя движущая сила теплопередачи для периода нагрева раствора;  $\Delta \tau_H$  - продолжительность работы установки в данном периоде.

Для вычисления  $\Delta t_{cp}$  требуется по табл. LVII [5] зная  $p_{гп}$  (см. пункт 5), определить температуру греющего пара  $t_{гп}$ ; рассчитать движущую силу на концах теплообменника (греющей камеры);

$$\Delta t_1 = t_{гп} - t_H; \Delta t_2 = t_{гп} - t_K,$$

где  $t_H$ ;  $t_K$  - соответственно начальная температура раствора и температура кипения раствора.

Найти  $\Delta t_{cp}$  в соответствии с формулами 4.78 или 4.79 [5].

8. Рассчитать коэффициент теплопередачи для периода кипения раствора

$$k_K = \frac{Q_K}{(F \Delta t_{п} \Delta \tau_K)},$$

где  $Q_K$  - количество теплоты, затраченное на образование и удаление из раствора вторичного пара (см. пункт 3);  $\Delta t_{п} = t_{гп} - t_K$  - полезная разность температур (движущая сила) процесса выпаривания;  $\Delta \tau_K$  - продолжительность кипения раствора.

9. Сравнить рассчитанные значения коэффициентов теплопередачи между собой.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое выпаривание?
2. Из каких основных частей состоит выпарной аппарат? Какое их назначение?
3. Что является движущей силой процесса выпаривания?
4. В чем преимущества водяного пара как теплоносителя? В чем его недостаток?

5. Как найти физико-технические характеристики пара?
6. В чем состоят преимущества выпаривания под вакуумом?
7. Почему в процессе выпаривания различают общую и полезную разности температур?
8. Что такое температурные потери при выпаривании? Какие виды температурных потерь существуют? От чего они зависят?
9. Какие уравнения материального баланса применяют при расчете выпаривания?
10. Какие слагаемые входят в уравнение теплового баланса выпаривания?
11. С какой целью в промышленности применяют многокорпусные выпарные установки?
12. Какие схемы многокорпусного выпаривания используют в промышленности? В чем их достоинства и недостатки?
13. От чего зависит оптимальное число корпусов в многокорпусной установке?
14. Для чего служит и как устроен барометрический конденсатор?
15. Каково назначение вакуум-насоса?
16. Какие конструкции выпарных аппаратов применяют в промышленности?
17. С какой целью в выпарных аппаратах устанавливают циркуляционный насос? Какой тип насоса применяют?
18. За счет чего можно уменьшить образование накипи в выпарных аппаратах?
19. Сколько ступеней сепарации в выпарном аппарате? Как обеспечивается первая ступень сепарации в выпарном аппарате с вынесенной греющей камерой?

#### Библиографический список

- [1], с.321-329; 341-342; 350-352; 354-355; 359-367.
- [2], с.339; 347-357; 362-372; 373-374; 376-377.
- [3], с.385-395; 401-403; 413-415.
- [4], с.202-219.
- [5], глава 5 и справочные данные по табл. XXXIX, L , LVI , LVII и LVIII.

## РАБОТА №8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА И ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

Цель работы: расчет и определение по диаграмме Л.К.Рамзина свойств влажного воздуха по экспериментально найденным двум его параметрам; практическое применение диаграммы Л.К.Рамзина для расчета процесса сушки.

#### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из психрометра и барометра для измерения атмосферного давления.

Статический психрометр Августа имеет два термометра, шарик одного из которых обмотан влажной тканью, впитывающей в себя воду из резервуара, расположенного ниже шарика термометра. Воздух у поверхности ткани неподвижен.

#### Методика проведения работы

Перед началом работы необходимо проверить наличие воды в резервуаре психрометра Августа, в случае необходимости налить воду комнатной температуры с помощью пипетки. Визуально убедиться, что ткань у шарика термометра влажная.

Измерение температур сухого и мокрого термометров производить не менее трех раз через 5-10 минут между каждыми измерениями. Первый замер по психрометру Августа производить не ранее, чем через 10 минут после увлажнения ткани. Для расчета используют установившиеся значения температур.

В промежутках между замерами по психрометру также не менее трех раз измеряют атмосферное (барометрическое) давление.

Результаты наблюдений заносят в таблицу:

№ п/п	Температура по термометрам психрометра Августа, $t, ^\circ\text{C}$ .		Относительная влажность по психрометрической таблице, $\varphi$	Барометрическое давление
	сухого	мокрого		
			%	мм.рт.ст.
1				
2				
3				

### Обработка опытных данных

1. По установившимся значениям температур психрометра Августа определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице, которая находится на стенде.
2. По установившимся значениям температур психрометра Августа рассчитать влагосодержание воздуха  $x_0$ , его относительную влажность  $\varphi_0$ , парциальное давление водяного пара  $p_{\text{п}}$ , энтальпию  $J_0$  и найти температуру точки росы  $t_p$ .

С этой целью рассчитать влагосодержание воздуха при температуре мокрого термометра  $t_m$  по уравнению, которое получается из зависимости 10.5 [5] при  $\varphi=1$ :

$$x_m = \frac{0,622 p'_{\text{нас}}}{(\Pi - p'_{\text{нас}})},$$

где  $p'_{\text{нас}}$  - давление насыщенного водяного пара при температуре мокрого термометра  $t_m$  по данным таблицы XXXVIII [5],  $\Pi$  - барометрическое давление.

С учетом аналогии между процессами тепло- и массообмена у шарика мокрого термометра, влагосодержание воздуха при температуре сухого термометра  $t$  определяется уравнением

$$x_0 = \frac{r_m x_m - c_B (t - t_m) \cdot \varepsilon}{r_m + c_{\text{п}} (t - t_m) \cdot \varepsilon},$$

где  $r_m$  - удельная теплота парообразования, которую находят при температуре мокрого термометра  $t_m$  по таблице LVI [5];

$c_{в}=1,01$  кДж/(кг·К)- средняя удельная теплоемкость сухого воздуха;  
 $c_{п}=1,97$  кДж/(кг·К)- средняя удельная теплоёмкость водяного пара;  
 $\varepsilon$  - поправочный коэффициент, учитывающий наличие теплового потока к поверхности испарения за счет излучения, значение которого находят по графику рис. 4 для неподвижного воздуха.

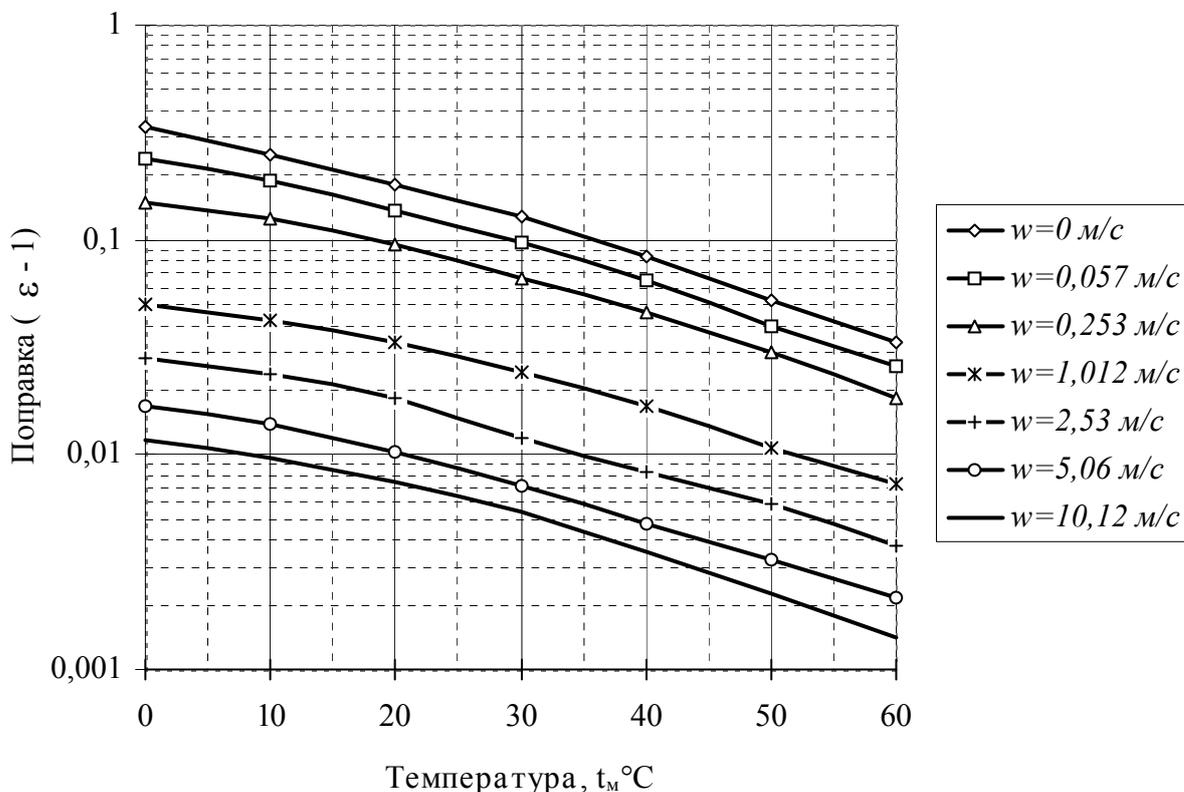


Рис.3. Зависимость поправочного коэффициента  $\varepsilon$  от скорости воздуха

По рассчитанному значению  $x=x_0$  из формулы 10.5 [5] выразить и рассчитать значение относительной влажности воздуха  $\varphi$ , а из формулы 10.6 [5] рассчитать парциальное давление  $p_{п}$  водяного пара в воздухе. Значение давления насыщенного водяного пара  $p_{нас}$  по температуре сухого термометра  $t$  находят по данным таблицы XXXVIII [5]. Из этой же таблицы по рассчитанному значению  $p_{п}$  найти температуру точки росы  $t_p$ .

Энтальпию влажного воздуха  $J_0$  рассчитать по уравнению 10.7 [5].

3. По установившимся значениям температур психрометра Августа на диаграмме Л.К.Рамзина найти точку А, характеризующую параметры воздуха в лаборатории. Для этого, как показано на рис.4, провести

изотермы сухого  $t$  и мокрого  $t_m$  термометров. Через точку пересечения изотермы мокрого термометра с линией насыщенного воздуха провести линию  $J = \text{const}$ . Точка пересечения этой линии с изотермой сухого термометра является искомой точкой  $A$ .

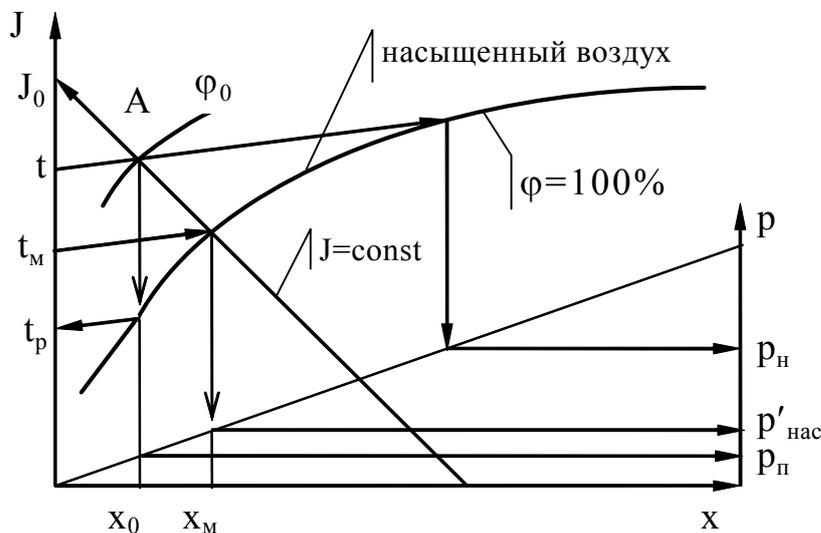


Рис.4. Определение параметров исходного воздуха по значениям температур  $t$  и  $t_m$

В точке  $A$  определить (см. рис. 4):

- влагосодержание  $x_0$ . Для этого из точки  $A$  провести линию  $x = \text{const}$  до пересечения с осью  $x$ ;
- энтальпию  $J_0$ . Для этого продолжить линию  $J = \text{const}$ , проходящую через точку  $A$ , до оси  $J$ ;
- относительную влажность  $\varphi_0$ ;
- температуру точки росы  $t_p$ . Для этого найти точку пересечения линии  $x_0 = \text{const}$ , проходящей через точку  $A$ , с линией насыщенного водяным паром воздуха. Изотерма, проходящая через точку пересечения этих линий, и определяет температуру точки росы;
- парциальное давление водяного пара в воздухе  $p_{п}$ . Для этого найти точку пересечения линии  $x_0 = \text{const}$ , проходящей через точку  $A$ , с линией парциального давления водяного пара и через эту точку провести линию, параллельную оси  $x$  до пересечения с осью парциального давления (правый нижний угол диаграммы Рамзина);
- давление насыщенного пара при температурах  $t$  и  $t_m$ . Для этого продолжить изотермы  $t$  и  $t_m$  до пересечения их с линией насыщенного водяным

паром воздуха и из точки пересечения провести линии  $x = \text{const}$  до пересечения с линией парциального давления водяного пара.

4. Для сопоставления данных п.2 и п.3 составить таблицу:

Физические параметры влажного воздуха	Численные значения параметров							
	$X_M$	$X_0$	$J_0$	$\varphi_0$	$p_{п}$	$t_p$	$p_H$	$p'_H$
	кг пара/кг с.в.		кДж/кг с.в.	%	мм.рт.ст.	°С	мм.рт.ст.	мм.рт.ст.
Рассчитанные по формулам п.2 и найденные по таблицам								
Определенные по диаграмме Л.К.Рамзина								

### Расчет расхода воздуха, теплоты и пара при конвективной сушке материала

Для расчета процесса конвективной сушки, принципиальная схема которой изображена на рис.5, преподаватель задает индивидуальное задание, которое состоит из следующих данных:

- производительность сушилки либо по материалу, поступающему на сушку -  $G_H$ , либо по высушенному материалу -  $G_K$ , либо по абсолютно сухому материалу -  $G_C$ ;
- влажность материала на входе в сушилку -  $u_H$  или  $u'_H$  и на выходе из нее -  $u_K$  или  $u'_K$ , где  $u$  - влажность материала от общей его массы,  $u'$  - влажность материала в расчете на массу сухого вещества;
- температура воздуха после калорифера -  $t_1$ ;
- параметр, характеризующий отличие реального процесса сушки от идеального -  $\Delta$ ;
- относительная влажность воздуха на выходе из сушильной камеры -  $\varphi_2$ ;
- давление греющего пара в калорифере -  $p_{гп}$ ;
- влажность греющего пара -  $w_{гп}$ .

Расчет проводить с применением диаграммы Рамзина в следующей последовательности.

1. Построить линию нагрева воздуха в калорифере - линия АВ рис.6. При этом считать, что в калорифер 1 (рис.5) поступает воздух, параметры которого определены в соответствии с показаниями психромет-

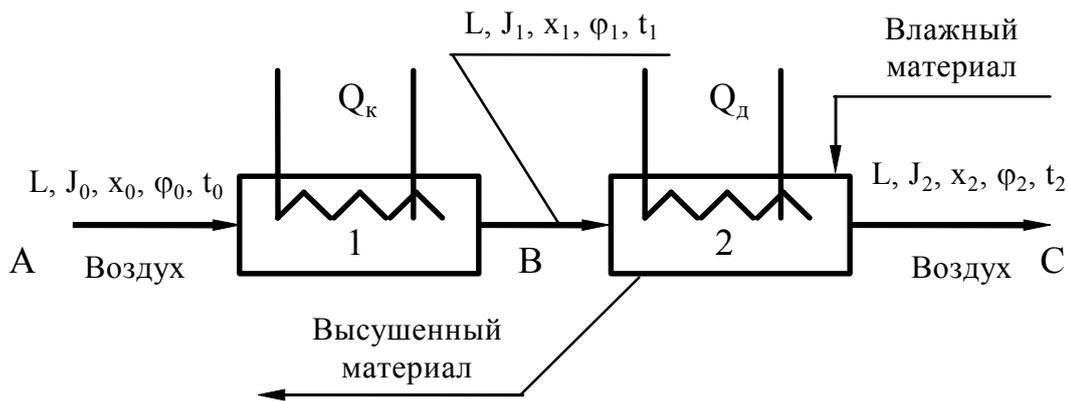


Рис.5. Принципиальная схема конвективной сушки:

1-калорифер; 2-сушильная камера;  $Q_k$  -теплота, подводимая к воздуху в калорифере;  $Q_d$  - дополнительная теплота, подводимая к воздуху в сушильной камере;  $L$  -расход сухого воздуха;  $J, x, \phi, t$  -энтальпия, влагосодержание, относительная влажность и температура воздуха на различных участках процесса сушки

ра Августа, а его состояние характеризуется точкой А на диаграмме Рамзина (рис.4 и 6). Из точки А по линии  $x_0 = \text{const}$  провести прямую линию до пересечения с изотермой  $t_1$ . Точка В характеризует состояние воздуха на выходе из калорифера, т.е. перед поступлением его в сушильную камеру. Определить в точке В влагосодержание  $x_1$ , и энтальпию  $J_1$ , влажного воздуха. При этом  $x_1 = x_0$ .

- Учитывая заданное значение  $\Delta$ , построить на диаграмме Рамзина линию ВС (рис.6), характеризующую изменение параметров влажного воздуха в реальной сушильной установке. Для этого, задаваясь значением  $x > x_0$  в пределах от 0,015 до 0,025 кг пара/кг сухого воздуха, рассчитать значение  $J$  из уравнения

$$J = J_1 + \Delta(x - x_0).$$

Пересечение линий  $x = \text{const}$  и  $J = \text{const}$ , отвечающих произвольно выбранному значению  $x$  и рассчитанному при этом  $x$  значению  $J$ , определяет на диаграмме Рамзина промежуточную точку  $C'$  (рис.6), лежащую на линии ВС реального процесса сушки.

Точка  $C'$ , в зависимости от знака  $\Delta$ , располагается на диаграмме выше или ниже линии  $J_1 = \text{const}$ . Это следует учесть при оформлении схемы определения параметров воздуха по диаграмме Рамзина к отчету по работе. На рис.6 представлена схема графического построения при положительном  $\Delta$ .

Проводя через точки В и С' прямую линию до пересечения с заданным значением  $\varphi_2$ , находим на диаграмме положение точки С, которая характеризует состояние воздуха на выходе из сушилки. В точке С определить значения влагосодержания  $x_2$  и энтальпии  $J_2$  влажного воздуха.

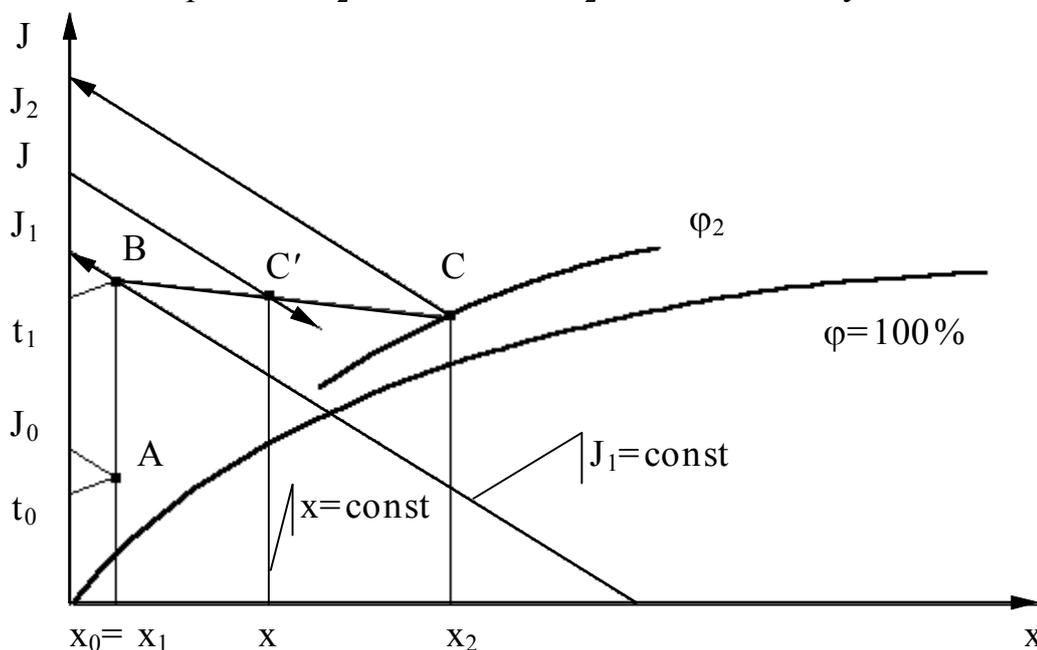


Рис.6. Схема определения параметров влажного воздуха по диаграмме Рамзина, в конвективной сушильной установке при  $\Delta > 0$

- Используя характеристики воздуха, найденные по диаграмме Рамзина в точках А, В и С, рассчитать по формуле 10.14 [5] удельный расход  $l$  сухого воздуха на сушку материала и по формуле 10.18 [5] удельный расход теплоты  $q_k$  на нагрев воздуха в калорифере 1 (рис.5). Сравнить это значение  $q_k$  со значением, рассчитанным по уравнению  $q_k = l \cdot (J_2 - J_0) - \Delta$ . Если расхождение между ними не более 5%, то в дальнейших расчетах использовать среднее между ними. В противном случае проверить свою работу по диаграмме Рамзина.
- Рассчитать удельный расход греющего пара для нагрева воздуха в калорифере 1:

$$d_k = \frac{q_k}{r \cdot (1 - w_{гп})}$$

где  $r$  - удельная теплота парообразования, определяемая по таблице LVII [5] по заданному давлению греющего пара  $p_{гп}$ .

5. Выбирая необходимые для расчета формулы из уравнений 10.1, 10.2 и 10.3 [5], в зависимости от способа задания производительности сушилки и влажности материала, рассчитать количество влаги  $W$ , удаляемой из материала в процессе сушки.
6. Рассчитать расход воздуха на сушку и расходы теплоты и греющего пара в калорифере по уравнениям:

$$L=l \cdot W; \quad Q_k=q_k \cdot W; \quad D_k=d_k \cdot W.$$

7. По формуле 10.12 [5] рассчитать удельный объем влажного воздуха  $v_{уд}$  с параметрами, отвечающими параметрам воздуха в лаборатории, и его объемный расход по уравнению  $V=L \cdot v_{уд}$ .

К отчету о выполненной работе приложить схемы работы по диаграмме Рамзина (без масштабов по осям) с простановкой численных значений, которые были определены или использованы при работе с диаграммой.

#### Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется влажный воздух?
2. Как пользоваться диаграммой Рамзина для определения различных параметров влажного воздуха?
3. Какой из основных параметров влажного воздуха не определяется по диаграмме Рамзина?
4. По показаниям каких приборов и как можно найти относительную влажность воздуха?
5. На что расходуется теплота воздуха в сушильной камере?
6. В чем отличие идеального (теоретического) и реального процессов сушки? Как они изображаются на диаграмме Рамзина?
7. Почему параметр  $\Delta$  может принимать положительные и отрицательные значения?
8. Как определить удельные и общие расходы воздуха, теплоты и греющего пара на сушку материала?
9. Как обеспечить более мягкие условия сушки в сушильной установке? Как эти варианты сушки изображаются на диаграмме Рамзина?
10. Отличаются ли удельные расходы воздуха и тепла, на сушку по основному варианту и по вариантам с более мягкими условиями процесса сушки?

## Библиографический список

[1], с.452-465.

[2], с.583-590, 593-607.

[3], с.649-664.

[4], с.300-308.

[5], Глава 10 и справочные данные по таблицам XXXVIII, LVI, LVII

## **РАБОТА №9**

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

Цель работы: провести анализ построенных на основе экспериментальных данных графиков кривой сушки и скорости сушки, применить экспериментальные данные для расчета ленточной сушилки полотна целлюлозы.

#### Описание экспериментальной установки

Сушка образца целлюлозы проводится в конвективной сушилке шкафного типа. Поток воздуха через сушилку создается вентилятором, расположенным в нижней части сушильного шкафа. Над вентилятором вмонтирован электрический нагреватель, состоящий из двух открытых спиралей: основной и дополнительной. Дополнительный нагреватель применяется только для более быстрого достижения заданного температурного режима сушки. В процессе проведения эксперимента дополнительный нагреватель всегда отключен. В электрическую цепь основного нагревателя включен регулятор температуры с контактным термометром, позволяющий устанавливать и поддерживать в сушильном шкафу заданную температуру воздуха при проведении эксперимента путем отключения или включения основного нагревателя.

Внутри сушильного шкафа имеется чаша для испытуемого образца целлюлозы, связанная рычажным устройством и оптической системой со шкалой для определения показания веса образца. Для снятия показания веса образца тумблер на сушильном шкафу следует переключить на освещение шкалы. На одной оси с внутренней чашей расположена внешняя чаша,

которая предназначена для установки нулевого положения весов перед началом эксперимента.

### Методика проведения работы

Перед началом работы необходимо проверить правильность установки нуля на шкале указателя веса. Для этого включить тумблер "сеть". При этом включении начинает работать вентилятор. Тумблер "освещение шкалы" переключить в левое положение. При этом прекращается работа вентилятора и освещается шкала. Если весовое устройство не сбалансировано, то изменением массы гирь на внешней чаше подвести нуль к стрелке указателя веса. Установив нуль, тумблер "освещение шкалы" переключить в правое положение. При этом снова начинает работать вентилятор.

Для автоматического поддержания постоянной температуры сушки вращением магнитной головки контактного термометра установить его контакт на уровне заданной температуры. После чего включить тумблер "основной нагрев". Положив образец целлюлозы заданных размеров ( $a \times b$ ) на внешнюю чашу весов, определить его вес в воздушно-сухом состоянии  $G_{вс}$ .

Пока в сушильном шкафу устанавливается заданная температура, взвешенный образец целлюлозы поместить для увлажнения в ванночку с водой. Через 10 минут образец вынуть из ванночки и фильтровальной бумагой с его поверхности аккуратно (не выжимая) удалить внешнюю влагу.

Убедившись (по периодическим включениям и выключениям сигнальной лампочки), что в сушильном шкафу поддерживается заданная температура, влажный образец помещают на внутреннюю чашу весов, плотно закрывают дверцу шкафа и, переключив тумблер "освещение шкалы" в левое положение, быстро фиксируют вес образца  $G_0$ . После чего тумблер "освещение шкалы" снова переключают в правое положение. Одновременно со взвешиванием образца включают секундомер. В дальнейшем через заданные промежутки времени фиксируют вес высушиваемого образца  $G_i$  и время сушки  $\tau_i$ .

*Внимание! Время переключения тумблера на "освещение шкалы" при каждом определении веса образца должно быть по возможности*

минимальным (не более 3 секунд), так как переключение тумблера на "освещение шкалы" прерывает работу вентилятора, нарушая условия процесса сушки. Заранее определите цену деления шкалы!

Сушку проводить до постоянного веса образца  $G_p$ - это вес образца в условиях равновесия с окружающим воздухом. Первое значение времени, при котором перестает изменяться вес образца, отвечает времени достижения равновесного состояния  $\tau_p$ . Закончив эксперимент, выключить тумблеры "основной нагрев" и "сеть" Результаты наблюдений заносят в таблицу экспериментальных данных:

размеры высушиваемого образца -  $a \times b$ ;

вес воздушно-сухого образца -  $G_{вс}$ ;

температура сушки -  $t, ^\circ\text{C}$ .

Время от начала сушки, $\tau_i$ , мин	0	$\tau_1$	...	$\tau_i$	...	$\tau_p$
Вес образца, $G_i$ , г	$G_0$	$G_1$	...	$G_i$	...	$G_p$

#### Обработка опытных данных

1. Вычислить вес абсолютно сухого волокна в высушиваемом образце целлюлозы. Поскольку общепринятое значение влажности воздушно-сухого образца составляет 12%, то вес абсолютно сухого образца равен  $G_{ac} = (1 - 0,12) \cdot G_{вс}$ .
2. Пересчитать экспериментальные данные изменения веса образца в процессе сушки в конкретный момент времени:
  - на содержание влаги в образце по формуле  $W_i = G_i - G_{ac}$ ;
  - на содержание влаги, отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  поверхности высушиваемого образца, по уравнению  $u_i = W_i / F$ , где  $F$  - поверхность высушиваемого образца, при расчете которой необходимо учесть, что испарение влаги из образца происходит с обеих его сторон, т.е.  $F = 2 \cdot (a \cdot b)$ , где  $a$ ;  $b$  - длина и ширина образца. Результаты расчета оформить в виде следующей таблицы:

Время от начала сушки, $\tau$ , мин	Вес влаги в образце, $W$ , г	Содержание влаги, отнесенное к $1 \text{ м}^2$ поверхности образца, $u$ , $\text{кг}/\text{м}^2$

3. Все рассчитанные значения  $u_i$  при времени  $\tau_i$  нанести на график  $u=f(\tau)$  и, в соответствии с нанесенными на график точками плавно провести кривую сушки. Построенная кривая сушки должна быть аналогична кривой сушки на рис.4.27 [1] или на рис.157 [4]. На кривой сушки отметить критические точки: В - начало периода постоянной скорости сушки; С - переход к периоду падающей скорости сушки и D - установления равновесной влажности образца (рис.7). Участок ВС - прямая линия. После точки D линия идет параллельно оси ординат. При этом участок АВ (прогрев материала до температуры сушки) может отсутствовать.
4. Рассматривая скорость сушки как количество влаги (воды), удаляемой 1 м<sup>2</sup> поверхности в единицу времени (за 1 час), построить график скорости сушки при дифференцировании кривой сушки графическим методом. Графическое дифференцирование проводят следующим образом. На кривой  $u=f(\tau)$  рис.7 продолжить прямую линию ВС до пересечения с осями координат. Эта линия отсекает отрезки ОЕ на оси ординат и ОF на оси абсцисс. Отношение ОЕ/ОF определенное с учетом масштаба осей равно скорости сушки  $v_{bc}$  для периода сушки от  $\tau_b$  до  $\tau_{кр}$  (в точке С) при этом  $\tau_b$  может быть равно нулю. Далее взять несколько точек на участке кривой для периода от  $\tau_{кр}$  до  $\tau_p$  и провести к ним касательные до пересечения с осями координат. Например, для точки L получаем отрезки ОМ и ОN. Их отношение представляет мгновенную скорость сушки  $v_L$  в момент времени  $\tau_L$ . Аналогично строят касательные еще в 2 - 3 любых точках кривой сушки и получают мгновенные скорости сушки в этих точках. Указанные расчеты целесообразно представить в правом верхнем углу графика кривой сушки. По рассчитанным значениям скорости сушки построить графики скорости сушки, аналогичные графикам на рис.4.28 [1] или рис.159 [4]. На графиках отметить критические точки. При времени  $\tau_p$  скорость сушки становится равной нулю.
5. По графику кривой сушки найти значения времени  $\tau_b$ ,  $\tau_{кр}$  и  $\tau_p$ . Из таблицы обработки экспериментальных данных при найденных значе-

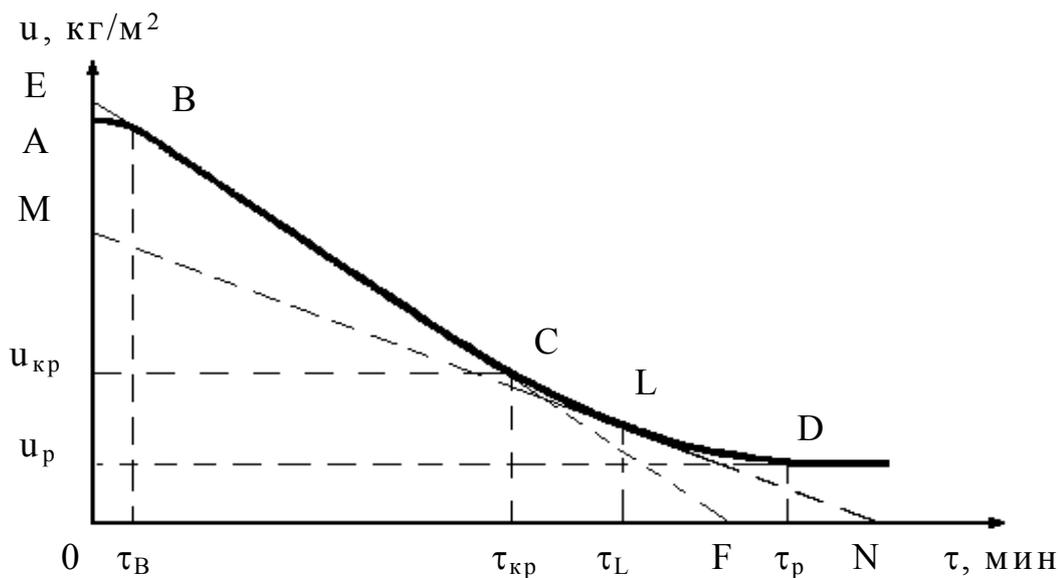


Рис.7. К расчету скорости сушки методом графического дифференцирования кривой сушки

ниях времени определить соответствующие значения веса влаги в образце  $W_B, W_{кр}$  и  $W_p$ , по которым рассчитать влажность материала в долях от массы сухого волокна в высушиваемом образце по формуле  $u' = W/G_{ac}$ . Получим три значения влажности материала:  $u'_B$  в точке B,  $u'_{кр}$  в точке C и  $u'_p$  в точке D. Поскольку в промышленных условиях сушку ведут не до равновесного состояния, а до воздушно-сухого состояния материала, то в таблице экспериментальных данных найти значение веса материала  $G_{вс}$  и для этого веса определить время  $\tau_k$ . Влажность воздушно-сухого материала в долях от массы сухого волокна равна  $u'_k = 0,12 / 0,88 = 0,136$  кг<sub>влаги</sub>/кг<sub>а.с.м.</sub>.

6. Решая совместно уравнения 10.26 и 10.27 [5], в которых  $\tau_1 = \tau_{кр} - \tau_B$ , а  $\tau_2 = \tau_k - \tau_{кр}$ , по аналогии с примером 10.20 [5], рассчитать значение N, которое определяет скорость сушки в период ее постоянного значения. Рассчитать теоретическое значение постоянной скорости сушки по формуле  $v'_{вс} = (N \cdot G_{ac}) / F$ , найти отношение  $v'_{вс} / v_{вс}$ , сравнить его с рекомендуемым в пункте 14 главы 10 [5]. Не забывайте следить за размерностями величин.

## Расчет ленточной промышленной сушилки для целлюлозы

Задание на расчет сушилки предусматривает, что условия сушки, структура и толщина высушиваемого материала в эксперименте и в промышленной установке аналогичны. Исходные данные для расчета:

- производительность установки по воздушно-сухой целлюлозе  $G$ ;
- содержание абсолютно сухого волокна (сухость) во влажном материале  $x_n$  на входе в сушилку и в высушенном материале  $x_k$  на выходе из нее (в массовых долях);
- предельно возможная высота установки  $H$ ;
- расстояние по высоте между двумя соседними горизонтальными лентами целлюлозы  $\delta$ ;
- ширина целлюлозной ленты  $b$ .

При расчете определить: длину сушилки  $L$ , ее ширину  $B$ , число лент целлюлозы в ней  $n$  и скорость движения целлюлозной ленты в сушилке  $w$ .

Возможны и другие варианты задания.

Последовательность расчета следующая.

1. Для заданных значений сухости влажного и высушенного материала рассчитать их влажность от массы сухого вещества по формуле  $u' = (1 - x)/x$ . Полученные значения  $u'_n$  и  $u'_k$  пересчитать на содержание влаги, отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  поверхности экспериментального образца целлюлозы, применяя зависимость  $u = (u' \cdot G_{ac})/F$ , где  $G_{ac}$  - вес абсолютно сухого образца целлюлозы,  $F$  - его поверхность испарения, рассчитанные ранее. В результате расчета получены значения  $u_n$  и  $u_k$ .
2. Найденное из опыта значение скорости сушки в период постоянной ее скорости  $v_{bc}$  с единицы поверхности материала в единицу времени пересчитать на скорость, выражаемую массой воды на единицу массы сухого волокна, испаряемой в единицу времени по уравнению  $N = (v_{bc} \cdot F)/G_{ac}$ .
3. По формулам 10.26 и 10.27 [5] при найденном  $N$ , полученным из эксперимента  $u'_{кр}$  и  $u'_p$  и рассчитанным для промышленной сушилки  $u'_n$  и  $u'_k$ , определить продолжительность сушки в промышленной сушилке для периода постоянной скорости  $\tau_1$ , для периода падающей скорости  $\tau_2$  и общую продолжительность сушки  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ .

4. Рассчитать среднюю скорость удаления влаги из материала в промышленной сушилке по уравнению  $v_{cp} = (u_n - u_k)/\tau$ , где  $u_n$  и  $u_k$  - влажности материала, рассчитанные по заданным значениям  $x_n$  и  $x_k$ .
5. Рассчитать количество влаги, которое необходимо удалить из целлюлозной ленты в промышленной сушилке по уравнению

$$W = 0,88 \cdot G \cdot \left( \frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_k} \right),$$

где 0,88 - коэффициент, учитывающий содержание сухого волокна в воздушно-сухой целлюлозе.

6. Определить требуемую поверхность сушки в промышленной установке по формуле  $F = W/v_{cp}$ . Тогда при заданной ширине  $b$  бумажной ленты, учитывая, что влага испаряется с обеих ее сторон, длина целлюлозной ленты в сушилке составит  $l = F/2 \cdot b$ .
7. Число лент целлюлозы  $n$  (как целое число), одновременно находящихся в сушильной камере, определяется из условия  $N \geq (n+1) \cdot \delta$ , где  $\delta$  - заданное расстояние между лентами.
8. С учетом ширины двух проходов  $\Delta l = (1,5 \div 1,8)$  м, расположенных с торцов внутри сушилки и необходимых для ее обслуживания, длина сушильной камеры равна  $L = (l/n) + \Delta l$ , а ширина сушилки с учетом ширины двух боковых зазоров  $\Delta b = (0,4 \div 0,6)$  м составит  $B = b + \Delta b$ . Значения  $\Delta l$  и  $\Delta b$  выбрать так, чтобы округлить  $L$  и  $B$ .
9. Скорость движения целлюлозной ленты по сушилке определить по уравнению  $w = l/\tau$ .

#### Контрольные вопросы

1. Что является движущей силой процесса сушки?
2. Что называют скоростью сушки?
3. Какие существуют формы связи влаги с материалом? Какая влага удаляется при сушке?
4. Что такое равновесное влагосодержание материала и от чего зависит его значение? Что такое критическое влагосодержание материала?
5. Как графически изобразить изменение влажности материала, его температуры и скорости сушки во времени?

6. Чем определяется скорость сушки в первом периоде? Как иначе называют этот период сушки?
7. Чем определяется скорость сушки во втором периоде? Как иначе называют этот период сушки?
8. За счет чего переносится влага внутри материала? Что такое влагопроводность и термовлагопроводность?
9. В чем состоит особенность кинетики контактной сушки? Чем отличаются низко- и высокотемпературная контактные сушки?
10. Что представляют собой принципиальные схемы туннельной, пневматической, аэрофонтанной, барабанной, распылительной сушилок и сушилки с псевдоожиженным (кипящим) слоем? Каковы особенности сушки материала в этих сушилках?
11. Какие сушилки применяют для высушивания бесконечной ленты бумажного полотна? Как они работают?
12. Как устроен сушильный цилиндр? Почему необходим наиболее полный отвод конденсата из него? Как осуществляется отвод конденсата?

#### Библиографический список

- [1], с.452-453, 456-467, 468-492.
- [2], с.590-592, 608-631.
- [3], с.637-649, 664-669.
- [4], с.300-301, 304-305, 308-315, 319-324.
- [5], Глава 10.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коган В.Б., Волков А.Д. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесная промышленность, 1980. 574 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - 9-е изд., пер. и доп. - М.: Химия, 1973. 754 с.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн. М.: Химия, 1981. 812 с.
4. Бушмелев В.А., Вольман Н.С., Кокушкин О.А. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажного производства. - 4-е изд. пер. и доп. - М.: Лесная промышленность, 1985. 336 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - 10-е изд., пер. и доп. - Л.: Химия (Ленинградское отделение), 1987. 576с.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

РАБОТА №6 "Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа труба в трубе" .....	3
РАБОТА №7 "Определение основных показателей работы выпарного аппарата" .....	9
РАБОТА №8 "Определение основных параметров влажного воздуха и графоаналитический расчет процесса конвективной сушки" .....	17
РАБОТА №9 "Исследование кинетики конвективной сушки" .....	25
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	33

Олег Александрович Кокушкин  
Виктор Сергеевич Куров  
Михаил Вячеславович Завьялов

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Часть II. Тепловые и массообменные процессы**

Методические указания к лабораторным работам

Редактор и технический редактор Л.Я. Титова

---

Подп. к печати 21.02.05. Формат 60×80/16. Бумага тип №1.  
Печать офсетная. Объем 2,25 печ.л., 2,25 уч.-изд.л. Тираж 300 экз.  
Изд. № 15. Цена “С” 15. Заказ

---

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.