

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический  
университет имени С.М. Кирова»

**Факультет среднего профессионального образования  
«Колледж автоматизации лесопромышленного производства»**

## **Процессы и аппараты**

Методические руководства  
для проведения лабораторных работ

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОТСТАИВАНИЯ И РАСЧЁТ ПЛОЩАДИ ОТСТОЙНИКА

**Цель работы:** На основании экспериментальных данных вычислить скорости осаждения и диаметры частиц в суспензии, рассчитать площадь отстойника для заданной производительности и выбрать аппарат.

#### **Необходимое оборудование и материалы:**

1. Мерный стеклянный цилиндр с суспензией и мешалка.
2. Линейка.
3. Термометр.
4. Секундомер.

#### **Методика и порядок проведения работы:**

1. Измеряют внутренний диаметр цилиндра, максимальную высоту столба суспензии и её температуру.
2. Исследуемую суспензию перемешивают в стеклянном цилиндре до однородного состояния после чего сразу выключается секундомер и наблюдается скорость осаждения частиц по изменению высоты свой осветлённой жидкости фиксирует одновременно высоту свой осветлённой жидкости время сначала опыта при этом интервала времени между измерениями концу наблюдения увеличивают необходимо сделать не менее 8-10 замеров.
3. По полученным экспериментальным данным рассчитывают объём суспензия дифференциальную и интегральную скорости осаждения и диаметр частиц заполняют таблицу.
4. Вычисляют площадь отстаивания при заданной производительности выбирают аппарат.

#### **Расчетные формулы для обработки данных :**

1. Интегральная скорость осаждения частиц суспензии:

$$v_{\text{инт.}} = h/t, \text{ м/с } ,$$

где  $h$  - высота слоя осветлённой жидкости, м

$t$  - продолжительность отстаивания с начала опыта, с

2. Дифференциальная скорость осаждения частицы:

$$v_{\text{диф.}} = \Delta h / \Delta t, \text{ м/с } ,$$

где  $\Delta h$  - изменение высоты слоя осветлённой жидкости по сравнению с предыдущим измерением, м

$\Delta t$  - продолжительность отстаивания после предыдущего измерения, с

3. Минимальный диаметр оседающее частиц суспензии:

$$D_{\min.} = \sqrt{18 \cdot \mu \cdot v_{\text{диф.}} / g \cdot (\rho - \rho_0)}, \text{ м},$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость среды, Па·с (из справ.)

$\rho$  и  $\rho_0$  - плотность вещества частиц и среды, кг/м<sup>3</sup>

$g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

4. Площадь отстаивания:

$$F = 1,33 \cdot G \cdot (f_0 - f) / v_{\text{инт.}} \rho_0, \text{ м}^2$$

где  $G$  - производительность отстойника по сухому веществу, кг/с (задаётся преподавателем)

1,33 - коэффициент запаса аппарата непрерывного действия по сравнению с периодическим

$f_0$  и  $f$  - выражают отношение количества жидкости твёрдого вещества суспензии в начальный и конечный момент процесса, определяются по формуле:

$$f = 50 \cdot 10^3 \cdot V - 0,57, \text{ где}$$

$V$  - объём суспензии в данный момент времени, м<sup>3</sup>,

$V = 0,785 \cdot d^2 \cdot H$ , если  $d$  - диаметр цилиндра, а  $H$  - высота столба в суспензии,

### **Содержание отчёта:**

1. Название цель работы.
2. Необходимое оборудование и материалы.
3. Расчетные формулы и справочные данные. ( $\mu, \rho, \rho_0$ )
4. Опытные расчётные данные приводятся в таблице:

№ п/п	Время с начала опыта, t, с	Высота слоя осветл. жидкости, h, м	Высота столба суспензии, H, м	Объём суспензии, V, м <sup>3</sup>	Интегр. скор. осаж. д. $V_{\text{инт.}}$ , м/с	Диффер. скорость осадения, $V_{\text{диф.}}$ м/с	Минимальный диаметр осадения частиц, $D_{\min.}$ , м
-------	----------------------------	------------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	--	--	--

5. Расчет площади отстойника.

6. Вывод (открывается выбор аппарата по результатам расчета).

## Лабораторная работа №2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОТ ЖИДКОСТИ К ЖИДКОСТИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

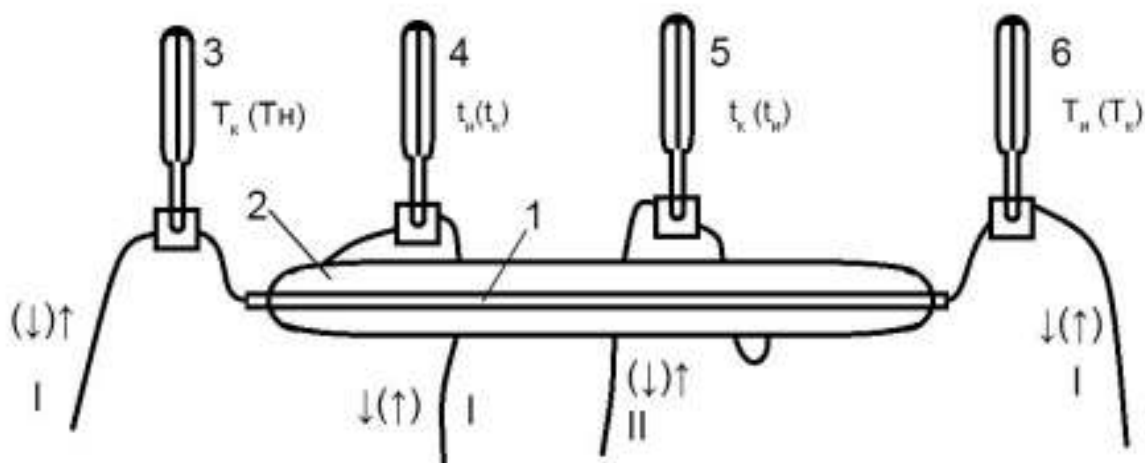
**Цель работы:** определить коэффициент теплопередачи от горячей воды к холодной в теплообменнике типа «труба в трубе»:

- а) на основе экспериментально полученных данных ( $K_{\text{эксп}}$ )
- б) путём расчёта через коэффициенты теплоотдачи, найденные с помощью теории подобия ( $K_{\text{теор}}$ ).

#### Необходимое оборудование и материалы:

1. Лабораторный теплообменник типа «труба в трубе» с размерами:  
наружная кожуховая стеклянная трубка  $D = (40 \times 2)$  мм;  
внутренняя теплообменная латунная трубка  $d = (12 \times 1)$  мм;  
длина  $l = 700$  мм.
2. Термометры – 4 шт.
3. Колба или цилиндр для измерения объёма воды.
4. Секундомер
5. Холодная и горячая вода.

#### Схема установки



1 – латунная трубка; 2 – стеклянная трубка; 3-6 – термометры; I – горячая вода; II – холодная вода.

## Методика проведения работы:

### а) Определение экспериментального значения коэффициента теплопередачи ( $K_{\text{эксп}}$ ).

1. Ознакомиться с установкой и методикой проведения работы.
2. Включить установку, направив горячую воду в латунную трубку, а холодный поток – в кольцевой канал между стеклянной и латунной трубкой. Когда наступит установившийся режим, т.е. температуры потоков перестанут изменяться, снять и записать следующие данные:
  - температуру горячей воды на входе и выходе из теплообменника ( $T_{\text{н}}$  и  $T_{\text{к}}$ ),
  - температуру холодной воды на входе и выходе из теплообменника ( $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{к}}$ ),
  - взаимное направление движения теплоносителей (прямоток и противоток).

Для определения расхода горячей и холодной воды измерить секундомером время заполнения водой определенного объема мерного цилиндра ( $V_{\text{г}}$  и  $\tau_{\text{г}}$ ;  $V_{\text{х}}$  и  $\tau_{\text{х}}$ ). Измерения повторить не менее 3-х раз, для дальнейших расчётов вычислить и записать в отчете средние арифметические значения полученных величин.

Выключить подачу воды и убрать рабочее место

3. Составить температурную схему процесса и найти среднюю движущую силу ( $\Delta t_{\text{ср}}$ ) и средние температуры горячей ( $T_{\text{ср}}$ ) и холодной ( $t_{\text{ср}}$ ) воды.
4. При средних температурах горячей и холодной воды найти в справочнике плотность ( $\rho_{\text{г}}$  и  $\rho_{\text{х}}$ ), вязкость ( $\mu_{\text{г}}$  и  $\mu_{\text{х}}$ ), теплоёмкость ( $c_{\text{г}}$  и  $c_{\text{х}}$ ), теплопроводность ( $\lambda_{\text{г}}$  и  $\lambda_{\text{х}}$ ).
5. Определить объёмный ( $V_{\text{х}}$ ,  $V_{\text{г}}$ ) и массовый расход ( $G_{\text{х}}$  и  $G_{\text{г}}$ ) холодной и горячей воды.
6. Найти среднюю тепловую нагрузку процесса ( $Q_{\text{ср}}$ ), определив предварительно количество тепла, отдаваемого горячей водой ( $Q_{\text{г}}$ ) и принимаемого холодной ( $Q_{\text{х}}$ ).
7. Рассчитать по размерам теплообменника величину поверхности теплообмена ( $F$ ).
8. Определить экспериментальное значение коэффициента теплопередачи ( $K_{\text{эксп}}$ ) из основного уравнения теплопередачи.

**б) Расчёт коэффициента теплопередачи через коэффициенты теплоотдачи, с помощью теории подобия**

1. Рассчитать скорости движения горячего и холодного потоков ( $v_{\Gamma}, v_x$ ).
2. Найти значения критериев Рейнольдса для горячей и холодной воды ( $Re_{\Gamma}, Re_x$ )
3. Определить значения критериев Прандтля для горячей и холодной воды ( $Pr_{\Gamma}, Pr_x$ )
4. Выбрать критериальные уравнения и рассчитать по ним критерий Нуссельта для горячей и холодной воды ( $Nu_{\Gamma}, Nu_x$ )
5. Рассчитать коэффициенты теплоотдачи горячего и холодного потоков ( $a_{\Gamma}, a_x$ )
6. Найти в справочнике значения коэффициента теплопроводности материала теплопроводящей стенки ( $\lambda_{ст}$ ).
7. Рассчитать значения коэффициента теплопередачи ( $K_{теор}$ ).

**в) Оформить отчёт и сформулировать вывод, сравнивая значения коэффициентов теплопередачи  $K_{эксп}$  и  $K_{теор}$**

**Расчётные формулы:**

*а) Определение экспериментального коэффициента теплопередачи  $K_{эксп}$*

1. Объёмный расход горячей и холодной воды

$$V_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{\tau_{\Gamma}} \text{ и } V_x = \frac{V_x}{\tau_x}, \text{ м}^3/\text{с}$$

где  $V_{\Gamma}, V_x$  – объём воды в цилиндре,  $\text{м}^3$

где  $\tau_{\Gamma}, \tau_x$  – время течения воды, с

2. Массовый расход горячей и холодной воды

$$G_{\Gamma} = V_{\Gamma} \times \rho_{\Gamma} \text{ и } G_x = V_x \times \rho_x, \text{ кг/с,}$$

где  $\rho_{\Gamma}, \rho_x$  – плотность воды при средней температуре,  $\text{кг/м}^3$

Тепловая нагрузка процесса

$$Q_{ср} = \frac{Q_{\Gamma} + Q_x}{2}, \text{ Вт,}$$

$$Q_{\Gamma} = G_{\Gamma} \times c_{\Gamma} \times \Delta T$$

$$Q_x = G_x \times c_x \times \Delta t$$

где  $c_x$  и  $c_{\Gamma}$  – теплоёмкость воды при средней температуре,  $\text{Дж/кг} \times \text{град}$

$\Delta T, \Delta t$  – перепад температуры горячей и холодной воды, °С,

### 3. Поверхность теплообмена

$$F = \pi \times d_{\text{вн}} \times l, \text{ м}^2$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр латунной трубки, м,  
 $l$  – длина теплообменника, м,  $l = 700 \text{ мм} = 0,7 \text{ м}$

### 4. Экспериментальный коэффициент теплопередачи

$$K_{\text{эксп}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{ср}} \times F}, \text{ Вт/м}^2 \times \text{град},$$

### б) Определение теоретического коэффициента теплопередачи $K_{\text{теор}}$

#### 1. Скорость движения воды

$$v_{\text{Г}} = \frac{V_{\text{Г}}}{S_{\text{Г}}}, \quad v_{\text{Х}} = \frac{V_{\text{Х}}}{S_{\text{Х}}}, \text{ м/с},$$

где  $S_{\text{Г}}$  – площадь живого сечения горячего потока,  $\text{м}^2$ .

$$S_{\text{Г}} = \frac{\pi \times d_{\text{вн}}^2}{4},$$

$S_{\text{Х}}$  – площадь сечения холодного потока,  $\text{м}^2$

$$S_{\text{Х}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{нар}}^2),$$

где  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр стеклянной трубки, м,  
 $d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр латунной трубки, м

#### 2. Критерий Рейнольдса для воды

$$Re_{\text{Г}} = \frac{V_{\text{Г}} \times d_{\text{вн}} \times \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{Г}}} \text{ и } Re_{\text{Х}} = ,$$

где  $\mu_{\text{Г}}, \mu_{\text{Х}}$  динамическая вязкость воды при средней температуре, Па  
 $\times \text{с}$ ,

$d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр, м,

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \times S_{\text{Х}}}{\Pi} = \frac{4 \times S_{\text{Х}}}{\pi (D_{\text{вн}} + d_{\text{нар}})},$$

3. Критерий Прандтля для воды:

$$Pr_{\Gamma} = \frac{\mu_{\Gamma} \times c_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}} \text{ и } Pr_x = \frac{\mu_x \times c_x}{\lambda_x},$$

где  $\lambda_{\Gamma}$  и  $\lambda_x$  – теплопроводность воды при средней температуре, Вт/М × град,

4. Коэффициент теплоотдачи воды

$$a_{\Gamma} = \frac{Nu_{\Gamma} \times \lambda_{\Gamma}}{d_{\text{вн}}} \text{ и } a_x = \frac{Nu_x \times \lambda_x}{d_{\text{экв}}}, \text{ Вт/м}^2 \times \text{град},$$

где  $Nu_{\Gamma}$  и  $Nu_x$  – критерии Нуссельта, рассчитанные по выбранным критериальным уравнениям.

5. Теоретическое значение коэффициента теплопередачи

$$K_{\text{теор}} = \frac{1}{\frac{1}{a_{\Gamma}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{a_x}}, \text{ Вт/м}^2 \times \text{град},$$

где  $\delta$  – толщина стенки латунной трубки, м,  
 $\lambda_{\text{ст}}$  – теплопроводность материала стенки (латуни), Вт/м × град,

### **Содержание отчёта:**

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Необходимое оборудование и материалы.
4. Расчётные формулы и расчёт  $K_{\text{эксп}}$  и  $K_{\text{теор}}$ .
5. Вывод



### Лабораторная работа №3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА И РАСЧЕТ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ВОЗДУХА И ТЕПЛА НА СУШКУ

**Цель работы:** Определить температуру и относительную влажность воздуха с помощью психрометра Августа. Пользуясь диаграммой состояния влажного воздуха (I-x диаграммой), найти остальные параметры воздуха и для заданного режима сушки графическим методом определить удельный расход воздуха и тепла на сушку

### Необходимое оборудование и материалы

- 1) психрометр Августа;
- 2) I-x диаграмма состояния влажного воздуха (диаграмма Рамзина)

### Методичка и порядок проведения работы :

1. Определить температуру сухого и мокрого термометров ( $t_c$  и  $t_m$ ) психрометра Августа менее 3-х раз через 10-15 минут; вычислить среднее значение; результаты занести в таблицу 1.
2. По полученным данным с помощью психрометрической таблицы найти относительную влажность свежего воздуха ( $\varphi_0$ ).
3. На диаграмме состояния влажного воздуха (I-x диаграмме) найти точку А, соответствующую состоянию свежего воздуха, и снять его энтальпию и влагосодержание ( $I_0$  и  $x_0$ ). Полученные данные занести в таблицу.
4. Из таблицы исходных данных для заданного варианта выписать параметры режима сушки. Графически изобразить процесс нагрева воздуха (АВ) и процесс изменения его параметров при сушке (ВС). Определить с помощью I-x диаграммы состояния воздуха параметры нагретого воздуха, состоянию которого соответствует точка В ( $x_1, I_1, \varphi_1$ ), и отработанного воздуха, которому соответствует точка С ( $x_2, I_2$ ). Полученные данные занести в таблицу 2.
5. Рассчитать удельный расход воздуха и тепла на сушку.

### Расчетные формулы для обработки данных:

1. Удельный расход воздуха на сушку:

$$I = \frac{1}{x_2 - x_0}$$

где  $x_2$  – влагосодержание отработанного воздуха, кг/кг  
 $x_0$  – влагосодержание свежего воздуха, кг/кг воздуха.

2. Удельный расход тепла на сушку:

$$q = \frac{I_2 - I_0}{x_2 - x_0}$$

где  $I_2$  – энтальпия отработанного воздуха, Дж/кг

$I_0$  – энтальпия свежего воздуха, Дж/кг.

### Содержание отчёта:

1. Название и цель работы.
2. Необходимое оборудование и материалы.  
Номер варианта и соответствующий ему режим сушки.
3. Результаты измерений приводятся в таблице 1:

Таблица 1.

№ п/п	Температура сухого термометра, $t_s$ , °C	Температура мокрого термометра, $t_m$ , °C	Разность средних температур, $\Delta t$ , °C	Относительная влажность воздуха, $\varphi$ , %
1			—	—
2			—	—
3			—	—
среднее				

4. Результаты определения параметров воздуха приводятся в таблице 2:

Таблица 2

Наименование параметров воздуха	свежий воздух ( $X_0, I_0, \varphi_0$ )	нагретый воздух ( $X_1, I_1, \varphi_1$ )	отработанный воздух ( $X_2, I_2, \varphi_2$ )
Влагосодержание, $x$ , кг/кг			
Температура, $t$ , °C			
Энтальпия, $I$ , Дж/кг			

5. Графическое изображение процесса сушки с указанием всех использованных в работе параметров воздуха.
6. Вывод

Номер варианта	Температура нагрева воздуха перед сушкой, $t_1, ^\circ\text{C}$	Температура отработанного воздуха, $t_2, ^\circ\text{C}$	Относительная влажность отработанного воздуха, $\varphi_2, \%$
1	90	30	90
2	80	35	80
3	95	30	80
4	85	40	90
5	80	30	70
6	75	40	80
7	70	35	70
8	95	45	70
9	90	50	90
10	90	45	80
11	85	35	60
12	80	30	60
13	75	40	70
14	85	45	50
15	80	40	65
16	70	35	90
17	75	45	60
18	65	40	70
19	90	50	60
20	85	45	95
21	95	55	50
22	80	45	75
23	75	35	75
24	85	45	75
25	80	40	60