



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые
процессы»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

к проведению лабораторно-практических
занятий по теме

«Экспериментальное исследо- вание теплопередачи при кон- денсации пара в теплообмен- ных»»

Авторы
Щербаков В.Н.
Фридрих Р.А.

Ростов-на-Дону, 2013



Центр дистанционного обучения и повышения квалификации

Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

Аннотация

Учебное пособие предназначено для студентов направления 220800 «Инноватика» очной формы обучения.

Авторы



Доцент, к.т.н.

Щербаков В.Н.



Доцент, к.т.н.

Фридрих Р.А





Оглавление

Введение	4
1. Краткие сведения из теории конденсации	5
2. Особенности расчета при пленочной конденсации	8
3. Расчет ТОА	12
4. Описание экспериментальной установки.	16
5. Лабораторная работа № 1: Определение коэффициента теплопередачи пароводяного ТОА в зависимости от скорости холодного теплоносителя	19
5.1 Порядок выполнения работы	19
5.2 Методика расчета коэффициента теплопередачи k ...	20
6. Лабораторная работа № 2: Определение коэффициента теплопередачи пароводяного ТОА в зависимости от давления пара в парогенераторе	22
6.1 Порядок выполнения работы	22
6.2 Методика расчета коэффициента теплопередачи k ...	23
7. Лабораторная работа № 3: Определение коэффициента теплоотдачи α_1 от пара к стенке трубы пароводяного ТОА	26
7.1 Краткие сведения из теории	26
7.2 Порядок выполнения работы	26
8. Лабораторная работа № 4: Определение коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки трубы к воде	28
8.1 Исходные данные и расчетные зависимости	28
8.2 Порядок выполнения работы.	29
Контрольные вопросы.	30
9. Задачи	31
9.1 Порядок расчёта при решении задач по определению коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на горизонтальных трубах в конденсаторах.	31
Литература	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А: Физические свойства воды на линии насыщения	38
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Физические свойства водяного пара в состоянии насыщения	39
ИНСТРУКЦИЯ	40



Введение

Знание и понимание физической сущности процессов теплообмена теплоотдачей и теплопередачей является основой при освоении методики проектирования и эксплуатации поверхностных теплообменных аппаратов (ТОА).

Описание теплообмена в жидкостях в общем случае значительно сложнее, чем теплопроводности в твердых телах. В жидкостях мы имеем дело с двумя процессами (перенос тепла и движение среды). Трудности возрастают, если к обоим упомянутым процессам присоединяется третий – изменение агрегатного состояния.

В учебном пособии рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований процесса теплопередачи от пара к воде, приведены алгоритмы обработки результатов таких опытов. В форме задач приведены примеры расчета процессов кипения и конденсации на наружных поверхностях и в трубах.

Целью работы является углубление знаний по теории теплопередачи в теплообменных устройствах, теплообмена при конденсации, получение навыков в проведении и обработки результатов экспериментов.



1. Краткие сведения из теории конденсации

В теории тепломассообмена *конденсацией* называют процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое. В ходе процесса высвобождается некоторое количество теплоты q . Явление тепловыделения составляет основу принципа действия ТОО конденсационного типа, конденсаторов паротурбинных, холодильных и опреснительных установок, других теплотехнических устройств.

Поверхностная конденсация является наиболее характерной для этих установок (явление конденсации во всём объёме встречается реже).

В качестве эффективного теплоносителя, отдающего теплоту при конденсации на обогреваемых поверхностях, широко используют *водяной пар*.

Конденсация пара возможна при его докритических состояниях. Для воды критическими являются следующие значения термодинамических параметров: $p_k=22,064 \text{ МПа}$, $T_k=647,096 \text{ К}$, $u_k=0,00311 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Различают процессы конденсации неподвижного и движущегося, насыщенного и перегретого, чистого пара и смеси паров.

Конденсация насыщенного или перегретого пара на поверхности твёрдого тела возможна, если температура этой поверхности меньше *температуры насыщения*.

На поверхности, не смачиваемой образующимся конденсатом, жидкость осаждается в виде отдельных капель (*капельная конденсация*). При капельной конденсации большая часть поверхности остаётся доступной для непосредственного контакта с паром.

Плёночная конденсация возникает на *смачиваемой* поверхности. В этом случае на поверхности раздела парообразной и жидкой фаз выделяется теплота q , которая будет отводиться к стенке *через плёнку* конденсата. Следует отметить, что *температура поверхности t* жидкой плёнки остаётся ниже *температуры насыщения t_s* , $t < t_s$. Для обычных и криогенных жидкостей (аргон, кислород, азот, гелий и т.п.) эти температуры отличаются незначительно, поэтому в большинстве случаев можно допускать их равенство, $t=t_s$.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

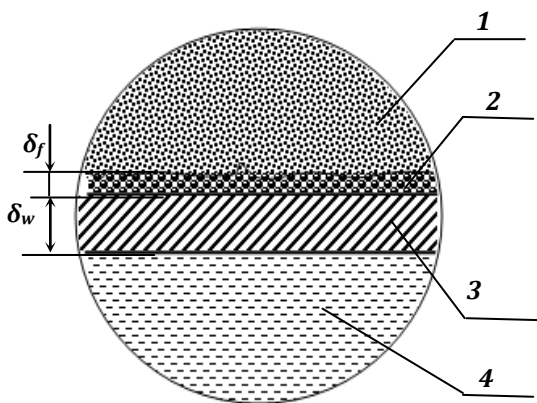


Рисунок 1. Явление пленочной конденсации в ТОА .1-водяной пар (горячий теплоноситель); 2-пленка конденсата; 3-стенка трубки ТОА; 4-вода (холодный теплоноситель).

При передаче теплоты от пара к стенке термическое сопротивление теплопереноса равно сумме термического сопротивления плёнки конденсата и термического сопротивления, обусловленного скачком температуры на границе раздела паровой и жидкой фаз.

Если пар содержит примеси стороннего газа (например, воздуха), то по мере конденсации пара вблизи стенки концентрация несконденсированного газа увеличивается, что затруднит приток пара к холодной стенке. Интенсивность теплоотдачи резко уменьшается. Поэтому при эксплуатации конденсационных установок, внутри которых может оказаться воздух (например, при падении давления ниже атмосферного при негерметичности установки), их, по мере выхода на установившийся режим, периодически продувают.

В случае, если разность температур пара и стенки неизменна, $\Delta t = t_s - t_w = const$, то при плёночной конденсации интенсивность теплообмена определяется условиями отвода конденсата с поверхности и режимами течения плёнки и пара.

При каплевой конденсации коэффициент теплоотдачи на порядок выше, чем при плёночной. Использование каплевой конденсации позволяет значительно уменьшить габариты и массу конденсаторов. Для достижения эффекта каплевой конденсации на поверхность теплообмена наносятся специальные покрытия, обеспечивающие явление несмачивания поверхности конденсатом пара. Однако такие покрытия сравнительно недолговечны вследствие разрушения под действием агрессивной среды. Более практичным представляется применение гидрофобизаторов - специальных веществ, вводимых в водяной пар для поддержания устойчивой каплевой конденсации. К таким веществам относятся парафины, соли жирных кислот, воски и другие соединения, сла-



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации
пара в теплообменных аппаратах

бо взаимодействующие с водой, но прочно удерживающиеся на
поверхности, препятствующие её смачиваемости.



2. Особенности расчета при пленочной конденсации

Сухой насыщенный пар, являющийся в паро-водяном теплообменном аппарате горячим теплоносителем, конденсируется на теплопередающей поверхности, выделяя большое количество теплоты. При этом образующаяся жидкая фаза – конденсат - выделяется на поверхности в виде отдельных капель. Происходит капельная конденсация. В реальных аппаратах поверхность теплоотдачи ограничена, а количество конденсируемого пара велико. Это приводит к быстрому слиянию капель и образованию плёнки, покрывающей всю теплопередающую поверхность.

При контакте металлических поверхностей с чистым водяным паром обычно наблюдается плёночная конденсация. В этом случае теплота пара передаётся плёнке конденсата, а далее от плёнки - к стенке. Плёнка представляет значительное термическое сопротивление. И чем она толще, тем меньше передаваемый тепловой поток.

Основой теории теплообмена при пленочной конденсации являются исследования В. Нуссельта, который вычислил толщину плёнки конденсата, а затем, интегрируя количество теплоты, проходящей через вертикальную стенку высотой l , вывел уравнение для определения коэффициента теплоотдачи.

Рассмотрим явление теплопереноса от пара к стенке более подробно.

При ламинарном режиме движения плёнки перенос теплоты в самой пленке осуществляется только теплопроводностью.

Уравнение плотности теплового потока q для теплопроводности через плёнку в соответствии с законом Фурье имеет вид:

$$q = \frac{\lambda_f}{\delta_f} \cdot (t_s - t_w), \quad \text{Вт/м}^2 \quad (2.1)$$

где λ_f - коэффициент теплопроводности конденсата, Вт/(м К) ;

δ_f - толщина пленки конденсата, м ;

t_s - температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$;

t_w - температура стенки, $^{\circ}\text{C}$.

Плотность теплового потока q для теплоотдачи от пленки к стенке можно определить по формуле Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_w), \quad \text{Вт/м}^2 \quad (2.2)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт/(м}^2 \text{ К)}$.

Тогда, пренебрегая теплотой, поглощаемой конденсатом



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

($t=t_s$), зависимость между коэффициентами теплоотдачи и теплопроводности можно свести к виду:

$$\alpha = \frac{\lambda_f}{\delta_f}, \quad (2.3)$$

При практических расчётах, для определения среднего значения коэффициента теплоотдачи используют формулы:

для вертикальной стенки

$$\alpha_{\text{верт}} = 1,14 \left[\frac{(g \cdot \rho_f \cdot r \cdot \lambda_f^3)}{v_f \cdot \ell \cdot (t_s - t_w)} \right]^{0,25} \quad (2.4)$$

для горизонтальной трубы

$$\alpha_{\text{гориз}} = 0,728 \left[\frac{(g \cdot \rho_f \cdot r \cdot \lambda_f^3)}{v_f \cdot d_H \cdot (t_s - t_w)} \right]^{0,25} \quad (2.5)$$

где g - ускорение свободного падения, $м/с^2$,

λ_f коэффициент теплопроводности конденсата, $Вт/(м К)$;

r - удельная теплота парообразования, $Дж/кг$;

ρ_f - плотность конденсата, $кг/м^3$;

v_f коэффициент кинематической вязкости конденсата, $м^2/с$,

$$v_f = \frac{\mu_f}{\rho_f}; \quad (2.6)$$

μ_f коэффициент динамической вязкости конденсата, $Па \cdot с$;

ℓ - высота вертикальной стенки, $м$;

t_s - температура насыщения, $^{\circ}С$;

t_w - температура стенки, $^{\circ}С$;

d_H - наружный диаметр трубы, $м$.

Физические параметры конденсата λ_f , ρ_f и v_f берутся из справочной литературы при средней температуре пленки конденсата $t_{cp} = 0,5 \cdot (t_s - t_w)$, теплота парообразования r - при температуре насыщения t_s .

Для определения массы конденсата, образующегося на поверхности площадью $F=1 м^2$ за время $\tau=1с$, применима формула:

$$m = \frac{q \cdot F \cdot \tau}{r} = \frac{\lambda_f}{\delta_f \cdot r} \cdot (t_s - t_w), \quad кг/(м^2 \cdot с) \quad (2.7)$$

где r - удельная теплота парообразования, $Дж/кг$.

Уравнение теплообмена при конденсации, выраженное через критерии подобия Нуссельта, имеет вид:



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$Nu = C \cdot \left[Ga \cdot Ku \cdot Pr \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right) \right]^{0,5}, \quad (2.8)$$

где **C** – коэффициент, зависящий от формы поверхности, для вертикальных плоских и трубчатых поверхностей $C = 2,04$, для горизонтальной поверхности $C = 1,28$;

Ga – критерий Галилея, показывает соотношение между силами гравитации и силами вязкости в среде,

$$Ga = \frac{g \cdot L^3}{\nu_f^2} = \frac{g \cdot \rho_f \cdot L^3}{\mu_f^2}; \quad (2.9)$$

L – характерный линейный размер поверхности теплообмена, м;

Ku – критерий Кутателадзе – критерий фазового перехода, который служит мерой отношения теплоты, затрачиваемой на фазовое превращение, к теплоте переохлаждения (перегрева) жидкой фазы при температуре её насыщения,

$$Ku = \frac{r}{c_{p,ж} \cdot \Delta t}; \quad (2.10)$$

Pr – критерий Прандтля, учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу,

$$Pr = \frac{\nu_f}{a} = \frac{\nu_f \cdot \rho_f \cdot c_{p,f}}{\lambda_f} = \frac{\mu_f \cdot c_{p,f}}{\lambda_f}; \quad (2.11)$$

c_{p,f} – удельная изобарная теплоемкость конденсата, Дж/(кг·К);

a – коэффициент температуропроводности конденсата, м/с²,

$$a = \frac{\lambda_f}{c_{p,f} \cdot \rho_f}. \quad (2.12)$$

При расчёте среднего коэффициента теплоотдачи используют критериальные уравнения вида:

для вертикальной трубы

$$Nu_{s,d} = 0,42 \cdot Kd_s^{0,28} \cdot \left(\frac{Pr_s}{Pr_w} \right)^{0,24}; \quad (2.13)$$

для горизонтальной трубы



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$Nu_{s,d} = 0,72 \cdot Kd_s^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}; \quad (2.14)$$

где $Nu_{s,d}$ - критерий Нуссельта, характеризующий подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости,

$$Nu_{s,d} = \alpha \cdot \frac{d}{\lambda_f}; \quad (2.15)$$

Kd_s - критерий конденсации, обобщающий группу критериев,

$$Kd_s = Ga \cdot Ku \cdot Pr. \quad (2.16)$$

При обработке и обобщении результатов опытов по конденсации паров в качестве определяющей температуры принимают температуру насыщения t_{s1} в качестве определяющего размера для горизонтальных труб - их диаметр d .

Результаты исследования теплоотдачи при конденсации паров для вертикальных поверхностей и горизонтальных труб представлены на рис. 2.

При конденсации теплоотдача зависит от состояния поверхности. Например, на шероховатой поверхности возникает дополнительное сопротивление течению плёнки и её толщина увеличивается, а коэффициент теплоотдачи снижается на 30% и более.

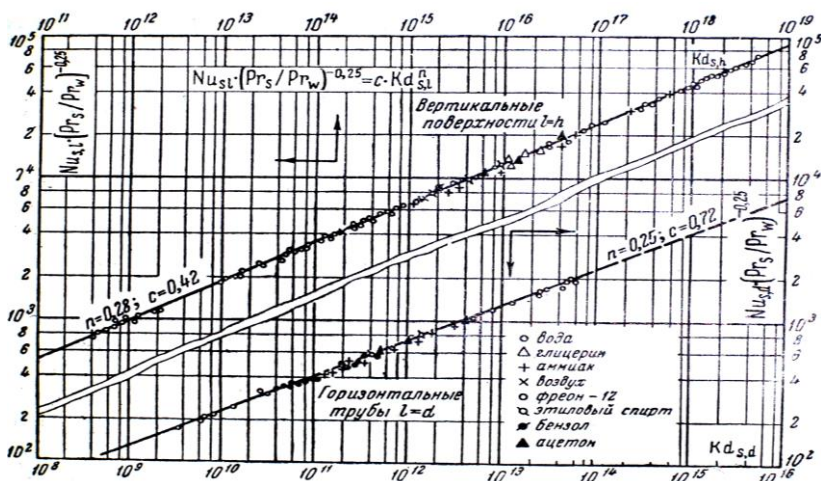


Рисунок 2. Теплоотдача при конденсации паров для вертикальных поверхностей и горизонтальных труб



3. Расчет ТОА

Теплообменным аппаратом называется устройство, предназначенное для передачи тепла от горячего теплоносителя к холодному.

При этом могут преследоваться различные технологические цели: нагревание или охлаждение жидкости или газа, превращение жидкости в пар, выпаривание растворов, конденсация пара и другие.

По принципу действия аппараты делят на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В рекуперативных аппаратах теплота от горячего к холодному теплоносителю передаётся через разделительную стенку.

Примером таких устройств являются паровые котлы, подогреватели, конденсаторы, пароперегреватели, приборы центрального отопления и др.

В регенеративных аппаратах горячий теплоноситель в один период времени отдаёт тепло аккумулирующему устройству, которое в следующий период отдаёт его холодному теплоносителю. Такие периодические процессы происходят, например, в воздухоподогревателях металлургических печей и котельных агрегатов большой производительности.

В смешительных аппаратах перенос тепла от горячего теплоносителя к холодному происходит при их непосредственном смешении, например, в градирнях, где горячая вода охлаждается окружающим воздухом. Эти аппараты также называют контактными. Наиболее широкое распространение получили рекуперативные аппараты.

Горячими и холодными теплоносителями обычно бывают жидкости, газы и пары.

Основные положения теплового расчёта теплообменных аппаратов остаются неизменными, несмотря на большое разнообразие этих устройств.

Характер изменения температур теплоносителей вдоль поверхности нагрева в рекуперативных теплообменных аппаратах определяется схемой движения теплоносителей.

Прямотоком называется параллельное движение теплоносителей в одном направлении вдоль разделяющей их стенки, противотоком - параллельное движение в противоположных направлениях.

Перекрестным током называется движение теплоносителей во взаимно перпендикулярных направлениях.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

Кроме этих основных применяют более сложные схемы движения в теплообменных аппаратах, включающие три основные.

Температура «горячего» теплоносителя, отдающего тепло, уменьшается от температуры на входе в ТОА t_1' до температуры на выходе t_1'' , температура «холодного» теплоносителя, воспринимающего тепло, увеличивается от t_2' до t_2'' . Разность температур теплоносителей (температурный напор) изменяется вдоль поверхности нагрева.

Процесс переноса тепла от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку называется теплопередачей.

Интенсивность теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате характеризует коэффициент теплопередачи k .

Он определяет величину теплового потока, передаваемого через 1 м² поверхности стенки, приходящуюся на 1 К разности температур теплоносителей, и имеет размерность [Вт/(м²·К)].

Основными уравнениями теплообмена при стационарном режиме переноса тепла являются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса.

Уравнение теплопередачи имеет вид:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = k \cdot F \cdot (t_{cp1} - t_{cp2}) \quad (3.1)$$

где Q - тепловой поток, Вт;

F - площадь теплообмена, м²;

Δt_{cp} - средний температурный напор, °С;

t_{cp1} и t_{cp2} - средние температуры соответственно горячего и холодного теплоносителей, °С;

k - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Уравнение теплового баланса при отсутствии тепловых потерь и фазовых переходов:

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') \quad (3.2)$$

где G_1 и G_2 - массовые расходы теплоносителей, кг/с;

c_{p1} и c_{p2} - средние изобарные массовые теплоёмкости жидкостей в интервале температур от t_1' до t_1'' , Дж/(кг·К).

Массовый расход может быть найден по уравнению:

$$G = V \cdot \rho, \quad (3.3)$$

где V - объёмный расход, м³/с;

ρ - плотность жидкости, кг/м³.

Для теплообменного аппарата, в котором имеет место конденсация пара, уравнение теплового баланса можно представить также в виде:



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$Q = G_n \cdot (h_n - h_k) = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2'), \quad \text{Вт} \quad (3.4)$$

где G_n - массовый расход конденсата пара, кг/с;

G_2 - массовый расход нагреваемого теплоносителя (жидкости), кг/с;

h_n - энтальпия пара, Дж/кг;

h_k - энтальпия конденсата, Дж/кг.

Коэффициент теплопередачи k обратно пропорционален сумме термических сопротивлений теплопроводности стенки и теплоотдачи на её поверхностях.

Для теплопередачи через стенку трубы k определяют по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \frac{d_{\text{внутр}}}{\ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{внутр}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3.5)$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке, Вт/(м²·К);

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, Вт/(м²·К);

$d_{\text{внутр}}, d_{\text{нар}}$ - внутренний и наружный диаметры трубы, м;

λ_w - коэффициент теплопроводности материала стенки трубы, Вт/(м·К).

Средний температурный напор между греющей и нагреваемой средами Δt_{cp} зависит от схемы движения теплоносителей в теплообменном аппарате.

При прямотоке и противотоке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}} \quad (3.6)$$

где Δt_{δ} - температурный напор (разность температур теплоносителей) на том конце поверхности теплообменного аппарата, где он больше;

Δt_m - температурный напор на другом конце теплообменного аппарата.

Если соотношение большего и меньшего температурных напоров сравнительно невелико ($t_{\delta}/\Delta t_m < 2$), то средний температурный напор можно определять как среднеарифметический, по формуле:



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации
пара в теплообменных аппаратах

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{m}}{2} \quad (3.7)$$



4. Описание экспериментальной установки.

Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи от пара к воде производится на установке, схема которой представлена на рис. 3.

Основными элементами установки являются парогенератор 4 и теплообменник 2, покрытые снаружи слоем теплоизоляции. Пар из парогенератора 4 поступает по паропроводу 3 в теплообменник 2, в центре которого установлена металлическая трубка 1 с наружным и внутренним диаметрами $d_{нар}=22$ мм и $d_{внутр}=20$ мм, длиной $l=500$ мм.

В трубку 1 насосом ЦН из бака Б подаётся вода, которая нагревается паром через стенку трубки от начальной температуры t_2' до конечной t_2'' .

Сухой насыщенный пар, отдавая тепло через стенку трубки 1 воде, конденсируется. Конденсат возвращается по трубопроводу 5 в парогенератор.

Давление пара измеряется пружинным манометром М и датчиком давления ДД ОБЕН ПД 100-ДИ 0,25М-0,5, подключённым к вторичному прибором ОБЕН ТРМ 138-Т, обеспечивающему через интерфейс RS-485 и адаптер связи АС-4 передачу показаний датчика давления на компьютер с использованием системы программного обеспечения SCADA.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

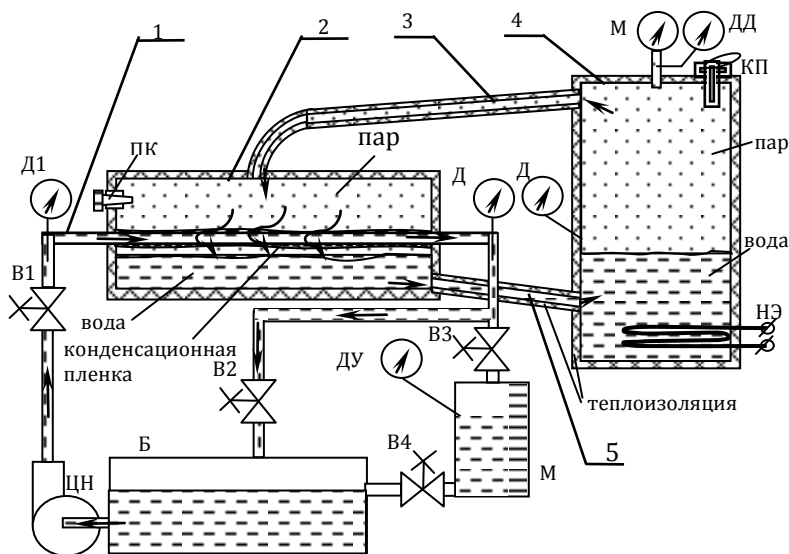


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки: 1-трубка; 2-теплообменник; 3- паропровод; 4-парогенератор;5- трубопровод отвода конденсата ЦН- насос циркуляционный; В1...В4 - вентили; Д1, Д2, Д3- датчики температуры; М - манометр; ДД - датчик давления; КП - предохранительный клапан; НЭ - электронагреватель; МБ - мерная ёмкость; Б - бак, ПК - продувочный клапан; ДУ- датчики уровня

Температура воды на входе и выходе из трубки 1 измеряется датчиками Д1 и Д2 (хромель-копелевыми термопарами), подключёнными к прибору ОВЕН ТРМ 138-Т. Температура пара измеряется датчиком Д3 (хромель-копелевой термопарой), подключённым к прибору ОВЕН ТРМ 210, имеющему интерфейс RS-485, позволяющему поддерживать заданную температуру пара в автоматическом режиме пропорционального регулирования путём изменения мощности электронагревателя НЭ.

Расход нагреваемой воды, проходящей через трубку 1 определяется объёмным методом при помощи мерного сосуда МБ, датчиков уровня ДУ ОВЕН ДУЗ/4-0.5, подключённых к прибору ОВЕН САУ-М6, и секундомера.

Представленный измерительно – вычислительный комплекс, оснащённый современными приборами, позволяет производить регистрацию и графическую интерпретацию результатов измерений на экране дисплея компьютера, а также выполнять все расчёты при помощи разработанных в соответствии с заданием про-

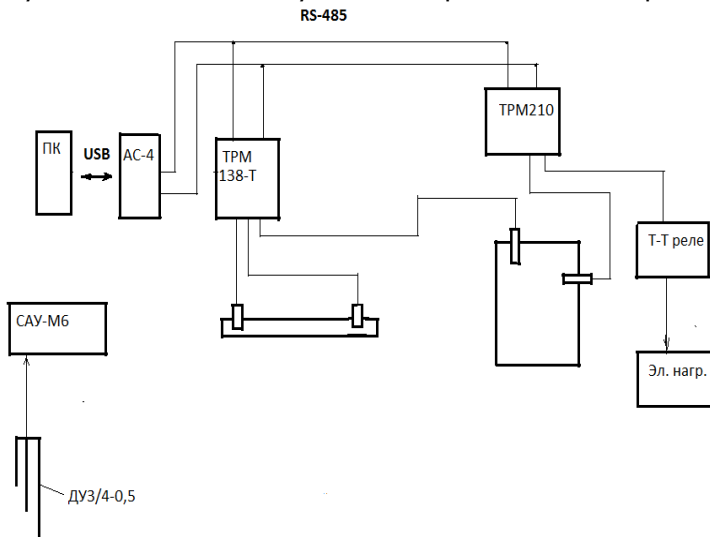


Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

грамм.

Расход нагреваемой воды, проходящей через трубку 1 определяется объёмным методом при помощи мерного сосуда МБ и секундомера.

Функциональная схема установки представлена на рис.4.



Рисунк 4 Функциональная схема



5. Лабораторная работа № 1: Определение коэффициента теплопередачи пароводяного ТОА в зависимости от скорости холодного теплоносителя

5.1 Порядок выполнения работы

5.1.1 Ознакомиться с описанием опытной установки.

5.1.2 Проверить уровень воды в парогенераторе.

5.1.3. Включить электронагреватель НЭ парогенератора 4.

5.1.4 Варьированием мощности электронагревателя создать установившийся тепловой режим, добившись кипения воды и появления избыточного давления в парогенераторе, равного 0,005 МПа по манометру М.

5.1.5 Произвести продувку парогенератора 4 и теплообменника 2, освободив их объём от воздуха. Для этого необходимо открыть продувочный клапан ПК, установленный на фланце теплообменника, и, выпуская воздух, добиться выхода из теплообменника непрерывной струи пара, после чего закрыть продувочный клапан, повернув его винт по часовой стрелке до упора.

5.1.6 Продолжить нагревание воды в парогенераторе, наблюдая за увеличением давления пара по манометру М до значения, заданного преподавателем.

5.1.7 Произвести выдержку установки при заданном давлении в течении 5 минут.

5.1.8 Убедиться, что все вентили В1...В4 открыты;

5.1.9 Включить циркуляционный насос ЦН

5.1.10 Регулированием вентиля В1 на входе в трубку 1, обеспечить заданный преподавателем расход воды.

5.1.11 При установившемся тепловом режиме с помощью секундомера определить время заполнения мерной ёмкости МБ, предварительно закрыв вентили В2 и В4. Одновременно измерить температуру на входе и выходе из трубки и избыточное давление в парогенераторе. Открыть вентили В2 и В4. Полученные данные записать в таблицу наблюдения.

5.1.12 Повторить п.5.1.10, 5.1.11 для ещё двух значений расхода воды в трубке 1.

5.1.13 На основании полученных в опытах результатов измерений и вычислений определить коэффициент теплопередачи для трёх значений расхода (скорости) воды в трубке 1 и построить график зависимости $k=f(w)$, где w - скорость воды.

5.1.14 Сопоставить полученные из опытов значения k с



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

имеющимися в литературе данными для пароводяных теплообменных аппаратов с металлическими горизонтальными и вертикальными трубами.

Таблица 5.1. Результаты наблюдений.

№ оп.	Избыточное давление в парогенераторе, $p_{изб}$	Барометрическое давление, B	Температура воды на входе в трубку 1, t_2'	Температура воды на выходе из трубки 1, t_2''	Время заполнения мерного сосуда, τ	Объем мерного сосуда, V
	$кгс/см^2$	$мм. рт. ст.$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$с$	$м^3$
1						
...						
5						

5.2 Методика расчета коэффициента теплопередачи k

Количество тепла Q_{Π} , отданного паром стенке в единицу времени, равно количеству тепла, затраченного на нагревание воды в трубке Q_B :

$$Q_{\Pi} = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = Q_B = G_B \cdot c_{pB} \cdot (t_2'' - t_2'), \quad Вт \quad (5.1)$$

где k - коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;
 F - поверхность теплообмена (боковая поверхность трубки), $м^2$;

Δt_{cp} - средний температурный напор, $К$;

G_B - массовый расход воды, $кг/с$;

c_{pB} - изобарная массовая теплоёмкость воды, $Дж/(кг \cdot К)$;

t_2' и t_2'' - температура воды на входе в трубку 1 и выходе из неё, $^{\circ}C$.

Из уравнения (5.1) можно определить величину k как:

$$k = \frac{Q_B}{F \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{G_B \cdot c_{pB} \cdot (t_2'' - t_2')}{F \cdot \Delta t_{cp}} \quad (5.2)$$

Средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителем (среднелогарифмический напор) определяется по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} = \frac{(t_s - t_2') - (t_s - t_2'')}{2,3 \cdot \lg \frac{(t_s - t_2')}{(t_s - t_2'')}} = \frac{t_2'' - t_2'}{2,3 \cdot \lg \frac{(t_s - t_2')}{(t_s - t_2'')}} \quad (5.3)$$

где t_s - температура пара, $^{\circ}C$.

Или, в соответствии с упрощенной формулой (3.7):



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\theta}} + \Delta t_m}{2} = \frac{(t_s - t_2') + (t_s - t_2'')}{2} = t_s - \frac{t_2' + t_2''}{2} \quad (5.4)$$

Температура пара t_s определяется с использованием таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара» по абсолютному давлению пара в парогенераторе p_a :

$$p_a = \frac{B}{735,6} + p_{изб}' \quad \text{кгс/см}^2 \quad (5.5)$$

где $p_{изб}$ - избыточное давление по манометру М, шкала которого проградуирована в технических атмосферах, кгс/см^2 ;

B - барометрическое давление, мм. рт. ст.

Площадь поверхности теплообмена F определяется по формуле:

$$F = \pi \cdot d_{внутр} \cdot \ell \quad (5.6)$$

где $d_{внутр}$ - внутренний диаметр трубки 1, м;

ℓ - длина трубки, м.

Секундный массовый расход воды G_B определяется по формуле:

$$G_6 = \frac{V \cdot \rho}{\tau} \quad (5.7)$$

где V - объём мерного сосуда МБ, м^3 ;

ρ - плотность воды при температуре опыта, кг/м^3 ;

τ - время заполнения мерного сосуда, с.

Скорость движения воды w в трубке 1:

$$w = \frac{4 \cdot G_6}{\rho \cdot \pi \cdot d_{внутр}^2} \quad (5.8)$$

Результаты вычислений заносят в таблицу 1.2.

Таблица 5.2 Результаты расчетов

№ оп.	Массовый расход воды, G_B	Площадь поверхности нагрева, F	Абсолютное давление пара, p_a	Температура сухого насыщенного пара, t_s	Средняя разность температур, Δt	Скорость воды в трубке, w	Кэф-фициент теплопередачи, k
	кг/с	м^2	кгс/см^2	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	м/с	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1							
3							



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

6. Лабораторная работа № 2:

Определение коэффициента теплопередачи пароводяного ТОА в зависимости от давления пара в парогенераторе

6.1 Порядок выполнения работы

6.1.1 Ознакомиться с описанием опытной установки.

6.1.2 Проверить уровень воды в парогенераторе.

6.1.3 Включить электронагреватель НЭ парогенератора 4.

6.1.4 Варьированием мощности электронагревателя создать установившийся тепловой режим, добившись кипения воды и появления избыточного давления в парогенераторе, равного 0,005 МПа по манометру М и ТРМ, подключенному к датчику ДД.

6.1.5 Произвести продувку парогенератора 4 и теплообменника 2, освободив их объём от воздуха. Для этого необходимо открыть продувочный клапан ПК, установленный на фланце теплообменника, и, выпуская воздух, добиться выхода из теплообменника непрерывной струи пара, после чего закрыть продувочный клапан, повернув его винт по часовой стрелке до упора.

6.1.6 Варьированием мощности электронагревателя продолжить нагревание воды в парогенераторе, наблюдая за увеличением давления пара по манометру М до значения, заданного преподавателем.

6.1.7 Произвести выдержку установки при заданном давлении в течении 5 минут.

6.1.8 Убедиться, что все вентили В1...В4 открыты;

6.1.9 Включить циркуляционный насос ЦН

6.1.10 Регулированием вентиля В1 на входе в трубку 1, обеспечить заданный преподавателем расход воды. Давление в парогенераторе необходимо, с помощью электронагревателя, поддерживать неизменным.

6.1.11 При установившемся тепловом режиме с помощью секундомера определить время заполнения мерной ёмкости МБ, предварительно закрыв вентили В2 и В4. Одновременно измерить температуру на входе и выходе из трубки и избыточное давление в парогенераторе. Открыть вентили В2 и В4. Полученные данные записать в таблицу наблюдения.

6.1.12 Повторить действия, описываемые в п.6.1.10, 6.1.11 для ещё двух значений давления пара, заданных преподавателем.

6.1.13 На основании полученных в опытах результатов измерений и вычислений определить коэффициент теплопередачи для



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

трёх значений абсолютного давления p_a и построить график зависимости $k=f(p_a)$.

6.1.14 Сопоставить полученные из опытов значения k с имеющимися в литературе данными для пароводяных теплообменных аппаратов с металлическими горизонтальными и вертикальными трубами.

Таблица 6.1. Результаты наблюдений.

№ оп.	Избыточное давление в парогенераторе, $p_{изб}$	Барометрическое давление, B	Температура воды на входе в трубку 1, t_2'	Температура воды на выходе из трубки 1, t_2''	Время заполнения мерного сосуда, τ	Объём мерного сосуда, V
	$кгс/см^2$	$мм. рт. ст.$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$с$	$м^3$
1						
2						

6.2 Методика расчета коэффициента теплопередачи k

Количество тепла Q_{II} , отданного паром стенке в единицу времени, равно количеству тепла, затраченного на нагревание воды в трубке Q_6 :

$$Q_{II} = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = Q_6 = G_6 \cdot c_{p6} \cdot (t_2'' - t_2'), \quad Вт \quad (6.1)$$

где k - коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

F - площадь теплообмена (боковая поверхность трубки), $м^2$;

Δt_{cp} - средний температурный напор, $К$;

G_6 - массовый расход воды, $кг/с$;

c_{p6} - изобарная массовая теплоёмкость воды, $Дж/(кг \cdot К)$;

t_2' и t_2'' - температура воды на входе в трубку 1 и выходе из неё, $^{\circ}C$.

Из уравнения (6.1) можно определить величину k как:

$$k = \frac{Q_6}{F \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{G_6 \cdot c_{p6} \cdot (t_2'' - t_2')}{F \cdot \Delta t_{cp}} \quad (6.2)$$

Средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителем (среднелогарифмический напор) определяется по формуле:



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}} - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}}}{\Delta t_M}} = \frac{(t_s - t_2') - (t_s - t_2'')}{2,3 \cdot \lg \frac{(t_s - t_2')}{(t_s - t_2'')}} = \frac{t_2'' - t_2'}{2,3 \cdot \lg \frac{(t_s - t_2')}{(t_s - t_2'')}} \quad (6.3)$$

где t_s - температура пара, °С.

Или, в соответствии с упрощенной (приближённой) формулой (14):

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}} + \Delta t_M}{2} = \frac{(t_s - t_2') + (t_s - t_2'')}{2} = t_s - \frac{t_2' + t_2''}{2} \quad (6.4)$$

Температура пара t_s определяется с использованием таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара» по абсолютному давлению пара в парогенераторе p_a :

$$p_a = \frac{B}{735,6} + p_{изб}, \quad \text{кгс/см}^2 \quad (6.5)$$

где $p_{изб}$ - избыточное давление по манометру М, шкала которого проградуирована в технических атмосферах, $кгс/см^2$;

B - барометрическое давление, $мм. рт. ст.$

Площадь поверхности теплообмена F определяется по формуле:

$$F = \pi \cdot d_{внутр} \cdot \ell \quad (6.6)$$

где $d_{внутр}$ - внутренний диаметр трубки 1, м;

ℓ - длина трубки, м.

Секундный массовый расход воды $G_в$ определяется по формуле:

$$G_в = \frac{V \cdot \rho}{\tau} \quad (6.7)$$

где V - объём мерного сосуда МБ, $м^3$;

ρ - плотность воды при температуре опыта, $кг/м^3$;

τ - время заполнения мерного сосуда, с.

Скорость движения воды w в трубке 1 :

$$w = \frac{4 \cdot G_в}{\rho \cdot \pi \cdot d_{внутр}^2} \quad (6.8)$$

Результаты вычислений заносят в таблицу 6.2.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

Таблица 6.2. Результаты расчетов.

№ оп.	Массовый расход воды, <i>G_в</i>	Площадь поверхности нагрева, <i>F</i>	Абсолютное давление пара, <i>p_a</i>	Температура сухого насыщенного пара, <i>t_s</i>	Средняя разность температур, <i>Δt</i>	Скорость воды в трубке, <i>w</i>	Коэффициент теплопередачи, <i>k</i>
	<i>кг/с</i>	<i>м²</i>	<i>кгс/см₂</i>	<i>°С</i>	<i>°С</i>	<i>м/с</i>	<i>Вт/(м²·К)</i>
1							
2							
3							



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

7. Лабораторная работа № 3:

Определение коэффициента теплоотдачи α_1 от пара к стенке трубы пароводяного ТОА

7.1 Краткие сведения из теории

При конденсации пара на поверхности трубы удельный тепловой поток от пара к стенке трубы определяется по формуле (2.2):

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_w), \text{ Вт/м}^2$$

где t_s - температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$;
 t_w - температура стенки, $^{\circ}\text{C}$.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи между паром и обтекаемой им горизонтальной трубой находится по формуле:

$$\alpha_{\text{гориз}} = 0,728 \left[\frac{(g \cdot \rho_f \cdot r \cdot \lambda_f^3)}{v_f \cdot d_H \cdot (t_s - t_w)} \right]^{0,25} \quad (2.5)$$

7.2 Порядок выполнения работы

Таблица исходных данных

№ оп	V м ³	τ с	V_τ м ³ /с	G_f кг/с	w м/с	t₂' °C	t₂'' °C	t_{cp} °C	ρ_f кг/м ³	λ_f Вт/(м·К)	v_f м ² /с	c_{pf} Дж/(кг·К)

Выполняют все действия, необходимые для подготовки экспериментальной установки к проведению опытов при давлении пара, заданного преподавателем (см. п. 6.1.1-6.1.7 в лаб. р. №2). Входящие в формулу (2.5) величины λ_f , v_f , ρ_f находят из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара на линии насыщения при средней температуре плёнки конденсата $t_{cp} = 0,5(t_s + t_w)$.

Учитывая, что значение t_w неизвестно, поступают следующим образом:

7.2.1 Измеряют температуру воды на входе в горизонтальную трубку 1 (t_2') и на выходе из неё (t_2''), а также расход воды через трубу в 4 – 5 опыта, при разных значениях расхода воды, заданных преподавателем;

7.2.2 Вычисляют среднюю плотность теплового потока q_{cp} от пара к воде через стенку трубы по уравнению теплового баланса



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

для каждого из опытов:

$$q_{cp} = C_{p, cp} \cdot G_f \cdot (t_2'' - t_2')/F,$$

где $C_{p, cp}$ – средняя теплоёмкость воды (находится из таблиц при $t = (t_2' + t_2'')/2$).

7.2.3 Задаются рядом значений $\Delta t = (t_s - t_w)$: 3, 5, 10, 20, 50, 75 °C.

7.2.4 Вычисляют значение $\alpha_{гориз}$ по формуле (2.5) для каждого из значений Δt . Для того, чтобы определить значение $t_{cp} = 0,5(t_s + t_w)$, находят t_w : $t_w = t_s - \Delta t$. Значение удельной теплоты парообразования берут из таблиц при $t = t_s$.

7.2.5 В системе координат $\alpha_{гориз} = f(t_s - t_w)$ строят графики зависимостей $\alpha_{гориз1} = f_1(t_s - t_w)$, [расчёт по формуле (2.5)] и $\alpha_{гориз2} = q_{cp} / (t_s - t_w)$.

7.2.6 В точке пересечения этих графиков находят искомое значение $\alpha_{гориз} = \alpha_{гориз1} = \alpha_{гориз2}$, соответствующее полученному из уравнения теплового баланса значению q_{cp} и действительному значению температурного напора $(t_s - t_w)$.

Используя график, представленный на рис.2, определить при параметрах опыта значение критерия Нуссельта $Nu_{s,d}$ а затем, из выражения (2.15) найти

$$\alpha' = \frac{Nu_{s,d} \cdot \lambda_f}{d}$$

Сравнить полученное значение α' с $\alpha_{гориз}$, и сделать выводы



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

**8. Лабораторная работа № 4:
Определение коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки трубы к воде**

8.1 Исходные данные и расчетные зависимости

Таблица исходных данных

№ оп	V м ³	τ с	V _τ м ³ /с	G _f кг/с	w м/с	t ₂ ' °C	t ₂ '' °C	t _{ср} °C	ρ _f кг/м ³	λ _f Вт/(м·К)	v _f м ² /с	c _{рf} Дж/(кг·К)

$$Nu = \alpha_2 \cdot \frac{d_{BH}}{\lambda_f}$$

$$\alpha_2 = Nu \cdot \frac{\lambda_f}{d_{BH}}$$

При ламинарном режиме движения жидкости (Re<2320) число Нуссельта определяют по формуле:

$$Nu = 0,15 \cdot Re_f^{0,33} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Gr_f^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

где **Gr** - критерий Грасгофа — критерий подобия, определяющий процесс теплообмена при свободной конвекции в поле гравитации и являющийся мерой соотношения архимедовой (подъёмной) силы, вызванной неравномерным распределением плотности в неоднородном поле температур, и силами межмолекулярного трения,

$$Gr_f = \frac{\beta \cdot g \cdot d_{BH}^3}{\nu^2} \cdot \Delta t$$

При развитом турбулентном режиме движения жидкости (Re>10000) число Нуссельта определяют по формуле:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

В области значений числа Рейнольдса от **2·10³** до **1·10⁴** (переходный режим) характер теплоотдачи резко меняется. В этом случае имеются рекомендации [1] использовать для определения числа Нуссельта зависимость вида:



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$Nu = Ko \cdot Pr_f^{0.43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}$$

где Ko – критерий, численные значения которого приведены в Таблице 4.1.

Для процесса теплоотдачи от трубы к воде справедливо уравнение

$$q = \alpha_2 \cdot (t_w - t_f),$$

Температурный напор между стенкой и водой $\Delta t_2 = t_w - t_f$ является искомой величиной.

Таблица 4.1

Значение критерия Ko при переходном режиме
($2000 < Re_f < 10000$)

Re_f 10^3	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3	4	5	6	8	10
Ko	1.9	2.2	3.3	3.8	4.4	6.0	10.3	15.5	19.5	27.0	33.3

8.2 Порядок выполнения работы.

1. Выполняют все действия, необходимые для подготовки экспериментальной установки к проведению опытов при давлении пара, заданного преподавателем (см. п. 6.1.1-6.1.7 в лаб. р. №2).

2. Измеряют температуру воды на входе в горизонтальную трубку 1(рис.3) (t_2') и на выходе из неё (t_2''), а также расход воды через трубку в 4 – 5 опытах, при разных значениях расхода воды, заданных преподавателем;

3. Вычисляют среднюю плотность теплового потока q_{cp} от пара к воде через стенку трубки по уравнению теплового баланса для каждого из опытов:

$$q_{cp} = C_{pcp} \cdot G_f \cdot (t_2' - t_2'') / F$$

4. Вычисляют значение числа Рейнольдса: $Re = (W \cdot d) / \nu_f$
где W – скорость воды в трубке ($W = G_f / F = G_f / (3,14 \cdot d_{внутр}^2 / 4)$)

5. В зависимости от значения Re выбирают расчётную формулу для определения числа Нуссельта при параметрах опыта.

6. Находят значения α_2 :
$$\alpha_2 = Nu \cdot \frac{\lambda_f}{d_{он}}$$

7. Определяют величину температурного напора: $\Delta t_2 = t_w - t_f = q / \alpha_2$



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

8. Строят график зависимости $\alpha_2 = f(W)$.

Контрольные вопросы.

1. Какие устройства называют теплообменными аппаратами.
2. Виды теплообменных аппаратов и принцип их работы.
3. Основные уравнения, которые используют при расчёте теплообменных аппаратов.
4. Что такое конденсация пара. Виды и механизмы конденсации пара на твёрдой поверхности.
5. Как определяют коэффициент теплоотдачи при конденсации.
6. Почему теплообмен при конденсации используют в теплообменных аппаратах.
7. Приведите примеры использования теплообмена при конденсации в теплообменных аппаратах.
8. Что такое прямоток, противоток, перекрёстный ток и сложная схема движения теплоносителя в теплообменных аппаратах.
9. Что такое среднелогарифмический и среднеарифметический напор в теплообменных аппаратах.
10. Напишите уравнения теплопередачи и теплового баланса для теплообменного аппарата экспериментальной установки.
11. Напишите формулу для определения коэффициента теплопередачи в работе.
12. Как в работе определялся тепловой поток от пара к стенке трубки.
13. Как в работе определялся расход воды через трубку.
14. Как в работе определялась температура пара.
15. Почему капельная конденсация в теплообменных аппаратах намного выгоднее, чем плёночная.
16. Опишите устройство экспериментальной установки и порядок проведения эксперимента.
17. Какие расчёты Вы выполняли для определения значений коэффициента теплопередачи.
18. Какое термическое сопротивление является наибольшим в наших опытах [см. формулу (12)]. Как его можно уменьшить.
14. Для заданных преподавателем значений температуры наружной стенки трубы определить расчётным путём по имеющимся в методических указаниях формулам значения коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке трубы. Сопоставить полученные значения с экспериментальными данными, представленными на рис.2.



9. Задачи

9.1 Порядок расчёта при решении задач по определению коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на горизонтальных трубах в конденсаторах.

При расчёте используются графики, представленные на рис.5.

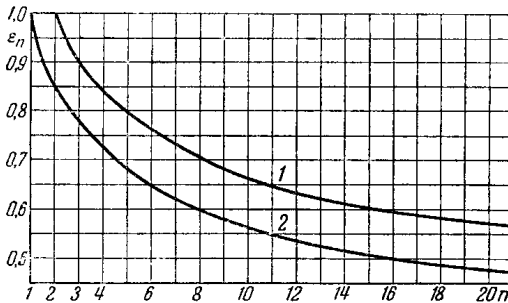


Рисунок 5. Значение коэффициента ε при конденсации пара на горизонтальных пучках труб. 1-шахматный пучок; 2-коридорный пучок.

Для верхнего ряда труб значение α определяется по формуле (2.5) на стр. 6, для труб, расположенных ниже, величина α умножается на поправочный коэффициент ε . Величина ε определяется типом расположения труб и номером ряда, отсчитываемого сверху (рис.5).

Средняя величина $\alpha_{пуч}$ для всего пучка, который состоит из n рядов, определяется по формуле:

$$\alpha_{пуч} = \frac{\alpha}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (9.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи i -того ряда труб, n – число рядов по вертикали;

ε_i – поправочный коэффициент для каждого ряда, отсчитываемого сверху.

Задача №1.

Конденсатор водяного пара представляет собой 16 рядов горизонтальных труб, имеющих внешний диаметр $d = 0,02$ м и длину $h = 1,5$ м, которые расположены так, что образуют коридорный пучок по 10 труб в каждом ряду. Давление насыщенного водяного пара $p = 0,148$ МПа. Найти количество тепла, переданное паром охлаждающей воде за 1 час, при условии, что средняя температура наружной поверхности трубок $t_w = 343$ К.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

Решение:

Величину t_w для одной горизонтальной трубы находим по формуле (2.5), значения r и t_s – по таблицам для насыщенного пара [при $p=0,148$ МПа, $t_s = 384K$ ($111^\circ C$), $r = 2228$ кДж/кг].

Средняя температура плёнки воды на трубе $t_m=(t_s+t_w)/2=(384+343)/2=363,5$ К. При этой температуре находим для воды по таблицам на линии насыщения: $\rho=965,3$ кг/м³, $\lambda_f=0,68$ Вт/(м·К), $\nu = 3,26 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Тогда для одиночной трубы расчёт даёт значение $\alpha=9161$ Вт/(м²·К). Для всего пучка труб выполняем расчёт по формуле (9.1)

$$\alpha_{пуч} = \frac{\alpha}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

По графику (рис.5) находим значения ε_i для каждого ряда:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ε_i	1,0	0,85	0,77	0,72	0,68	0,64	0,62	0,6	0,58	0,56	0,55	0,54	0,52	0,52	0,50	0,5

После сложения получим $\sum \varepsilon_i = 10,5$.

Тогда

$$\alpha_{пуч} = \frac{\alpha}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \frac{9161}{16} \cdot 10,5 = 5811,509 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Рассчитаем количество тепла за 1 час, Q , (Дж/час):

$$Q = \alpha_{пуч} \cdot F \cdot (t_s - t_w) \cdot 3600,$$

где F – поверхность всех трубок,

$$F = n \cdot d \cdot h \cdot m \cdot z = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 1,5 \cdot 16 \cdot 10 = 150,72 \text{ м}^2;$$

z – число труб в каждом ряду.

$$Q = 5811,509 \cdot 150,72 \cdot (384 - 343) \cdot 3600 = 1,29 \cdot 10^{11} \text{ Дж}.$$

Задача №2.

Решить задачу, изменив исходные данные в задаче №1 следующим образом: $d = 0,2$ м; $h = 1,3$ м; $n = 20$; $z = 8$; $t_w = 353$ К; $p = 2 \cdot 10^5$ Па.

Задача №3.

Решить задачу №1, изменив расположение труб на шахматное (линия 1). Сопоставить результаты расчёта в задачах №1 и №2 и сделать выводы.

Задача №4.

Решить задачу №1, изменив давление в исходных данных сначала на $p = 0,3$ МПа, а затем на $p = 0,4$ МПа. Сопоставить два



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

результата расчёта и сделать выводы.

Задача №5.

На горизонтальной трубе конденсируется сухой насыщенный пар при давлении $p = 2,5 \cdot 10^4$ Па. Диаметр трубы $d = 0,02$ м; длина $h = 0,6$ м; температура стенки трубы $t_w = 299$ К. Определить количество сухого насыщенного пара, конденсирующееся на поверхности трубы за 1 с.

Задача №6.

На вертикальной трубе конденсируется сухой насыщенный пар с давлением 0,148 МПа. Высота трубы $h = 2,3$ м, температура поверхности трубы $t_w = 343$ К. Найти величину коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на поверхности трубы.

Решение:

По таблицам для насыщенного пара находим при $p = 0,148$ МПа; $t_s = 384$ К; $r = 2220$ кДж/кг. Плёнка конденсата имеет среднюю температуру $t_m = (343 + 384)/2 = 363,5$ К.

Для воды при $t = t_m$: $\nu = 3,26 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\rho = 965,3$ кг/м³; $\lambda = 0,680$ Вт/(м·К), $c_f = 4,208$ кДж/(кг·К), $Pr = 1,95$.

Находим критерий конденсации Kd_s :

$$Kd_s = Ga \cdot Pr \cdot Ku = \frac{g \cdot L^3}{\nu_f^2} \cdot Pr \cdot \frac{r}{c_f \cdot \Delta t} =$$

$$= \frac{9,8 \cdot 2,3^3}{(3,26 \cdot 10^{-7})^2} \cdot 1,95 \cdot \frac{2220 \cdot 10^3}{4,208 \cdot 10^3 \cdot (363,5 - 343)} = 24,48 \cdot 10^{15}$$

Так как $Kd_s > 10^{15}$, то критериальное уравнение (2.8) можно применить в виде:

$$Nu_{s,d} = 0,068 \cdot Kd_s^{0,33} = 0,068 \cdot (24,48 \cdot 10^{15})^{0,33} = 1,43 \cdot 10^6$$

Далее определяем коэффициент теплоотдачи α :

$$\alpha = Nu_{s,d} \cdot \frac{\lambda_f}{h} = 1,974 \cdot 10^4 \cdot \frac{0,68}{2,3} = 5,837 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Задача №7.

Найти величину коэффициента теплоотдачи α при конденсации сухого насыщенного водяного пара на поверхности вертикальной трубы, если давление пара $p = 0,2$ МПа, высота трубы $h = 1,5$ м, температура поверхности трубы 333 К.

Задача №8.

Определить, как изменится значение коэффициента теплоотдачи α , если при прочих равных условиях задачи №5 величина давления пара p будет принимать значения 0,1; 0,25; и 0,3 МПа. Построить график $\alpha = f(p)$.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

Задача №9.

Каким должен быть диаметр вертикальной трубы с высотой $h=1\text{ м}$, если известно, что на её поверхности конденсируется $G=50\text{ кг/час}$ сухого насыщенного пара, имеющего давление $p=0,361\text{ МПа}$. Температура поверхности трубы равна 300 К .

Задача №10.

Какое количество теплоты в единицу времени (за 1с.) передаёт конденсирующийся сухой насыщенный пар при давлении $p=4,24\text{ кПа}$ горизонтальной трубе, диаметр которой $d=0,025\text{ м}$, а длина $h=1,8\text{ м}$. Температура поверхности трубы $T=292\text{ К}$. Определить, кроме того, коэффициент теплоотдачи α при конденсации на вертикальной трубе, при прочих равных условиях.

Задача №11.

Какое количество фреона-12 конденсируется в 1 с. на наружной поверхности горизонтальной трубы с диаметром $d=0,09\text{ м}$ и длиной $h=1,2\text{ м}$ при давлении $p=0,75\text{ МПа}$, если температура наружной поверхности трубы равна 298 К . Число Прандтля для конденсата равно $Pr=3,66$; температура насыщенного пара $T_s = 303\text{ К}$; теплота парообразования $r = 144,5\text{ кДж/кг}$; коэффициент кинематической вязкости конденсата $\nu=0,194 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$; коэффициент теплопроводности конденсата $\lambda_f=0,0685\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; удельная изобарная теплоемкость конденсата $c_{pf} = 0,985\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Задача №12.

Определить средний коэффициент теплоотдачи α от сухого насыщенного водяного пара к трубе с наружным диаметром $d=0,022\text{ м}$ и температурой стенки $T=287\text{ К}$. Давление пара равно $p=4,76 \cdot 10^3\text{ Па}$. Определить количество пара G , которое конденсируется в течение часа на 1 погонном метре поверхности трубы.

Задача №13.

На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром $d=20\text{ мм}$ и длиной $h=2\text{ м}$ конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении $p=10^5\text{ Па}$. Температура поверхности трубы $t=94,5^\circ\text{С}$.

Определить средний коэффициент теплоотдачи α от пара к трубе и количество пара G , кг/ч, которое конденсируется на поверхности трубы.

Решение:

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара на горизонтальных трубах средний по периметру коэффициент теплоотдачи α можно определить из формулы:



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

$$Re = \alpha \cdot \Delta t \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{4}{r \cdot \rho \cdot v} \quad (9.1)$$

где Re - критерий Рейнольдса, который для данного случая может быть представлен в виде:

$$Re = 3,25 \cdot z^{0,75} \quad (9.2);$$

где z- приведенная длина трубы,

$$z = \Delta t \cdot \pi \cdot R \cdot \left(\frac{g}{v^2}\right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda}{r \cdot \rho \cdot v}; \quad (9.3)$$

Δt – температурный напор, $\Delta t = t_f - t_w$;

λ , v и ρ –коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и плотности конденсата при температуре насыщения t_s ;

r - теплота парообразования при t_s .

Формула (9.2) справедлива в случае ламинарного течения пленки конденсата, что определяется условием $z < 3900$, и при выполнении условия:

$$d < 20 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot g}} \quad (9.4)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения. Для встречающихся на практике случаев эти два условия обычно выполняются.

Формулу (9.1) с учетом (9.2) и (9.3) можно привести к виду

$$\alpha = 3,25 \cdot \frac{A^{0,75}}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\Delta t \cdot \pi \cdot R}} \quad (9.5)$$

где A и B – некие комплексы, зависящие от рода жидкости и температуры насыщения,

$$A = \left(\frac{g}{v^2}\right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda}{r \cdot \rho \cdot v}, \text{ 1/(м}^\circ\text{C)};$$

$$B = \frac{4}{r \cdot \rho \cdot v}, \text{ м/Вт.}$$

Для воды значения этих комплексов приведены в таблице 9.1



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

Таблица 9.1

Значения комплексов А и В для формулы (9.5)

t , °C	A $1/(M \cdot ^\circ C)$	B 10^3 M/Вт	t °C	A $1/(M \cdot ^\circ C)$	B 10^3 M/Вт
20	5,16	1,62	170	136	12,04
30	7,88	2,06	180	150	12,90
40	11,4	2,54	190	167	14,02
50	15,6	3,06	200	182	15,06
60	20,9	3,62	210	197	16,08
70	27,1	4,22	220	218	17,63
80	34,5	4,88	230	227	18,40
90	42,7	5,57	240	246	19,78
100	51,5	6,28	250	264	21,32
110	60,7	6,95	260	278	22,70
120	70,3	7,65	270	296	24,42
130	82,0	8,47	280	312	26,31
140	94,0	9,29	290	336	28,78
150	107	10,15	300	354	31,21
160	122	11,09			

Для рассматриваемой задачи при $p=10^5$ Па, $t=99,6^\circ C$ и по таблице 9.1 находим:

$$A=51,2 (M \cdot ^\circ C)^{-1}; \quad B=6,25 \cdot 10^{-3} M/Вт.$$

Температурный напор

$$\Delta t = t_f - t_w = 99,6 - 94,5 = 5,1 \text{ } ^\circ C;$$

Подставив найденные значения в формулу (9.5), получим:

$$\alpha = 3,25 \cdot \frac{51,2^{0,75}}{6,25 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{5,1 \cdot 3,14 \cdot 0,01}} = 15730 \text{ Вт}/(M^2 \cdot ^\circ C)$$

Исходя из уравнения теплового баланса ($Q=G \cdot r$) и закона Ньютона-Рихмана ($Q = \alpha \cdot \Delta t \cdot F$), количество конденсирующего пара G может быть представлено как:

$$G = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot F}{r} = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot \pi \cdot d \cdot h}{r}, \text{ кг} / \text{с}$$

где F – площадь поверхности трубки, $F = \pi \cdot d \cdot h$, M^2 ;

r – теплота парообразования при $t_f = 99,6^\circ C$, $r = 2258$ кДж/кг.

$$G = \frac{15730 \cdot 5,1 \cdot 3,14 \cdot 0,02 \cdot 2}{2258 \cdot 10^3} = 4.465 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{с} = 16.074 \text{ кг}/\text{ч}$$



Литература.

Основная.

1. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен/ Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев - Москва: Издательский дом МЭИ, 2010.— 570 с.
2. Цветков, Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену./ Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко.— Москва: Издательский дом МЭИ, 2010 - 196 с.
3. Луканин, В.Н. Теплотехника: Учеб. для вузов /В.Н. Луканин и др.— Москва: Высш. шк., 2009.— 670 с.
4. Александров, А.А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики А.А. Справочник. / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. — 224 с.

Дополнительная.

5. Михеев, М.А. Основы теплопередачи. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. — Москва: Энергия, 1977.— 344с.
6. Михайлова, М.М. Сборник задач и примеров расчёта по теплопередаче. / М.М. Михайлова. — Москва: Изд-во МАИ, 1973. — 114 с.
7. Воскресенский, К.Д. Сборник расчётов и задач по теплопередаче. / К.Д. Воскресенский. — Москва: ГЭИ, 1959. — 337 с.
8. Ерохин, В.Г. Сборник задач по основам гидравлики и теплотехники./ В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. - Москва: Энергия, 1979. - 240с.
9. Краснощёков, Е.А. Задачник по теплопередаче. / Е.А. Краснощёков, А.С. Сукомел. — Москва: Энергия, 1980. - 288 с.
10. Исаченко, В.П. Теплообмен при конденсации. / В.П. Исаченко. - Москва: Энергия, 1977. - 240 с.
11. Исаченко, В.П. Теплопередача./ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - Москва: Энергия, 1975. — 488 с.
12. Михеев, М.А. Краткий курс теплопередачи. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. — Москва: Госэнергоиздат, 1960. — 207 с.
13. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник./ А.А. Александров, Б.А. Григорьев. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. — 165 с.



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

ПРИЛОЖЕНИЕ А:

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	ρ , кг/м ³	$C_{\text{пр}}$, кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^{-4}$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^{-4}$, Н/м	Pr
0	999,9	4,212	55,1	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	999,7	4,191	57,4	1,306	0,7	741,6	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	1,82	726,9	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	3,21	712,2	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	3,87	696,5	4,31
50	988,1	4,174	64,8	0,556	4,49	676,9	3,54
60	983,2	4,179	65,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	977,8	4,187	66,8	0,415	5,7	643,5	2,55
80	971,8	4,195	67,4	0,365	6,32	625,9	2,21
90	965,3	4,208	68	0,326	6,95	607,2	1,95
100	958,4	4,22	68,3	0,295	7,52	588,6	1,75
110	951	4,233	68,5	0,272	8,08	569	1,6
120	943,1	4,25	68,6	0,252	8,64	548,4	1,47
130	934,8	4,266	68,6	0,233	9,19	528,8	1,36
140	926,1	4,287	68,5	0,217	9,72	507,2	1,26
150	917	4,313	68,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	907,4	4,346	68,3	0,191	10,7	466	1,1
170	897,3	4,38	67,9	0,181	11,3	443,4	1,05
180	886,9	4,417	67,4	0,173	11,9	422,8	1
190	876	4,459	67	0,165	12,6	400,2	0,96
200	863	4,505	66,3	0,158	13,3	376,7	0,93
210	852,8	4,555	65,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	840,3	4,614	64,5	0,149	14,8	331,6	0,89
230	827,3	4,681	63,7	0,145	15,9	310	0,88
240	813,6	4,756	62,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	799	4,844	61,8	0,137	18,1	261,9	0,86
260	784	4,949	60,5	0,135	19,7	237,4	0,87
270	767,9	5,07	59	0,133	21,6	214,8	0,88
280	750,7	5,23	57,4	0,131	23,7	191,3	0,9
290	732,3	5,485	55,8	0,129	26,2	168,7	0,93
300	712,5	5,736	54	0,128	29,2	144,2	0,97
310	691,1	6,071	52,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	667,1	6,574	50,6	0,128	38,2	98,1	1,11
330	640,2	7,244	48,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	610,1	8,165	45,7	0,127	53,4	56,7	1,39
350	574,4	9,504	43,0	0,126	66,8	38,16	1,6
360	528	13,984	39,5	0,126	109	20,21	2,35



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

ПРИЛОЖЕНИЕ Б:

Физические свойства водяного пара в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^5, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$r, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0,01	0,0061	0,00485	2500	1,861	1,697	1888	1
10	0,0123	0,00939	2477	1,869	1,77	1011	1
20	0,0234	0,01729	2453	1,877	1,824	563,7	1
30	0,0424	0,03037	2430	1,885	1,883	328,9	1
40	0,0738	0,05117	2406	1,895	1,953	200,7	1
50	0,1233	0,08303	2382	1,907	2,034	127,5	0,99
60	0,1992	0,1302	2358	1,923	2,122	83,88	0,99
70	0,3116	0,1981	2333	1,942	2,214	56,9	0,99
80	0,4736	0,2932	2309	1,967	2,309	39,63	0,99
90	0,7011	0,4232	2283	1,997	2,407	28,26	0,99
100	1,013	0,598	2256,8	2,135	2,372	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2230	2,177	2,489	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2202,8	2,206	2,593	11,46	1,09
130	2,7	1,496	2174,3	2,257	2,686	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2145	2,315	2,791	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2114,3	2,395	2,884	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2092,6	2,479	3,012	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2049,5	2,583	3,128	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2015,2	2,709	3,268	2,93	1,25
190	12,55	6,397	1978,8	2,856	3,419	2,44	1,3
200	15,55	7,862	1940,7	3,023	3,547	2,03	1,36
210	19,08	9,588	1900,5	3,199	3,722	1,71	1,41
220	23,2	11,62	1857,8	3,408	3,896	1,45	1,47
230	27,98	13,99	1813	3,634	4,094	1,24	1,54
240	33,48	16,76	1765,6	3,881	4,291	1,06	1,61
250	39,78	19,98	1715,8	4,158	4,512	0,913	1,68
260	46,94	23,72	1661,4	4,468	4,803	0,794	1,75
270	55,05	28,09	1604,4	4,815	5,106	0,688	1,82
280	64,19	33,19	1542,9	5,234	5,489	0,6	1,9
290	74,45	39,15	1476,3	5,694	5,827	0,526	2,01
300	85,92	46,21	1404,3	6,280	6,268	0,461	2,13
310	9870	5458	1325,2	7,118	6838	0,403	2,29
320	112,9	64,72	1238,1	8,206	7,513	0,353	2,50
330	128,9	77,1	1139,7	9,881	8,257	0,31	2,86
340	146,08	92,76	1027,1	12,35	9,304	0,272	3,35
350	165,37	113,6	893,1	16,24	10,7	0,234	4,03
360	186,74	144	719,7	23,03	12,79	0,202	5,23



Экспериментальное исследование теплопередачи при конденсации пара в теплообменных аппаратах

ИНСТРУКЦИЯ

По технике безопасности для преподавателей, лаборантов и студентов при выполнении лабораторных работ

1. К работе на лабораторной установке допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с ее устройством и особенностями.

2. Все необходимые операции на лабораторной установке студенты выполняют под контролем преподавателя или лаборанта.

3. После включения установки необходимо убедиться в правильности ее работы.

4. Во время проведения лабораторных работ во избежание несчастных случаев и травмирования запрещается:

- касаться руками токоведущих проводов, клемм, деталей;
- перепоручать наблюдение за работой установки лицам, не прошедшим инструктаж;
- самостоятельно перемещать измерительные приборы, что может вызвать их поломку.

5. При обнаружении опасности или неисправности оборудования лабораторной установки необходимо немедленно ее отключить от сети.

6. После выполнения лабораторной работы или на время перерыва лабораторная установка отключается и выключается рубильник силового шкафа.

7. При несчастном случае необходимо оказать пострадавшему первую медицинскую помощь.