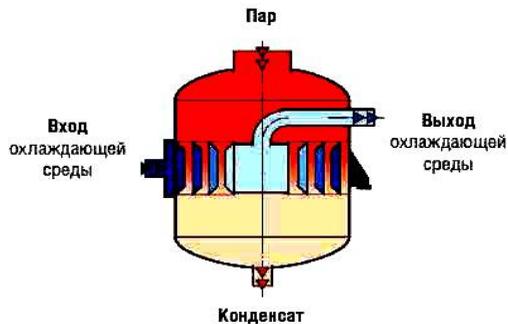


ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

**Кафедра механизации животноводства и переработки
сельскохозяйственной продукции**

ТЕПЛОТЕХНИКА

рабочая тетрадь
для лабораторных работ



СТУДЕНТ _____
(Ф.И.О разборчиво)

ГРУППА _____

Новосибирск 2023

**Кафедра механизации животноводства и переработки
сельскохозяйственной продукции**

УДК 621.1
ББК 31.3

Теплотехника: рабочая тетрадь для лабораторных работ / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост: Е.А. Пшенов, А.Г. Христенко, Д.С. Рудаков. – Новосибирск, 2023– 56с.

Рецензент, доцент, канд. техн. наук Е. А. Булаев.

Рабочая тетрадь предназначена для студентов очной и заочной формы обучения, по направлениям:

Агроинженерия;
Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов;
Технология транспортных процессов;
Профессиональное обучение (по отраслям);
Продукты питания животного происхождения;
Технология продукции и организация общественного питания.

Утверждены и рекомендованы к изданию методическим советом Инженерного института НГАУ (протокол №8 от 28 марта 2023 г.)

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ, КОЭФФИЦИЕНТА АДИАБАТЫ, ЭНТАЛЬПИИ И ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ВОЗДУХА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Экспериментальное определение объемной изобарной теплоемкости воздуха, позволяющей рассчитать все виды теплоемкостей, зависимость их от температуры, а также родственные им величины: внутреннюю энергию, энтальпию и показатель адиабаты.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА. Схема установка показана на (рис.1).

Включение калориметра в электрическую сеть производится совместно с вентилятором.

Количество воздуха, проходящего через калориметр, регулируется воздушной заслонкой, установленной на воздухоподводящем вентиляторе.

Мощность электрического тока, проходящего через электронагреватель, регулируется латром.

Силу тока и напряжение измеряют соответственно амперметром и вольтметром.

Динамический напор воздуха определяется микроманометром, подсоединенным к лабораторной установке.

Температура на входе и выходе из калориметра измеряется с помощью датчиков подключенных к электронному термометру.

Опыт проводят при трех режимах до установившихся температур в каждом из них. Показания приборов записывают в табл. 1.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Убедиться установке датчиков температуры на входе и выходе калориметра и включить электронный термометр.
2. Установить показание микроманометра, от которого начинать отсчет.
3. Воздушную заслонку прикрыть до конца.
4. Включить установку в сеть.
5. Плавно открывая заслонку добиться показаний микроманометра $L = 1\text{мм}$.
6. Установить напряжение $U = 200\text{ В}$.
7. Через 5 мин снять показания измеряемых параметров и записать в табл. 1:
 - длину столба жидкости микроманометра L , м;
 - температуру воздуха на входе в прибор $t_{вх}$, °С;
 - температуру воздуха на выходе из прибора $t_{вых}$, °С;
 - силу электрического тока I , А;
8. Установить воздушную заслонку в среднее положение, через 5 мин записать показания в табл. 1.
9. Установить воздушную заслонку в полностью открытое положение, через 5 мин записать показания в таблицу 1.
10. По окончании испытания отключить установку.
11. По получению экспериментальных данных рассчитать для воздуха:
 - а) динамический напор;
 - б) массовую среднюю изобарную теплоемкость;

- в) массовую среднюю изохорную теплоемкость;
- г) показатель адиабаты;
- д) энтальпию;
- е) внутреннюю энергию.
- ж) Сравнить полученные значения с табличными [6].

12. Построить кривые зависимости C_p и C_v от средней температуры.

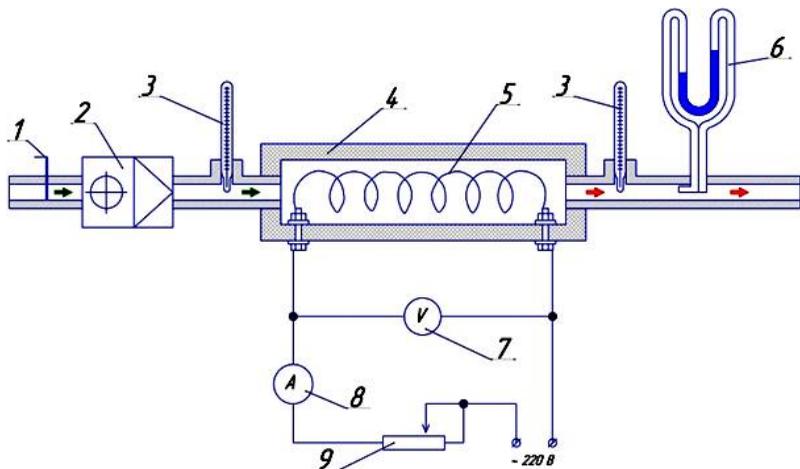


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости воздуха:
 1 - заслонка; 2 - вентилятор; 3 - термометр; 4 - проточный калориметр; 5 - электроспираль; 6 - микроманометр; 7 - вольтметр; 8 - амперметр; 9 - латр.

Таблица 1 – Исходные данные

Номер точки	I, A	U, B	$t_{вх} \text{ } ^\circ C$	$t_{вых} \text{ } ^\circ C$	$L, м$
1					
2					
3					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. Определить среднюю температуру:

$$t_{cp} = \frac{t_{вх} + t_{вых}}{2}, \quad (1)$$

- 1.
- 2.
- 3.

2. Определить удельный вес воздуха при его средней температуре:

$$\gamma_{t_{cp}} = \gamma_0 \cdot \frac{273}{273 + t_{cp}}, \text{ Н/м}^3, \quad (2)$$

где $\gamma_0 = 12,6 \text{ Н/м}^3$ – удельный вес воздуха при нормальных условиях.

1.

2.

3.

3. Определить из уравнения динамический напор:

$$P_d = L \cdot 0,2(\gamma_{жс} - \gamma_{t_{cp}}), \text{ Па}, \quad (3)$$

где L – длина столба жидкости, уравновешивающий динамический напор, замеренный с помощью микроманометра, м;

$\gamma_{жс}$ – удельный вес жидкости в микроманометре: для воды $\gamma_{жс} = 9810 \text{ н/м}^3$, для спирта $\gamma_{жс} = 7900 \text{ н/м}^3$.

1.

2.

3.

4. Определить из уравнения скорость воздуха при его средней температуре t_{cp} :

$$W_{t_{cp}} = \sqrt{\frac{2gP_d}{\gamma_{t_{cp}}}}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

1.

2.

3.

5. Определить из уравнения объемный расход воздуха при средней его температуре t_{cp} :

$$v_{cp} = \frac{\pi d^2}{4} W t_{cp}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5)$$

где $d = 0,1$ м – внутренний диаметр калориметра, м;

1.

2.

3.

6. Определить из уравнения объемный расход воздуха при нормальных условиях

$$v_o = v_{cp} \frac{273}{273 + t_{cp}}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

(6)

1.

2.

3.

7. Определить среднюю объемную изобарную теплоемкость воздуха, по формуле в интервале температур от $t_{вх}$ и $t_{вых}$:

$$C'_{pm} \frac{t_{вых}}{t_{вх}} = \frac{I \cdot U}{v_o (t_{вых} - t_{вх}) \cdot 1000}, \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}, \quad (7)$$

где I – сила тока, А;

U – напряжение, В;

v_o – объемный расход воздуха, приведенный к нормальным условиям, $\text{м}^3/\text{с}$.

1.

2.

3.

8. Определить среднюю массовую изобарную теплоемкость $C_{pm}^{t_{вых}}$ из соотношения массовой и объемной теплоемкости, по формуле:

$$C_{pm}^{t_{вых}} = \frac{C_{pm}^{t_{вых}}}{\rho_0}, \quad (8)$$

где $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

1.

2.

3.

9. Определить среднюю массовую изохорную теплоемкость из уравнения Майера, по формуле:

$$C_{vm}^{t_{вых}} = C_{pm}^{t_{вых}} - R, \quad (9)$$

где $R = 0,287 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$;

1.

2.

3.

10. Определить показатель адиабаты для воздуха:

$$k = \frac{C_{pm}^{t_{вых}}}{C_{vm}^{t_{вых}}}. \quad (10)$$

1.

2.

3.

11. Определить энтальпию воздуха, по формуле:

$$h = C_{pm}^{t_{вых}} (t_{вых} - \theta^0) = C_{pm}^{t_{вых}} \cdot t_{вых}, \text{ кДж/кг} \quad (11)$$

- 1.
- 2.
- 3.

12. Определить внутреннюю энергию воздуха, по формуле:

$$\Delta U = C_{vm}^{t_{вых} t_{вх}} (t_{вых} - 0^{\circ} C) = C_{vm}^{t_{вых} t_{вх}} \cdot t_{вых}, \text{ кДж/кг} \quad (12)$$

- 1.
- 2.
- 3.

13. Результаты вычислений, найденные по формулам (1-12), занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные величины

Номер опыта	t_{cp}	$C'_{pm}^{t_{вых} t_{вх}}$ кДж/м ³ ·К	$C_{pm}^{t_{вых} t_{вх}}$ кДж/кг·К	$C_{vm}^{t_{вых} t_{вх}}$ кДж/кг·К	k	$h,$ кДж/кг	$\Delta U,$ кДж/кг
1							
2							
3							

13. Построить графики зависимости C_p и C_v от средней температуры $C_p=f(t)$ и $C_v=f(t)$

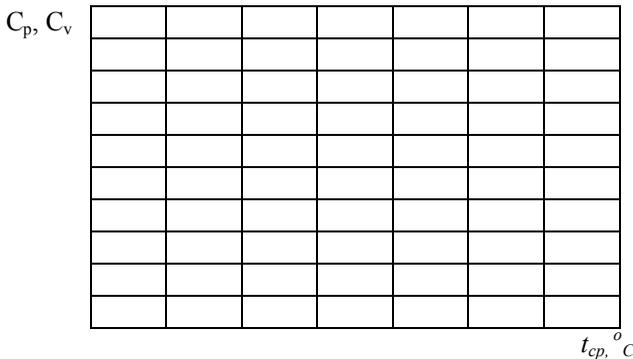


Рис. 2 Графики зависимости $C_p=f(t)$ и $C_v=f(t)$

Выводы:

Работу выполнил: _____ Работу принял: _____
(подпись) (подпись)

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучение процесса теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой при свободно её движении.

ВВЕДЕНИЕ. Теплоотдача при свободном движении теплоносителя имеет место при нагревании воздуха помещений нагревательными приборами. В технике этот вид теплообмена встречается в различных тепловых установках.

Количество тепла, отданное телом воздуху при конвективном теплообмене, может быть определено по формуле Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha F \Delta t \quad \text{Вт}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи Вт/(м²·К);

F – теплоотдающая поверхность тела, м²;

Δt – температурный напор (разность между средней температурой теплоотдающей поверхности и средней температурой жидкости), К.

Коэффициент теплоотдачи α зависит от многих факторов: температуры и шероховатости тела, температуры и скорости движения воздуха и др.

Чтобы исследовать влияние на процесс конвективного теплообмена какого – либо одного фактора, остальные необходимо сохранить неизменными, что затруднительно из-за большого числа переменных. Эти трудности разрешает теория подобия, с помощью которой размерные физические величины объединяют в безразмерные комплексы.

Таким образом, нет необходимости искать зависимость коэффициента теплоотдачи от всех указанных выше факторов, а достаточно найти зависимость между отдельными безразмерными комплексами величин, характерными для данного случая теплообмена. Эти комплексы называются критериями подобия.

Таковыми критериями подобия для случая естественной конвекции являются следующие.

1. Критерий Нуссельта или критерий теплоотдачи:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);

d – диаметр трубы, м.

2. Критерий Грасгофа, или критерий подъемной силы:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T d^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, К⁻¹

для воздуха $\beta = 1/T_{cp}$, здесь $T_{cp} = 0,5(T_{cm} + T_e)$ - определяющая температура;

ν – кинематическая вязкость, m^2/c

$\Delta T = T_{cm} - T_e$ – расчетный температурный напор (разность температуры стенки и воздуха), К;

3. Критерий Прандтля, или критерий физических свойств жидкости,

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (4)$$

где a – коэффициент теплопроводности, m^2/c ;

Согласно теории подобия между указанными критериями существует однозначная зависимость вида:

$$Nu = f(G_r \cdot Pr) \quad (5)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА. В горизонтально установленной трубе установлен электрический нагреватель. В цепь которого, включены амперметр, вольтметр и латр. Температура на поверхности трубы измеряется в четырех точках с помощью датчиков, подключенных к электронному термометру (рис. 3).

Количество тепла, которым обменивается тело с окружающей средой в единицу времени (тепловой поток), согласно закону Ньютона-Рихмана, пропорционально разности температур между поверхностью тела t_r и окружающей средой t_c и величине поверхности тела F формула (1).

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов, определяющих условия взаимодействия с окружающей средой (скорость, характер движения среды, ее термофизические свойства, размеры и конфигурации тела, температуры поверхности тела и окружающей среды).

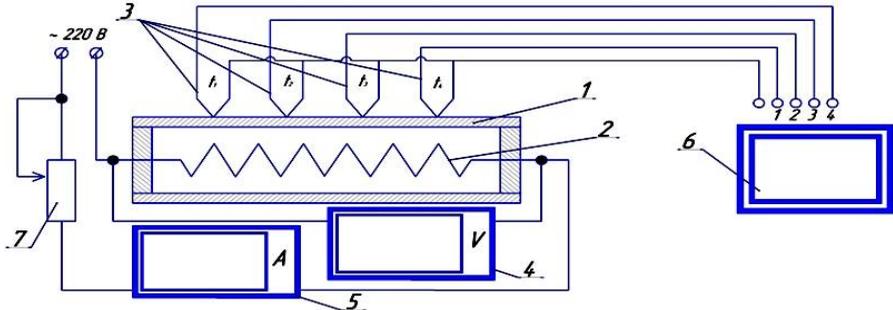


Рис. 3 Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха:

1-металлическая труба; 2-электрический нагреватель; 3-датчик температур;
4-вольтметр; 5-амперметр; 6-электронный термометр; 7-латр.

Количества тепла, которым обменивается поверхность тела и окружающая среда, складываются из тепла, передаваемого непосредственным соприкосновением среды с поверхностью тела (конвекция, теплопроводность), и из тепла, передаваемого путем теплового излучения.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом опыта проверяют правильность включения измерительных приборов.

Нагреватель включают в электрическую сеть и затем наблюдают за тепловым режимом трубы, для чего через каждые 5 мин. записывают значения всех показателей исходных данных приборов в таблицу 3.

- температуру на поверхности трубы в 4 точках t , °С;
- силу электрического тока I , А;
- напряжение электрического тока U , В.
- температуру окружающего воздуха t_e , °С;

При установившемся тепловом состоянии, характеризующимся неизменностью показаний приборов во времени делают не менее трех замеров через каждые 5 мин. Температуру измеряют, поочередно подключая датчики при помощи переключателя к электронным термометрам. Для обработки результатов опыта используют средние значения показания приборов.

Таблица 3 – Исходные данные

Номер опыта	Номер замера	Время, мин.	Температура стенки t , °С				I , А	U , В	t_e , °С
			1	2	3	4			
1	1								
	2								
	3								
2	1								
	2								
	3								

Затем латром увеличивают мощность, потребляемую нагревателем, и при новом установившемся тепловом режиме проводят необходимые измерения.

Количество опытов при различных тепловых режимах должно быть не менее двух.

По окончании испытания отключить электрический нагреватель

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. Определить среднюю абсолютную температуру поверхности стальной трубы (T_{cm}) и абсолютную температуру воздуха в лаборатории (T_e), по формулам:

$$T_{cm} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} + 273,15 \text{ , К} \quad (6)$$

$$T_e = t_e + 273,15 \text{ , К} \quad (7)$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 – температура в соответствующих точках трубы, °С .

- 1.
- 2.

- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

2. Определить полное количество тепла $Q_{пол}$, по расходу электроэнергии на нагреватель:

$$Q_{пол} = I \cdot U, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где I – сила тока в нагревателе, А;
 U – напряжение в нагревателе, В.

- 1.
- 2.

3. Определить количество тепла, передаваемого лучеиспусканием, по формуле:

$$Q_{л} = C_1 F \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\epsilon}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (9)$$

где F – поверхность трубы, м²;

C_1 – коэффициент теплового излучения стенок стальной трубы, Вт/(м²·К);

T_{cm} и T_{ϵ} – абсолютные температуры стальной трубы и окружающих ее тел (воздуха) К.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

4. Определить количество тепла $Q_{к}$, отданное трубой воздуху при конвективном теплообмене, по формуле:

$$Q_{к} = Q_{пол} - Q_{л}, \quad (10)$$

где $Q_{пол}$ – полное количества тепла, отданное трубой путем конвекции и

теплового излучения;

Q_{τ} – количества тепла, переданное воздуху лучеиспусканием.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

5. Определить коэффициент теплоотдачи горизонтальной трубы при свободном движении воздуха, по формуле:

$$\alpha = \frac{Q_{\kappa}}{F(T_{cm} - T_{\epsilon})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

(11)

где Q_{κ} - количества тепла, отданное трубой воздуху при конвективном теплообмене, $Вт$;

F – теплоотдающая поверхность стальной трубы, м^2 ;

T_{cm} – средняя абсолютная температура поверхности стальной трубы, $К$;

T_{ϵ} – абсолютная температура воздуха в лаборатории, $К$.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

6. Определить коэффициент теплового излучения стенок стальной трубы, по формуле:

$$C_I = \epsilon C_0 = \quad , \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

(12)

где $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\epsilon = 0,3$ – степень черноты поверхности трубы.

7. Определить площадь поверхности трубы по формуле:

$$F = \pi d_n L =$$

(13)

где d_u – наружный диаметр трубы (0,055) , м;

L – длина трубы (1 м);

8. Определить критерий Нуссельта или критерий теплоотдачи по формуле:

$$N_u = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (14)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м²·К), (табл. 4);

d – диаметр трубы , м.

1.

2.

3.

4.

5.

6.

9. Определить критерий Грасгофа, или критерий подъемной силы по формуле:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T d^3}{\nu^2}, \quad (15)$$

где g – ускорение свободного падения ($g = 9,81$ м/с²);

β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, К⁻¹
для воздуха $\beta = 1/T_{cp}$, здесь $T_{cp} = 0,5(T_{cm} + T_e)$ – определяющая температура;

ν – кинематическая вязкость воздуха (табл. 4), м²/с.

$\Delta T = T_{cm} - T_e$ – расчетный температурный напор (разность температуры стенки и воздуха), К;

1.

2.

3.

4.

5.

6.

Таблица 4. Свойства воздуха

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Коэфф. теплопроводности воздуха (λ), Вт/м·К	Кинематическая вязкость воздуха (ν), $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
0	0,0243	13,3
10	0,0251	14,16
20	0,0257	15,11
30	0,0258	16,58
40	0,0265	17,6
50	0,0271	18,6
60	0,0281	19,6
70	0,0287	20,45
80	0,0294	21,7
90	0,0308	23,78
100	0,032	26,2

10. Результаты вычислений, найденные по формулам (6-15), занести в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчетные величины

Номер опыта	Номер замера	F_2 м^2	$t_{\text{см}},$ $^\circ\text{C}$	$C_1,$ $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	$Q_{\text{к}},$ Вт	$Q_{\text{л}},$ Вт	$Q_{\text{полл}},$ Вт	$\alpha,$ $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$
1	1							
	2							
	3							
2	4							
	5							
	6							

Выводы:

Работу выполнил: _____
(подпись)

Работу принял: _____
(подпись)

Лабораторная работа № 3

ИСПЫТАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение коэффициента теплопередачи нагревательного прибора.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА. Объектом испытания служит нагревательный прибор (алюминиевый радиатор из 8 секций), присоединенный к циркуляционному контуру, действующему от электрического водонагревателя (рис. 4).

Лабораторная установка работает следующим образом. Вода нагревается от электрического водонагревателя 1 и по циркуляционному контуру 2 (за счет разности плотностей горячей и холодной воды) направляется к нагревательному прибору 5. Циркуляция воды в приборе во время проведения опытов регулируется проходным краном 3. Температура воды на входе в нагревательный прибор и выходе из него измеряется при помощи датчиков 4, 6 электронного термометра, а расход воды определяется при помощи мерной диафрагмы 7.

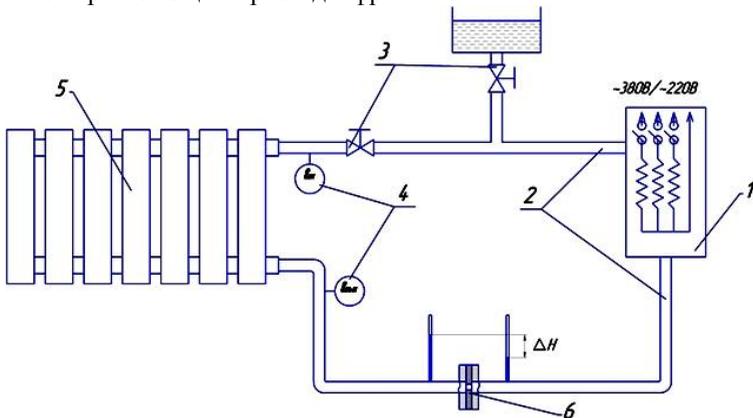


Рис. 4 Схема установки для испытания нагревательного прибора:

1-электрический водонагреватель; 2-циркуляционный контур; 3-проходной кран; 4-датчики термометра; 5-нагревательный прибор; 6-мерная диафрагма.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить электрический водонагреватель.
2. Снять показания измеряемых параметров:
 - разность давлений до и после диафрагмы ΔH , м вод. ст.;
 - температура воды на входе в прибор t' , °C;
 - температура воды на выходе из прибора t'' , °C;
 - температура окружающего воздуха $t_в$, °C;
 - средняя температура воды $t = 0,5(t' + t'')$, °C.

Значения всех показателей исходных данных записать в таблицу 6.

3. Снимать показания для точек следует после каждого повышения температуры на входе прибора t' на 10...15 °C.
4. Опыт повторить 4 раза.
5. По окончании испытания отключить электрический водонагреватель.

Таблица 6 – Исходные данные

№	ΔH , м вод. ст.	t' , °C	t'' , °C	$t_в$, °C	t , °C
1					
2					
3					
4					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. Определить расход теплоносителя, проходящего через нагревательный прибор, по формуле:

$$G = 3600 \mu f \rho \sqrt{2 g \Delta H}, \text{ кг/ч,} \quad (1)$$

где μ - коэффициент расхода диафрагмы, зависящий от отношения диаметров диафрагмы и трубы, в которой она установлена. Для диафрагмы $d = 0,008$ м, диаметр трубы, отводящей воду от прибора, $D = 0,015$ м. Для лабораторной установки принимаем значение $\mu = 0,624$;

$f = \pi d^2 / 4$ – площадь отверстия диафрагмы, м²;

ρ - плотность воды (см. табл. 8 по средней температуре воды), кг/м³;

g - ускорение свободного падения, (9,8) м/с²;

ΔH - перепад давления до и после диафрагмы (м).

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

2. Определить количество теплоты, отданного нагревательным прибором в окружающую среду, по формуле:

$$Q = G c (t' - t''), \text{ кДж / ч,} \quad (2)$$

где c – теплоемкость воды, кДж/кг·К (см. табл.8);

t' и t'' – температура воды на входе в нагревательный прибор и выходе из него, °C ;

G - расход теплоносителя, кг/ч.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

3. Определить коэффициент теплопередачи нагревательного прибора водяного отопления по формуле:

$$K = \frac{Q}{3600 F(t - t_c)}, \text{ Вт} / \text{ м}^2 \text{ К}, \quad (3)$$

где Q – количества тепла, кДж/ч;

F – поверхность нагрева прибора, м²;

$$F = n f_c = 8 \cdot 0,254 = 2,03 \text{ м}^2,$$

где n – количество секций нагревательного прибора;

f_c - поверхность нагрева одной секции, м².

1.

2.

3.

4.

4. Результаты вычислений, найденные по формулам (1-3), занести в таблицу 7.

Таблица 7 – Расчетные величины

Номер опыта	G, кг/ч	Q, кДж/ч	K, Вт/м ² ·К	Δt = (t' - t''), °C
1				
2				
3				
4				

5. Построить график зависимости коэффициента теплопередачи K от разности температур воды Δt на входе и выходе из нагревательного прибора водяного отопления

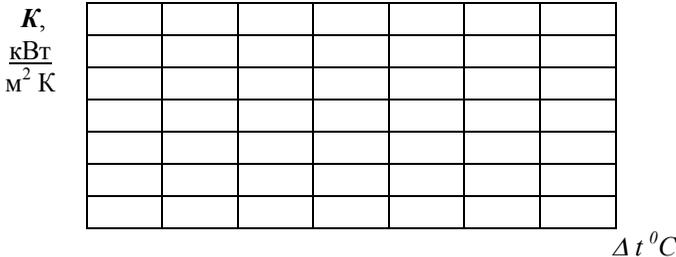


Рис. 5 График зависимости $K = f(\Delta t)$

Выводы: _____

Работу выполнил: _____
(подпись)

Работу принял: _____
(подпись)

Таблица 8 – Физические параметры воды

t , °C	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Pr
0	999,8	4,24	0,551	1788,5	1,79	13,7
5	999,7	4,228	0,563	1528,8	1,540	11,3
10	998,9	4,211	0,586	1127	1,100	8,15
15	998,55	4,209	0,5925	1063,3	1,05	7,605
20	998,2	4,207	0,599	999,6	1,000	7,06
25	996,9	4,207	0,608	896,7	0,910	6,2
30	995,6	4,203	0,618	800,7	0,805	5,5
35	993,9	4,203	0,626	715,4	0,72	4,85
40	992,2	4,203	0,634	652,7	0,659	4,3
45	990,1	4,203	0,641	602,7	0,615	3,9
50	988	4,203	0,648	548,8	0,556	3,56
55	985,6	4,203	0,654	504,7	0,515	3,25
60	983,2	4,207	0,659	470,4	0,479	3
65	980,5	4,211	0,664	436,1	0,445	2,75
70	977,7	4,215	0,668	405,7	0,413	2,56
75	974,8	4,215	0,671	377,3	0,385	2,35
80	971,8	4,219	0,675	355,7	0,366	2,23
85	968,5	4,224	0,678	347,9	0,347	2,1
90	965,3	4,228	0,68	314,6	0,326	1,95
95	961,8	4,23	0,6815	298,4	0,3105	1,85
100	958,3	4,232	0,683	282,2	0,295	1,75

Лабораторная работа №4 ИСПЫТАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Определение коэффициента теплопередачи водяного теплообменника, работающего по схеме прямотока и противотока.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА. Объектом испытания служит установка, выполненная в виде простейшего водяного теплообменника, состоящего из четырех одинаковых секций, которые выполнены в виде труб, помещенных одна в другую (рис 6).

Циркуляционный контур горячей воды 4 включает в себя электрический водонагреватель 1, центробежный насос 3, трубу теплообменника 2.

Холодная водопроводная вода нагревается в пространстве между трубами теплообменника, стекает в сливной трубопровод и отводится в канализацию.

Для контроля за расходом теплоносителя в течение опыта, в линии горячей 4 и холодной воды 7 врезаны ротаметры 5,6, снабженные водомерными стеклами с тарировочной шкалой.

Температуру первичного и вторичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника измеряют при помощи датчиков электронных термометров.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

При испытании установки на прямотоке выполняют следующие операции:

Открывают последовательно кран 1,2,3 для пуска холодной воды в установку. Расход холодной воды меняют вентилем 3. Для первой точки установить 70, для второй – 90, третьей – 120, четвертой – 150 кг/ч (табл. 9).

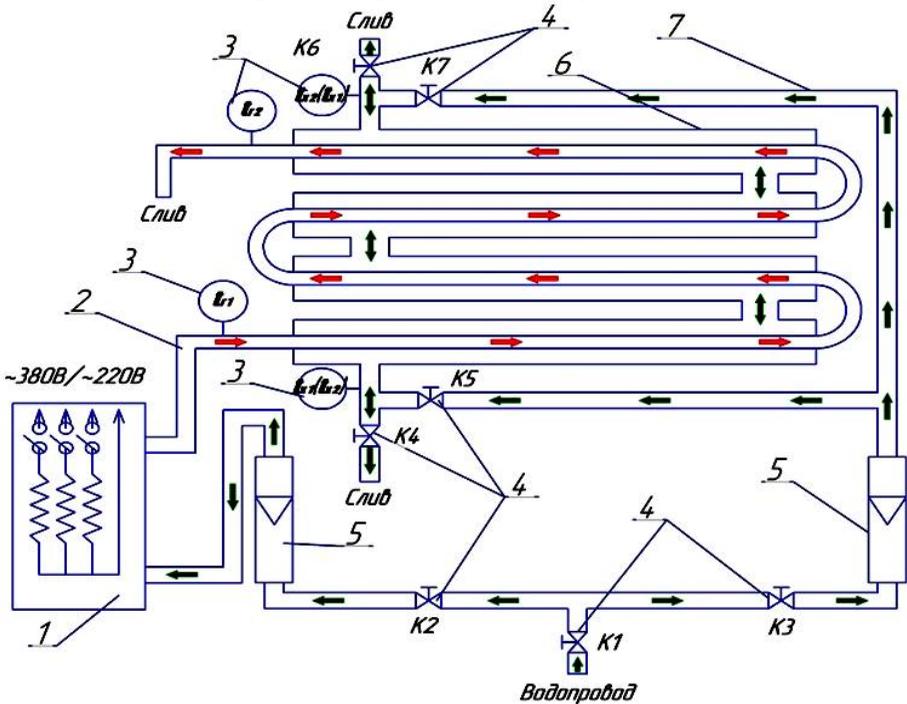


Рис. 6. Схема водяного теплообменника:

1-водонагреватель; 2-линия горячей воды; 3-дачки термометра; 4-кран; 5-ротамер; 6-теплообменник; 7-линия холодной воды.

Расход на отводящей трубе линии горячей воды при помощи вентиля 2 устанавливают постоянным, равным 90 кг/ч (20 делений по ротамеру). Прогревают установку до наступления установившегося режима, характеризующегося постоянством во времени температур первичного и вторичного теплоносителя на входе. При этом температура горячей воды на входе в подогреватель должна быть в пределах 60...70 °С. При испытании установки снимаются следующие измеряемые параметры:

- температура горячей воды на входе t'_1 °С;
- температура горячей воды на выходе t''_1 °С;
- средняя температура горячей воды $t_1 = 0,5(t'_1 + t''_1)$;
- температура холодной воды на входе t'_2 °С;
- температура холодной воды на выходе t''_2 °С;

- средняя температура холодной воды $t_2 = 0,5(t'_2 + t''_2)$;
- температура стенки внутренней трубы $t_c = 0,5(t_1 + t_2)$;
- расход горячей воды G_1 кг/ч;
- расход холодной воды G_2 кг/ч.

Таблица 9 – Тарировочная таблица

Показания ротаметра	Расход, кг/ч
10	70
20	90
30	120
40	150
50	170
60	240

Как только будет достигнут установившийся режим работы установки на противотоке, с интервалом 1 мин, проводят 4 опыта.

По окончании испытания на противотоке отключают электронагреватель 1. Закрывают вентили 2, 3 и 1. Значения показателей всех величин, измеренных в течение опыта, заносят в таблицу 10.

Таблица 10 – Исходные данные

Номер опыта	t'_1 °C	t''_1 °C	t_1 °C	t'_2 °C	t''_2 °C	t_2 °C	t_c °C	G_1 , кг/ч	G_2 , кг/ч
1									
2									
3									
4									

Физические параметры холодной и горячей воды выбирают из таблицы 8 в зависимости от среднеарифметических температур.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. Определение скорости движения холодной и горячей воды

$$V = \frac{G}{3600 \rho S}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где ρ - плотность воды, кг/м³ (см. табл.8);

S – сечение для прохода воды:

$$\text{холодной } S_2 = \frac{\pi(D_6^2 - d_n^2)}{4} = \quad \text{м}^2; \text{ горячей } S_1 = \frac{\pi d_6^2}{4} = \quad \text{м}^2 \quad (2)$$

здесь внутренний диаметр внутренней трубы $d_6 = 0,013$ м, наружный диаметр внутренней трубы $d_n = 0,015$ м, внутренний диаметр внешней трубы $D_6 = 0,02$ м.

1.

2.

- 3.
- 4.
- 5.

2. Определение критериев Рейнольдса для горячей и холодной воды

$$R_{e1} = \frac{V_1 d_e}{\nu_1}; \quad R_{e2} = \frac{V_2 (D_e - d_n)}{\nu_2}. \quad (3)$$

где ν_1 и ν_2 - кинематическая вязкость горячей и холодной воды, м²/с (см. табл. 8).

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

3. Определение критериев Нуссельта холодной и горячей воды:

а) для ламинарного режима течения жидкости (при $R_e < 2300$)

$$N_u = 0,15 R_e^{0,33} P_r^{0,43} \left(\frac{P_r}{P_{rc}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

б) для турбулентного режима ($R_e > 2300$)

$$N_u = 0,021 R_e^{0,8} P_r^{0,43} \left(\frac{P_r}{P_{rc}} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где P_r – критерий Прандтля холодной и горячей воды (см. табл.8);

P_{rc} – критерий Прандтля пристеночной области (берется из табл.8 по температуре стенки).

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

4. Определение коэффициентов теплоотдачи

$$\alpha_1 = \frac{N_{u1}\lambda_1}{d_6}; \quad \alpha_2 = \frac{N_{u2}\lambda_2}{D_6 - d_n}, \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}, \quad (6)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности горячей и холодной воды, Вт/м·К (см. табл.8).

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

5. Определение коэффициентов теплопередачи по формулам:

а) через коэффициенты теплоотдачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad \text{Вт / м}^2 \cdot \text{К} \quad (7)$$

где $\delta = 0,5(d_n - d_b)$ – толщина стенки внутренней трубы, м;

$\lambda = 382$ Вт/м·К – коэффициент теплопроводности материала стенки;

б) через количество теплоты, переданной от греющей среды к нагреваемой:

$$K = \frac{Q}{3600 \cdot F (t_2 - t_1)}, \quad \text{Вт / м}^2 \cdot \text{К}, \quad (8)$$

где Q – количество переданной теплоты, кДж/ч;

F – поверхность нагрева внутренней трубы, м².

$$F = \pi \cdot d_n \cdot l \cdot n = \quad \text{м}^2, \quad (10)$$

где $l = 1$ м – длина трубы одной секции теплообменника;

$n = 4$ – количество секций.

- | | |
|----|----|
| 1. | 1. |
| 2. | 2. |
| 3. | 3. |
| 4. | 4. |

б. Количество переданного тепла и поверхность нагрева трубы определяют по формулам:

$$Q = G_2 c_2 (t_2'' - t_2'); \text{ кДж/ч,} \\ (9)$$

где c_2 – теплоемкость холодной воды, кДж/кг·К (см. табл.8);

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____

7. Значения величин, вычисленных по формулам (1-10), занести в таблицу 11, представленную в отчете.

Таблица 11 – Расчетные величины

Номер опыта	V_1 м/с	V_2 м/с	Re_1	Re_2	N_{u1}	N_{u2}	α_1 Вт/м ² К	α_2 Вт/м ² К	K (7) Вт/м ² К	K (8) Вт/м ² К
1										
2										
3										
4										

8. Построить графики зависимости коэффициента теплоотдачи (от внутренней трубы к холодной воде) и коэффициента теплопередачи между теплоносителями от скорости течения холодной воды, т.е. $\alpha = f(V_2)$ и $K = f(V_2)$.

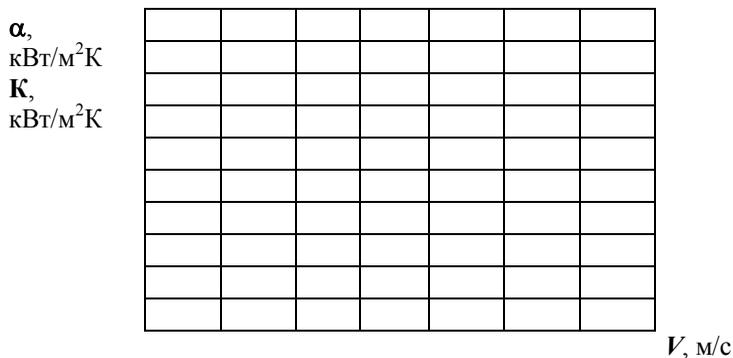


Рис. 7 Графики зависимостей $\alpha = f(V)$ и $K = f(V)$

Выводы:

Работу выполнил: _____
(подпись)

Работу принял: _____
(подпись)

Лабораторная работа № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ НАГРЕВАНИИ ЖИДКОСТИ В АППАРАТЕ С РУБАШКОЙ

Цель работы: определение и расчет тепловых потоков; составление теплового баланса; определение коэффициента теплопередачи опытным и расчетным путем.

Описание лабораторной установки

Объектом испытаний служит емкостный теплообменный аппарат с тепловой рубашкой. В аппарате установлена мешалка с приводом от червячного мотор редуктора.

Блок управления аппаратом позволяет контролировать и устанавливать заданную температуру продукта, температуру теплоносителя в рубашке, изменять число оборотов мешалки.

В рубашке установлен циркуляционный насос. Блок управления насосом позволяет контролировать и регулировать мощность насоса. А также контролировать температуру теплоносителя на входе и выходе из рубашки.

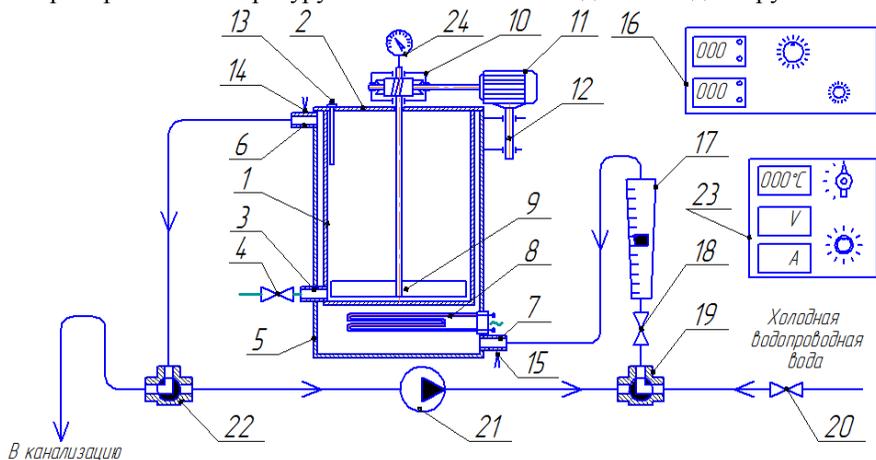


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки:

1 – цилиндрический аппарат; 2 – крышка; 3 – патрубок аппарата выпускной; 4 – кран сливной; 5 – рубашка; 6, 7 – штуцера рубашки; 8 – электронагреватель; 9 – мешалка; 10 – редуктор; 11 – электродвигатель; 12 – подвижная опора привода мешалки; 13 – термодатчик замера температуры продукта; 14, 15 – термопары замера температуры теплоносителя в рубашке на выходе и входе соответственно; 16 – блок управления тепловым аппаратом; 17 – ротаметр; 18 – регулирующий вентиль; 19, 22 – трехходовые краны; 20 – кран подачи воды из водопроводной сети; 21 – насос центробежный; 23 – блок управления насосом; 24 – тахометр.

Порядок проведения работы

1. Определить поверхность теплопередачи исходя из конструктивных размеров аппарата (рис.2):

$$F = \pi D_a h + 0,25\pi D_a^2 = \quad , \text{ м}^2 \quad (1)$$

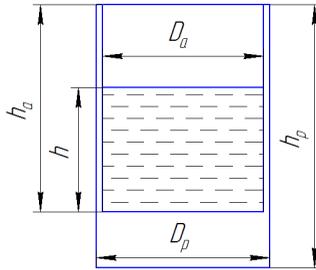


Рисунок 2 – К определению поверхности теплопередачи.

2. Рубашку теплообменного аппарата заполнить водой. Перевести трехходовой кран 19 на подачу из водопровода, открыв кран 20. Вентилем 18 регулировать подачу воды в рубашку. При этом трехходовой кран 22 переведен в положение слив в канализацию. После заполнения закрыть вентиль 18.
3. При использовании циркуляции теплоносителя, перевести краны 19 и 20 в соответствующее положение. Вентиль 18 открыть. Включить насос. Установить заданный расход теплоносителя G_1 по ротаметру 17, регулятором напряжения на блоке управления насосом 23.
4. Определить число оборотов мешалки 9 по тахометру 24.
5. В емкость аппарата залить отмеренное количество жидкости и записать значение $M_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ кг. Замерить уровень $h = \underline{\hspace{2cm}}$ м.
6. Включить электрический нагреватель 8.
7. Через каждые 3-5 мин. записываются показания цифрового индикатора температур, пока не будет достигнута требуемая температура продукта в аппарате.
8. Данные эксперимента свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	G_1 , кг/с	n, об/мин	$\Delta\tau$, мин	Температура, °С										
				продукта			теплоносителя							
				$t_{2н}$	$t_{2к}$	t_{cp2}	$t'_{1н}$	$t''_{1н}$	$t_{1н}$	$t'_{1к}$	$t''_{1к}$	$t_{1к}$	t_{cp1}	
1														
2														
...														
n														

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Теплота Q , отданная ТЭНом или общий тепловой поток, расходуется на нагревание теплоносителя в рубашке Q_1 за время $\Delta\tau$, на нагревание продукта в аппарате Q_2 и на потери теплоты в окружающую среду Q_n :

$$Q = IU = Q_1 + Q_2 + Q_n = \quad \text{Вт} \quad (2)$$

1. Определить тепловой поток Q_2 , (Вт) воспринимаемый продуктом в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_2 = M_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}) / \Delta\tau_i, \text{ Вт} \quad (3)$$

где M_2 – масса продукта в аппарате, кг;
 $t_{2н}$ – начальная температура продукта, °С;
 $t_{2к}$ – заданная конечная температура продукта, °С;
 c – средняя удельная теплоёмкость жидкостей при t_{cp} , Дж /кг·К;

$$t_{cp} = 0,5 (t_n + t_k) \quad (4)$$

В таблице физических свойств (см. табл. 8) при t_{cp} методом интерполяции определить значение c_1 и c_2 .

$\Delta\tau$ – продолжительность одного замера, с.

1.

2.

...

n.

2. Определить тепловой поток Q_1 , (Вт) воспринимаемый теплоносителем в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_i = G_1 c_1 (t_{1к} - t_{1н}) = \quad \text{Вт}, \quad (5)$$

где G_1 – расход теплоносителя, кг/с;

Для случая естественной конвекции теплоносителя в рубашке, Q_1 определить по формуле (3) подставив соответствующие значения M_1 , c_1 , и $(t_{1к} - t_{1н})$;

$t_{1н}$, $t_{1к}$ – начальная и конечная температура теплоносителя, °С.

1.

2.

...

n.

3. Определить суммарные тепловые потери Q_n в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_n \approx Q - (Q_1 + Q_2). \quad (6)$$

1.

2.

...

n.

3. Определить среднюю движущую силу процесса теплопередачи, в случае нагревания жидкости по формуле:

$$\Delta t_{cp i} = \frac{t_{1к} - t_{1н}}{\ln(t_{1н} - t_{2н}) / (t_{1к} - t_{2н})} \frac{A - 1}{A \cdot \ln A}, \quad (7)$$

где $A = (t_{1н} - t) / (t_{1к} - t_{1н})$;

t – температура продукта в конце каждого временного интервала, °С.

1.

2.

...

n.

4. Рассчитать опытные значения коэффициента теплопередачи в после каждого замера по формуле:

$$K_{on i} = \frac{Q_{2i}}{F \Delta t_{cp i} \Delta \tau_i}, \quad (8)$$

1.

2.

...

n.

5. Определить среднюю скорость движения теплоносителя в рубашке в случае циркуляции

$$v = \frac{G_1}{3600 \rho S}, \quad \text{м/с}, \quad (9)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³ (см. табл. приложений);

S – сечение для прохода теплоносителя:

$$S = \frac{\pi(D_p^2 - D_a^2)}{4} = \quad \text{м}^2 \quad (10)$$

1.

2.

...

n.

6. Определить критерий Рейнольдса для теплоносителя:

$$Re = \frac{v h_p}{\nu}, \quad (11)$$

где ν – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с. (см. табл. 8).

1.

2.

...

n.

Определяющим геометрическим размером является высота вертикальной поверхности теплообмена, для горизонтальных труб – их диаметр. Определяющая температура – средняя температура теплоносителя.

7. Определить коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке аппарата по уравнениям (12,17,18,19).

Для расчета числа критерия Нуссельта при вынужденном движении потока в прямых трубах или каналах можно рекомендовать следующие уравнения:

а) для ламинарного режима движения теплоносителя, $Re \leq 2320$:

$$Nu_1 = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где Pr – критерий Прандтля для жидкости по t_{cp} из таблиц приложения.

Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta Th^3}{\nu^2}, \quad (13)$$

1.

2.

...

n.

здесь g – ускорение свободного падения ($g = 9,81$ м/с²);

β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, К⁻¹; для капельной жидкости:

$$\beta \approx \frac{\rho_{ж} - \rho}{\rho_{ж}(t - t_{ж})} \quad (14)$$

здесь $\rho, \rho_{ж}$ – плотность прогретой и холодной жидкости (см. табл. 8), кг/м³; $t, t_{ж}$ – температура прогретой и холодной жидкости, °С;

ν – кинематическая вязкость (см. табл. 8), м²/с;

1.

2.

...

n.

Δt – расчетный температурный напор (разность температуры жидкости и стенки), К;

$$\Delta t = t_{жс} - t_{см} \quad (15)$$

1.

2.

...

n.

$Pr_{см}$ – критерий Прандтля пристеночной области (берется из таблиц приложений по температуре стенки);

$$t_{см} = 0,5(t_{ср1} + t_{ср2}), \quad (16)$$

здесь $t_{ср1}$, $t_{ср2}$ – средние температуры теплоносителя и продукта в рубашке, °С.

1.

2.

...

n.

б) для переходного режима движения теплоносителя $2320 \leq Re < 10000$:

$$Nu_1 = C \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{см}} \right)^{0,25}, \quad (17)$$

Значение коэффициента C определяется из таблицы 1.2 в зависимости от величины критерия Рейнольдса.

Значение коэффициента C

$Re \cdot 10^{-3}$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	8	10
C	1,9	2,2	3,3	3,8	4,4	6	10,3	15,5	19,5	27,0	33,0

Для приближенных расчетов можно пользоваться уравнением:

$$Nu_1 = 0,008 \cdot Re^{0,9} Pr^{0,43}, \quad (18)$$

в) для турбулентного режима движения теплоносителя $Re \geq 10000$

$$Nu_1 = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (19)$$

1.

2.

...

n.

8. Для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции в рубашке использовать критериальное уравнение следующего вида:

$$Nu_1 = B (Gr \cdot Pr)^n (Pr / Pr_c)^{0,25} \quad (20)$$

где Gr – критерий Грасгофа, характеризующий подъемную силу при конвекции потоков теплоносителя определить по формулам (13) – (16).

Значения коэффициента B и показателя степени n принимается в зависимости от произведения $Gr \cdot Pr$. Для вертикальной трубы при $Gr \cdot Pr = 10^3 - 10^9$ $B = 0,76$ $n = 0,25$; при $Gr \cdot Pr > 10^9$ $B = 0,15$ $n = 0,333$;

9. Определить безразмерный коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к продукту по следующим критериальным уравнениям:
- с использованием мешалки.

$$Nu_2 = 0,36 Re_m^{0,67} Pr^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \Gamma, \quad (21)$$

где Re_m – модифицированный критерий Рейнольдса:

$$Re_m = \frac{nd_m^2 \rho}{\mu} \quad (22)$$

1.

2.

...

п.

здесь n – частота вращения мешалки, c^{-1} ;

d_m – диаметр мешалки, м;

μ – вязкость перемешиваемой среды при средней температуре, Па·с;

Γ – симплекс геометрического подобия:

$$\Gamma = \frac{d_m}{D_a} = \quad , \quad (23)$$

здесь D_a – диаметр аппарата, м;

$\mu_{ст}$ – вязкость среды при температуре стенки нагревателя. Па·с.

Pr – критерий Прандтля для продукта по t_{cp} из таблиц приложения.

1.

2.

...

п.

- без использования мешалки.

$$Nu_2 = C(Gr \cdot Pr)^n (Pr / Pr_{ст})^{0,25} \quad (24)$$

при естественной конвекции продукта в аппарате критерий Грасгофа определить по формулам (13-16) по соответствующим температурам продукта в аппарате, за характерный размер принять h (см. рис. 2)

Значения коэффициента C и показатель степени n зависит от режима и определяется из таблицы 1.3

Таблица 1.3

Значения коэффициента C и показателя степени n

Режим	$Gr \cdot Pr$	C	n
Ламинарный	$1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Переходный	$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентный	$2 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^{12}$	0,185	0,33

9. Определить значения коэффициентов теплоотдачи, соответственно, от горячего теплоносителя к разделяющей стенке α_1 и от стенки к продукту α_2 по формуле:

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{l}; \quad \alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{l}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (25)$$

где l – характерный размер, м, (принять $l=h$);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

- | | |
|-----|-----|
| 1. | 1. |
| 2. | 2. |
| ... | ... |
| n. | n. |

10. Определить теоретическое значение коэффициента теплопередачи по выражению:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (26)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \left(r_{\text{заг.1}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{см1}}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{см2}}} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_{\text{смn}}} + r_{\text{заг.n+1}} \right)$ - сумма термических сопротивлений

всех слоев стенки, включая термические сопротивления загрязнений внутренней и наружной стенок теплообменной поверхности $r_{\text{заг.1}}$, $r_{\text{заг.n+1}}$, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$).

Для воды можно принять $1/r_{\text{заг.1}} = 1/r_{\text{заг.n+1}} = 1600$ ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

δ – толщина стенки, м;

$\lambda_{\text{см}}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки, ($\lambda_{\text{см}} = 16 \dots 18$), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

- | |
|-----|
| 1. |
| 2. |
| ... |
| n. |

Таблица 1.4

Результаты расчетов.

№ п/п	Время, мин	$\Delta t_{\text{ср}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$K_{\text{оп}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$\alpha_1, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$\alpha_2, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$K, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$
1						
2						
.						
n						

11. Построить графики зависимости коэффициентов $K_{\text{оп}} = f(\Delta\tau)$, $\alpha_1 = f(\Delta\tau)$, $\alpha_2 = f(\Delta\tau)$, $K = f(\Delta\tau)$ от времени.

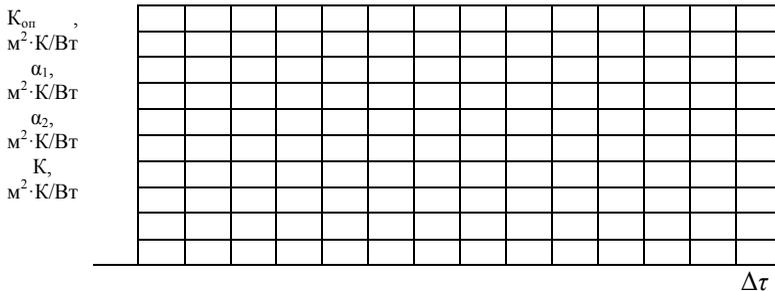


Рисунок 3 – График зависимостей $K_{оп} = f(\Delta\tau)$, $\alpha_1 = f(\Delta\tau)$, $\alpha_2 = f(\Delta\tau)$, $K = f(\Delta\tau)$.

12. Сравнить опытное и расчетное значения коэффициента теплопередачи, сделать выводы по работе.

Выводы:

Работу выполнил: _____ Работу принял: _____
(подпись) (подпись)

Лабораторная работа № 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЖИДКОСТИ В АППАРАТЕ С РУБАШКОЙ

Цель работы: определение и расчет тепловых потоков; составление теплового баланса; определение коэффициента теплопередачи опытным и расчетным путем.

Описание лабораторной установки

Объектом испытаний служит емкостный теплообменный аппарат с тепловой рубашкой. В аппарате установлена мешалка с приводом от червячного мотор редуктора.

Блок управления аппаратом позволяет контролировать и устанавливать заданную температуру продукта, температуру теплоносителя в рубашке, изменять число оборотов мешалки.

В рубашке установлен циркуляционный насос. Блок управления насосом позволяет контролировать и регулировать мощность насоса. А также контролировать температуру теплоносителя на входе и выходе из рубашки.

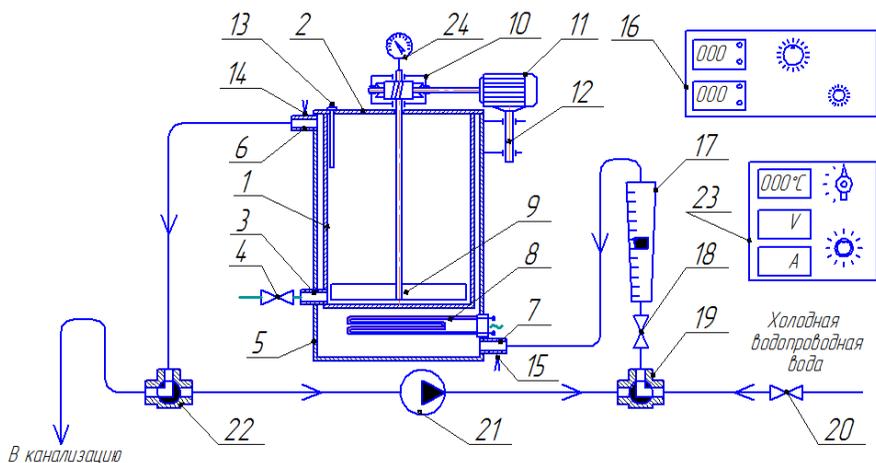


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки:

1 – цилиндрический аппарат; 2 – крышка; 3 – патрубок аппарата выпускной; 4 – кран сливной; 5 – рубашка; 6, 7 – штуцера рубашки; 8 – электронагреватель; 9 – мешалка; 10 – редуктор; 11 – электродвигатель; 12 – подвижная опора привода мешалки; 13 – термодатчик замера температуры продукта; 14, 15 – термопары замера температуры теплоносителя в рубашке на выходе и входе соответственно; 16 – блок управления тепловым аппаратом; 17 – ротаметр; 18 – регулирующий вентиль; 19, 22 – трехходовые краны; 20 – кран подачи воды из водопроводной сети; 21 – насос центробежный; 23 – блок управления насосом; 24 – тахометр.

Порядок проведения работы

1. Определить поверхность теплопередачи исходя из конструктивных размеров аппарата (рис.2):

$$F = \pi D_a h + 0,25\pi D_a^2 = \quad , \text{ м}^2 \quad (1)$$

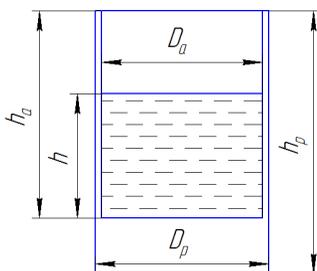


Рисунок 2 – К определению поверхности теплопередачи.

2. Рубашку теплообменного аппарата заполнить водой. Перевести трехходовой кран 19 на подачу из водопровода, открыв кран 20. Вентилем 18 регулировать подачу воды в рубашку. При этом трехходовой кран 22

переведен в положение слив в канализацию. После заполнения закрыть вентиль 18.

3. В емкость аппарата залить отмеренное количество жидкости. Включить электрический нагреватель 8, довести температуру воды до заданного значения, после чего нагреватель отключить.

4. С помощью вентиля 18 по ротаметру 17 установить требуемый расход охлаждающей воды в рубашке 5.

5. Определить число оборотов мешалки 9 по тахометру 24.

6. Через каждые 3-5 мин. записываются показания цифрового индикатора температур, пока не будет достигнута требуемая температура охлаждаемой воды.

7. Данные эксперимента свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	G_2 , кг/с	n, об/мин	$\Delta\tau$, мин	Температура, °С										
				продукта			охлаждающей воды							
				$t_{1н}$	$t_{1к}$	t_1	$t'_{2н}$	$t''_{2н}$	$t_{2н}$	$t'_{2к}$	$t''_{2к}$	$t_{2к}$	t_2	
1														
2														
...														
n														

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Определить тепловую нагрузку аппарата из уравнения теплового баланса без учета теплотерь и теплопритоков:

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2н} - t_{2к}) \Delta\tau = \text{Дж}, \quad (2)$$

где G_1 – масса жидкости в аппарате, кг;

G_2 – расход охлаждающей воды, кг/с;

c – средняя удельная теплоёмкость жидкостей при t_{cp} , Дж/кг·К;

$$t_{cp} = 0,5 (t_n + t_k) \quad (3)$$

В таблице физических свойств воды (см. Приложение) при t_{cp} методом интерполяции определяем значение c_1 и c_2 .

$t_{1н}$ – заданная начальная температура охлаждаемой жидкости, °С;

$t_{1к}$ – заданная конечная температура охлаждаемой жидкости, °С;

$t_{2н}, t_{2к}$ – начальная и конечная температура охлаждающей жидкости, °С;

$\Delta\tau$ – общее время охлаждения, с.

2. Определить количество теплоты, полученное холодной водой в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_i = G_2 c_2 (t_{2н} - t_{2к}) \Delta\tau_i \quad (4)$$

1.

2.

...

n.

3. Определить среднюю движущую силу процесса теплопередачи, в случае охлаждения жидкости по формуле:

$$\Delta t_{cp_i} = \frac{t_{1н} - t_{1к}}{\ln(t_{1н} - t_{2н}) / (t_{1к} - t_{2н})} \frac{A - 1}{A \cdot \ln A}, \quad (5)$$

где $A = (t - t_{2н}) / (t - t_{2к})$;

t – температура охлаждаемой жидкости в конце каждого временного интервала, °С.

1.

2.

...

n.

4. Рассчитать опытные значения коэффициента теплопередачи в после каждого замера по формуле:

$$K_{on_i} = \frac{Q_i}{F \Delta t_{cp_i} \Delta \tau_i}, \quad (6)$$

1.

2.

...

n.

5. Определить безразмерный коэффициент теплоотдачи от жидкости в аппарате к стенке по следующим критериальным уравнениям:

- с использованием мешалки.

$$Nu_1 = 0,36 Re_m^{0,67} Pr^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \Gamma, \quad (7)$$

где Re_m – модифицированный критерий Рейнольдса:

$$Re_m = \frac{nd_m^2 \rho}{\mu} \quad (8)$$

1.

2.

...

п.

здесь n – частота вращения мешалки, с^{-1} ;

d_m – диаметр мешалки, м;

μ – вязкость перемешиваемой среды при средней температуре, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

Γ – симплекс геометрического подобия:

$$\Gamma = \frac{d_m}{D_a} = \quad , \quad (9)$$

здесь D_a – диаметр аппарата, м;

$\mu_{\text{ст}}$ – вязкость среды при температуре стенки нагревателя. $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Pr – критерий Прандтля для продукта по t_{cp} из таблиц приложения.

1.

2.

...

п.

- без использования мешалки.

При свободном движении теплоносителя (естественная конвекция):

$$Nu_l = C(Gr \cdot Pr)^n (Pr / Pr_{\text{ст}})^{0,25} \quad (10)$$

где Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T h^3}{\nu^2} , \quad (11)$$

1.

2.

...

п.

где g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, К^{-1} ;
для капельной жидкости:

$$\beta \approx \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho}{\rho_{\text{ж}}(t - t_{\text{ж}})} \quad (12)$$

здесь $\rho, \rho_{\text{ж}}$ – плотность прогретой и холодной жидкости, кг/м^3 ;

$t, t_{\text{ж}}$ – температура прогретой и холодной жидкости, $^{\circ}\text{C}$;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

1.

2.

...

n.

ΔT – расчетный температурный напор (разность температуры стенки и жидкости), К;

$$\Delta t = t_{cm} - t_{жк} \quad (13)$$

1.

2.

...

n.

Pr_{cm} – критерий Прандтля пристеночной области (берется из таблиц приложений по температуре стенки);

$$t_{cm} = 0,5(t_1 + t_2), \quad (14)$$

1.

2.

...

n.

здесь t_1, t_2 – средние температуры продукта и воды в рубашке, °С.

Значения коэффициента C и показатель степени n зависят от режима и определяется из таблицы 1.2 (см. лаб. раб №5 табл. 1.2)

б. Определить скорость движения охлаждающей воды в рубашке

$$V = \frac{G}{3600 \rho S}, \text{ м/с}, \quad (15)$$

где ρ – плотность охлаждающей воды, кг/м³ (см. табл. приложений);

S – сечение для прохода воды:

$$S = \frac{\pi(D_p^2 - D_a^2)}{4} = \quad \text{м}^2 \quad (16)$$

1.

2.

...

п.

7. Определить критерий Рейнольдса для охлаждающей воды

$$Re = \frac{V h_p}{\nu}, \quad (17)$$

где ν – кинематическая вязкость охлаждающей воды, $\text{м}^2/\text{с}$. (см. табл. приложений).

1.

2.

...

п.

6. Определить коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к охлаждающей воде по уравнениям (15-18).

Для расчета числа критерия Нуссельта при вынужденном движении потока в прямых трубах или каналах можно рекомендовать следующие уравнения:

а) для ламинарного режима движения теплоносителя, $Re \leq 2320$:

$$Nu_2 = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (15)$$

где Pr_{cm} – критерий Прандтля пристеночной области (берется из таблиц приложений по температуре стенки);

В случае ламинарного движения охлаждающей воды в рубашке критерий Грасгофа определить по формулам (11-13) по соответствующим температурам воды в рубашке, за характерный размер принять h_p (см. рис. 2)

б) для переходного режима движения теплоносителя $2320 \leq Re < 1000$:

$$Nu_2 = C \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

Значение коэффициента C определяется из таблицы 1.3 в зависимости от величины критерия Рейнольдса.

Для приближенных расчетов можно пользоваться уравнением:

$$Nu_2 = 0,008 \cdot Re^{0,9} Pr^{0,43}, \quad (17)$$

Значение коэффициента C (см. таб. раб №5 табл. 1.3)

в) для турбулентного режима движения теплоносителя $Re \geq 10000$

$$Nu_2 = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (18)$$

1.

2.

...

n.

7. Определить значения коэффициентов теплоотдачи, соответственно, от горячего теплоносителя к разделяющей стенке α_1 и от стенки к холодному теплоносителю α_2 по формуле:

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{l}; \quad \alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{l}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (19)$$

где l – характерный размер, м, (принять $l = \delta$);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

1.

1.

2.

2.

...

...

n.

n.

8. Определить теоретическое значение коэффициента теплопередачи по выражению:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (20)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \left(r_{заг.1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + r_{заг.n+1} \right)$ – сумма термических сопротивлений

всех слоев стенки, включая термические сопротивления загрязнений внутренней и наружной стенок теплообменной поверхности $r_{заг.1}$, $r_{заг.n+1}$, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$).

Для воды можно принять $1/r_{заг.1} = 1/r_{заг.n+1} = 1600$ ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

δ – толщина стенки, м;

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала стенки, ($\lambda_{cm} = 16 \dots 18$), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

1.

2.

...

n.

Таблица 1.4

Результаты расчетов.

№ п/п	Время, мин	$\Delta t_{cp}, ^\circ C$	$K_{оп}, м^2 \cdot K/Вт$	$\alpha_1, м^2 \cdot K/Вт$	$\alpha_2, м^2 \cdot K/Вт$	$K, м^2 \cdot K/Вт$
1						
2						
.						
n						

9. Построить графики зависимости коэффициентов $K_{оп}=f(\Delta\tau)$, $\alpha_1=f(\Delta\tau)$, $\alpha_2=f(\Delta\tau)$, $K=f(\Delta\tau)$ от времени.

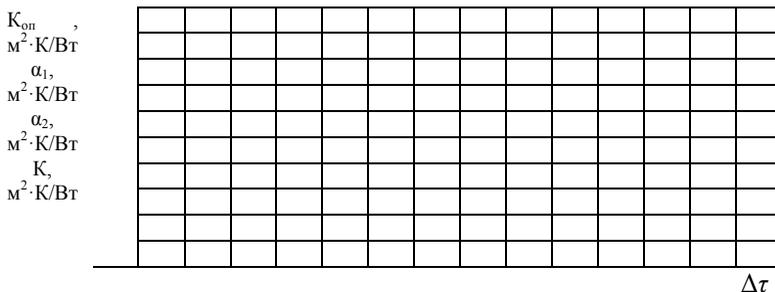


Рисунок 3 – График зависимостей $K_{оп}=f(\Delta\tau)$, $\alpha_1=f(\Delta\tau)$, $\alpha_2=f(\Delta\tau)$, $K=f(\Delta\tau)$.

10. Сравнить опытное и расчетное значения коэффициента теплопередачи, сделать выводы по работе.

Выводы:

Работу выполнил: _____ Работу принял: _____
 (подпись) (подпись)

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА

Цель работы: изучение процесса конденсации водяного пара: составление теплового баланса; определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Описание схемы лабораторной установки

Принципиальная схема установки изображена на рис. 1. Установка состоит из теплообменника-конденсатора (1), испарителя (парового котла) (2), регулятора напряжения (4), мерника конденсата (6). Испаритель снабжен электрическим нагревателем, напряжение, на клеммах которого может изменяться с помощью регулятора напряжения. Таким образом, регулируется тепловая мощность испарителя и как следствие его производительность по пару. Пар из испарителя поступает в теплообменник типа труба в трубе, где конденсируется на внутренней поверхности трубы. Конденсат водяного пара стекает в мерник (6). В межтрубном пространстве движется охлаждающая вода, расход которой регулируется с помощью вентиля (12) и контролируется по ротаметру (5). Измерение температуры материальных потоков осуществляется термопарами, подключенными к цифровому индикатору (7).

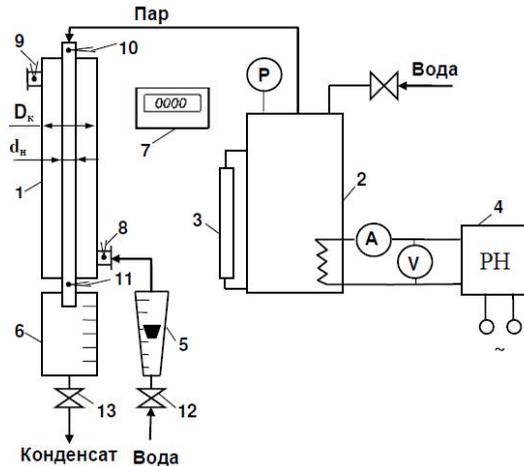


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки:

1 - теплообменник-конденсатор; 2 - паровой котел; 3 - уровнемер; 4 - регулятор напряжения; 5 - ротаметр; 6 - мерник конденсата; 7 - цифровой индикатор; 8, 9, 10, 11 - термопары; 12, 13 - вентили.

Порядок выполнения работы

1. Емкость испарителя заполняется водой до указанной отметки на уровнемере (3).
2. Включается электронагреватель и вода в испарителе доводится до кипения.

3. Регулированием тепловой мощности испарителя устанавливается заданная производительность по пару.
4. С помощью вентиля (12) и ротаметра (5) устанавливают заданный расход охлаждающей воды, которая подается в конденсатор.
5. Выход установки на стационарный режим работы контролируется по показаниям термомпары (9).
6. По достижении стационарного теплового режима, характеризующегося постоянством температуры охлаждающей воды на выходе из конденсатора, на протяжении 10 - 15 минут с интервалом 2-3 минуты записывают показания термомпар и уровень конденсата в сборнике. Кроме того, в таблицу 1 заносятся следующие параметры: сила тока и напряжение, показания ротаметра и массовый расход охлаждающей воды, определяемый по калибровочному графику.
7. Записываются геометрические размеры теплообменника, приведенные на лабораторном стенде.
8. По истечении заданного времени установка выключается. При этом сначала отключается нагреватель испарителя. а затем прекращается подача охлаждающей воды. При проведении опыта следует контролировать объём воды в испарителе по уровнемеру. При снижении уровня до **минимальной** отметки установка немедленно выключается для предотвращения выхода из строя нагревательного элемента.

Таблица 1

Таблица экспериментальных данных

№ п/п	Время, с	V, мл	Деления ротаметра	G _{в.} кг/с	Температура				I, А	U, В
					t _{вн}	t _{вк}	t _{нас}	t _к		
1										
2										
3										
...										
n										

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитываем расход насыщенного пара:

$$D = V \cdot \rho_k / \tau_{\text{он}}, \quad (1)$$

где V – объём конденсата (м³); собранного за время $\tau_{\text{он}}$ – стационарного режима работы; ρ_k – плотность конденсата (воды), кг/м³.

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

2. Определяем коэффициент полезного действия испарителя:

$$\eta = D \cdot r_{\text{исп}} / U \cdot I, \quad (2)$$

где $r_{\text{исп}}$ – теплота парообразования. Дж/(кг·К).

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

3. Проверяем тепловой баланс конденсатора: $Q_1 + Q_2 = Q_3$

Тепловой поток от конденсирующегося пара:

$$Q_1 = D \cdot r_{\text{исп}}. \quad (3)$$

Тепловой поток от охлаждающегося конденсата:

$$Q_2 = D \cdot c_k (t_{\text{нас}} - t_k). \quad (4)$$

Тепловой поток, подводимый к охлаждающей воде:

$$Q_3 = G_B \cdot c_B \cdot (t_{\text{вк}} - t_{\text{вн}}). \quad (5)$$

В этих уравнениях: G_B – расход воды, кг/с; c_k, c_B – теплоемкости конденсата и воды, Дж/(кг·К); $t_{\text{нас}}, t_k$ – температуры насыщенного пара и конденсата. $t_{\text{вк}}, t_{\text{вн}}$ – начальная и конечная температуры охлаждающей воды. °С.

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

4. Рассчитываем среднюю разность температур между теплоносителями:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вк}} - t_{\text{вн}}}{\ln(t_{\text{нас}} - t_{\text{вн}}) / (t_{\text{нас}} - t_{\text{вк}})}. \quad (6)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

5. Находим поверхность теплообмена:

$$F = \pi \cdot d_{\text{ср}} \cdot L = \quad , \quad (7)$$

где L – длина трубы, м; $d_{\text{ср}} = 0,5(d_{\text{н}} + d_{\text{в}})$ – средний диаметр трубы.

6. Определяем коэффициент теплопередачи по опытным данным:

$$K_{on} = \frac{Q_3}{F \cdot \Delta t_{cp}}. \quad (8)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

7. Находим расчетное значение коэффициента теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (9)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи со стороны конденсирующегося пара и охлаждающей воды; $\delta_{ст}$ – толщина стенки трубы. $\lambda_{ст}$ – теплопроводность материала стенки.

При определении коэффициента теплоотдачи со стороны конденсирующегося пара можно использовать уравнения (1.58). (1.59) в зависимости от расположения конденсатора в пространстве.

- для пучка вертикальных труб

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{жс} \sqrt[3]{\frac{\rho_{жс}^2 \cdot d_n \cdot n_{мп}}{\mu_{жс} \cdot G_n}}; \quad (10)$$

- для пучка горизонтальных труб

$$\alpha_1 = 2,02 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{жс} \sqrt[3]{\frac{\rho_{жс}^2 \cdot L_{мп} \cdot n_{мп}}{\mu_{жс} \cdot G_n}}. \quad (11)$$

где ε – усредненный для всего пучка труб коэффициент, зависящий от расположения труб и их числа в вертикальном ряду; $L_{мп}$ – длина трубы; d_n – наружный диаметр трубы; $n_{мп}$ – число труб; G_n – массовый расход пара. Теплофизические свойства конденсата $\lambda_{жс}$, $\mu_{жс}$, $c_{жс}$, $\rho_{жс}$ – определяются при средней температуре пленки конденсата $t=0,5(t_{ст} + t_{нас})$. Для одиночной трубы $\varepsilon=1$.

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

Расчет коэффициента теплоотдачи со стороны охлаждающей жидкости проводят в следующем порядке.

Находим скорость движения жидкости:

$$W = \frac{G}{0,785(D_k^2 - d_n^2) \cdot \rho}. \quad (11)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

Определяют режим движения жидкости, характеризующийся критерием Рейнольдса:

$$Re = \frac{W \cdot d_s \cdot \rho}{\mu}, \quad (12)$$

где ρ – плотность воды при средней температуре кг/м³; μ – вязкость воды при средней температуре, Па·с.

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

Эквивалентный диаметр канала кольцевого сечения (см. рис.1):

$$d_3 = D_k - d_n = \quad (13)$$

В зависимости от режима движения жидкости выбирают критериальное уравнение для расчета критерия Нуссельта (12)-(19) (см. лаб. раб. №5), затем рассчитывают коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_3}, \quad (14)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- ...
- n

Рассчитывается коэффициент теплопередачи по формуле (9).

- 1.
- 2.

3.

...

n

9. Сравнивают численные значения опытного и расчетного коэффициентов теплопередачи.

10. Делают выводы по работе.

Выводы:

Работу выполнил: _____ Работу принял: _____
(подпись) (подпись)

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется процессом конденсации пара?
2. Какие существуют виды конденсации в зависимости от смачиваемости поверхности?
3. Запишите обобщенное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации.
4. Как определяются коэффициенты теплоотдачи при конденсации пара для пучка вертикальных и горизонтальных труб?
5. Каким образом определяют опытный и расчетный коэффициенты теплопередачи в представленной работе?

Лабораторная работа № 8 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТЕЛЯТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Построение рабочих характеристик центробежного вентилятора при заданной частоте вращения (напор, мощность и к.п.д. в зависимости от производительности).

Описание установки

Установка для снятия характеристик центробежного вентилятора показана на (рис. 1)

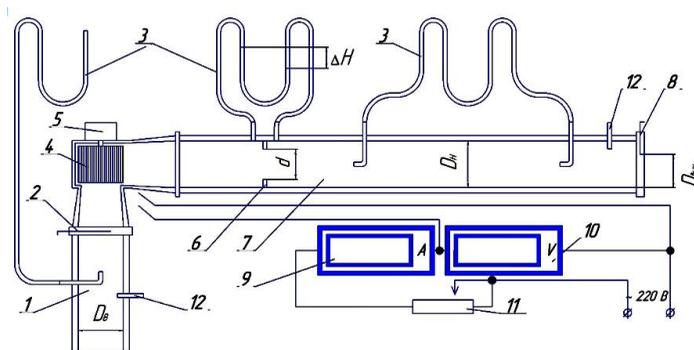


Рис. 1. Схема вентиляционной установки

- 1 – всасывающий воздуховод (диаметр $D_в = 100$ мм);
- 2 - заслонка;
- 3 - U – образный манометр;
- 4 - центробежный вентилятор;
- 5 - электродвигатель;
- 6 – мерная диафрагма (диаметр $d = 80$ мм);
- 7 - напорный воздуховод (диаметр $D_н = 100$ мм);
- 8 - заслонка ($D_{вых}$ устанавливается от 50 до 100 мм);
- 9 - амперметр;
- 10 - вольтметр;
- 11 - латр;
- 12 - термометр.

Напор во всасывающем и нагнетательном воздуховодах измеряется при помощи U - образных манометров, заполненных водой, соединённых с трубкой пито.

Производительность вентилятора определяется методом мерной диафрагмы 6, а меняется с помощью заслонки 8. Температура воздуха в воздуховодах измеряется термометрами 12.

Методика проведения работы

1. Включить питание установки;
2. Установить заслонкой 8 наибольший диаметр;

3. Установить напряжение $V = 10$ В;
4. Установить заслонкой 8 наименьший диаметр;
5. Снять показания измеряемых параметров и записать в таблицу 1:
 - показания пьезометра в всасывающем воздуховоде $h_в$, м;
 - показания пьезометра в нагнетательном воздуховоде $h_н$, м;
 - перепад давления на мерной диафрагме ΔH , м.;
 - температура воздуха во всасывающем воздуховоде $T_в$, °С (перевести в К);
 - температура воздуха в нагнетательном воздуховоде $T_н$, °С (перевести в К);
 - сила тока I , А, потребляемая электродвигателем;
 - диаметр сменная мембрана $D_{вых}$, м.

Последующие испытания проводятся аналогично, по окончании испытания отключить установку.

6. По полученным экспериментальным данным определить:
 - а) напор центробежного вентилятора;
 - б) мощность вентилятора;
 - в) к.п.д. вентилятора.
6. Построить характеристики вентилятора: напорную, мощностную и к.п.д., т.е.

$$H = f(Q_{вен}), N = f(Q_{вен}), \eta = f(Q_{вен}).$$

Таблица 1 Исходные данные

Номер опыта	$h_в, м.$	$h_н, м.$	$\Delta H, м.$	$T_в, К$	$T_н, К$	$I, А$	$U, В$	$D_{вых} м$
1								
2								
3								
4								

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. Определение абсолютного давления воздуха при входе и выходе из вентилятора по формулам

$$P_в = P_{AT} - \rho_{ж} g h_в, \text{ Па}, \quad (1)$$

где $P_{AT} = 10^5$ Па - атмосферное давление окружающего воздуха;

$\rho_{ж} = 1000$ кг /м³ - плотность воды, залитой в U- образные манометры;

g - ускорение свободного падения, м /с².

$h_в$ - показания пьезометра в всасывающем воздуховоде, м;

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

$$P_H = P_{AT} - \rho_{ж} g h_H, \text{ Па}, \quad (2)$$

где h_H - показания пьезометра в нагнетательном воздуховоде, м.;

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

2. *Определение плотности воздуха во всасывающем и нагнетательном воздуховоде по формулам (из уравнения Клапейрона)*

$$\rho_B = \frac{P_B}{R \cdot T_B}, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

где $R = 287$ Дж /кгК - газовая постоянная воздуха.

T_B - температура воздуха во всасывающем воздуховоде, °С

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

$$\rho_H = \frac{P_H}{R \cdot T_H}, \text{ кг/м}^3, \quad (4)$$

где T_H - температура воздуха в нагнетательном воздуховоде, °С

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

3. *Определение производительности вентилятора по формуле*

$$Q_{ВЕН} = \mu f \sqrt{\frac{2 g \Delta H \rho_{ж}}{\rho_H}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5)$$

где μ - коэффициент расхода диафрагмы, зависящий от отношения диаметра мембраны и диаметра воздуховода, в котором она устанавливается.

Принять $\mu = 0,764$;

$f = \pi d^2/4$ - площадь отверстия диафрагмы, м²;

d - диаметр мерной диафрагмы (диаметр $d = 80$ мм);

ΔH - перепад давления на мерной диафрагме, м.

1.

2.

3.

4.

4. Потери напора во всасывающем и нагнетательном воздуховоде в метрах воздушного столба определяем по формулам

$$H_B = \frac{h_B \cdot \rho_{ж}}{\rho_B}, \text{ м.} \quad (6)$$

1.

2.

3.

4.

$$H_H = \frac{h_H \cdot \rho_{ж}}{\rho_H}, \text{ м.} \quad (7)$$

1.

2.

3.

4.

5. Скорости воздуха на входе и выходе из вентиляционной установки определяем по формулам

$$V_B = \frac{Q_{ВЕИ}}{F_B}, \text{ м/с,} \quad (8)$$

где $F_B = \frac{\pi D_B^2}{4}$, - площадь входа, м²;

D_B - диаметр всасывающего воздуховода, м.

$$V_B = \frac{4Q_{BEH}}{\pi D_B^2}, \text{ м/с.} \quad (9)$$

1.

2.

3.

4.

$$V_H = \frac{Q_{BEH}}{F_{ВЫХ}}, \text{ м/с,} \quad (10)$$

где $F_{ВЫХ} = \frac{\pi D_{ВЫХ}^2}{4}$, - площадь выхода, м²;

$D_{ВЫХ}$ - диаметр сменной мембраны, м.

$$V_H = \frac{4Q_{BEH}}{\pi D_{ВЫХ}^2}, \text{ м/с.} \quad (11)$$

1.

2.

3.

4.

б. Определение полного напора вентилятора по уравнению

$$H = H_B + H_H + \frac{V_H^2 - V_B^2}{2g}, \text{ м,} \quad (12)$$

где V_B - скорость воздуха на входе в установку, м /с;

V_H - скорость воздуха на выходе из установки, м /с;

1.

2.

3.

4.

7. Определение мощности вентилятора по формуле

$$N = \rho_H g H Q_{\text{ВЕН}}, \text{Вт} . \quad (13)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

8. Определение мощности электродвигателя вентилятора

$$N_э = IU, \text{Вт} \quad (14)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

9. Определение к. п. д. вентилятора по формуле

$$\eta = \frac{N}{N_э}, \quad (15)$$

где N - мощность вентилятора, Вт;

$N_э$ - мощность, потребляемая двигателем, Вт.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

10. Для построения напорной характеристики вентилятора значения H в м. необходимо перевести в Па по формуле

$$H_{\text{П}} = \frac{\rho_H}{\rho_{\text{Ж}}} \cdot g H, \text{Па} . \quad (16)$$

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

Составители:
Пшенов Евгений Александрович
Христенко Александр Геннадьевич
Рудаков Денис Сергеевич

ТЕПЛОТЕХНИКА

рабочая тетрадь для лабораторных работ

рабочая тетрадь предназначена для студентов очной и заочной формы обучения, по направлениям:

Агроинженерия;
Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов;
Технология транспортных процессов;
Профессиональное обучение (по отраслям);
Продукты питания животного происхождения;
Технология продукции и организация общественного питания.

Печатается в авторской редакции

Компьютерная вёрстка Е.А. Пшенов

Подписано к печати 28 мая 2023 г.
Формат 60x84^{1/16} Объем 2,6 уч.-изд. л.
Тираж 40 экз. Изд.№ Заказ №

Отпечатано в минитипографии Инженерного института НГАУ
630039, г. Новосибирск, ул. Никитина 147