

**Е.П. Барулин, А.С. Кувшинова, Д.В. Кириллов,  
А.Г. Липин, В.Н. Исаев**

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ**

**Учебное пособие**



**Иваново**

**2009**

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Ивановский государственный химико-технологический университет

**Е.П. Барулин, А.С. Кувшинова, Д.В. Кириллов,  
А.Г. Липин, В.Н. Исаев**

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ**

**Учебное пособие**

Иваново 2009

УДК 66.021(07)

Лабораторный практикум по тепловым процессам: Учебное пособие/ Е.П. Барулин [и др.]; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. - Иваново, 2009, 65с. - ISBN

В учебном пособии представлен лабораторный практикум по изучению процессов переноса теплоты на кафедре “Процессы и аппараты химической технологии” ИГХТУ.

Изложены основные понятия, определения и закономерности переноса теплоты. Приведено описание лабораторных установок, изложены методики проведения экспериментальных исследований, порядок обработки полученных результатов, вопросы для самоконтроля.

Лабораторный практикум предназначен для студентов ИГХТУ всех форм обучения и всех специальностей при изучении дисциплин “Процессы и аппараты химической технологии” и “Теплотехника”.

Табл. 20. Ил. 26. Библиогр.: 10 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ГОУВПО Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра “Теплогазоснабжения и вентиляции” Ивановского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук А.А. Поспелов (Ивановский государственный энергетический университет).

ISBN

© ГОУВПО Ивановский государственный  
химико-технологический  
университет, 2009

## Содержание

Введение.....	4
1. Теоретические основы теплопереноса.....	5
1.1. Теплопроводность.....	5
1.2. Конвективный перенос теплоты.....	7
1.3. Тепловое излучение.....	10
1.4. Теплопередача.....	12
1.5. Теплообмен при парообразовании.....	16
1.6. Теплоотдача при конденсации пара.....	18
2. Лабораторные работы.....	20
2.1. Работа №1. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности твердых материалов.....	20
2.2. Работа №2. Исследование процесса теплоотдачи при естественной конвекции.....	23
2.3. Работа №3. Исследование процесса теплоотдачи при вынужденной конвекции.....	26
2.4. Работа №4. Исследование процессов теплоотдачи и теплопередачи при установившемся режиме в различных типах теплообменников.....	31
2.4.1. Цель и порядок выполнения работы.....	31
2.4.2. Работа №4.1. Исследование теплообмена в теплообменнике типа “труба в трубе” (ТТ).....	31
2.4.3. Работа №4.2. Исследование теплообмена в теплообменнике с неподвижной решеткой (ТН).....	33
2.4.4. Работа №4.3. Исследование теплообмена в теплообменнике с плавающей головкой (ТП).....	35
2.4.5. Работа №4.4. Исследование теплообмена в теплообменнике с перегородками.....	36
2.4.6. Работа №4.5. Исследование теплообмена в теплообменнике с двойными трубками.....	39
2.5. Работа №5. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при нестационарном процессе конвективного теплообмена в аппарате с циркуляционным перемешиванием.....	44
2.6. Работа №6. Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи при нестационарном процессе конвективного теплообмена в кожухотрубчатом теплообменнике.....	48
2.7. Работа №7. Исследование процесса теплоотдачи при кипении однокомпонентной жидкости в условиях естественной и вынужденной конвекции в аппарате с мешалкой.....	51
2.8. Работа №8. Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи при охлаждении жидкости в аппарате с рубашкой.....	53
2.9. Работа №9. Исследование процесса конденсации водяного пара.....	56
Приложение.....	60
Список библиографических источников.....	64

## Введение

Перенос энергии в форме теплоты, происходящий между телами, имеющими различную температуру, называется **теплообменом**. Теплота переносится из области с большей температурой в область с меньшей температурой. Движущей силой любого процесса теплообмена является разность температур более и менее нагретой среды. Теплообмен между средами и телами представляет собой обмен энергией между молекулами, атомами и свободными электронами. Среда – жидкие и газообразные, участвующие в теплообмене, называются **теплоносителями**.

Тепловые процессы (нагревания, охлаждения, конденсации паров, выпаривания) имеют большое значение для проведения многих массообменных и химических процессов.

Различают три принципиально различных элементарных способа распространения теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

**Теплопроводность** представляет собой процесс переноса теплоты вследствие беспорядочного (теплого) движения микрочастиц, непосредственно соприкасающихся друг с другом. Это движение молекул газа или жидкости, колебание атомов или диффузия свободных электронов. В чистом виде теплопроводность существует только в твердых телах. В газообразных и жидких средах теплопроводность сопровождается конвекцией.

**Конвекция** - процесс переноса теплоты вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов газа или жидкости. В зависимости от причины, вызывающей это перемещение, различают свободную и вынужденную конвекцию. Свободная конвекция предполагает перемещение жидкости или газа, вызванное разностью плотностей в различных точках пространства вследствие различия температур. При вынужденной конвекции перемещение потоков жидкости или газа происходит вследствие затраты механической энергии.

**Тепловое излучение** – это процесс распространения теплоты посредством электромагнитных волн инфракрасной области спектра, обусловленный тепловым движением атомов или молекул излучающего тела.

Если передача теплоты происходит одновременно всеми способами или хотя бы двумя из них, такой процесс называют **сложным теплообменом**. Примером сложного теплообмена является процесс распространения теплоты в газовых средах одновременно конвекцией и тепловым излучением.

В технике часто протекают процессы теплообмена между различными теплоносителями, разделенными твердой стенкой. Такой процесс переноса теплоты называется **теплопередачей**.

Количество передаваемой теплоты от одного теплоносителя к другому за единицу времени может оставаться постоянным или изменяться во времени. В первом случае процесс переноса теплоты называется установившимся, а во втором – неустойчивым.

Процессы теплообмена могут происходить в различных средах: чистых веществах и разных смесях, при изменении и без изменения агрегатного

состояния и т.д. В зависимости от этого теплообмен протекает по-разному и описывается различными уравнениями. Изучение закономерностей как простых, так и более сложных процессов переноса теплоты в различных средах является задачей лабораторного практикума.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

### 1.1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Процесс **теплопроводности** представляет собой перенос теплоты вследствие беспорядочного (теплового) движения микрочастиц, непосредственно соприкасающихся друг с другом. Теплопроводность в общем случае сопровождается изменением температур в пространстве и времени. Совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемого пространства называется **температурным полем**. Поверхности, имеющие равные температуры, называют **изотермическими поверхностями**. Следует различать стационарное и нестационарное температурное поле. При **стационарном поле** температура изменяется лишь в пространстве и не изменяется во времени, поэтому является функцией осей координат:

$$t = f(x, y, z) \quad \text{или} \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (1.1)$$

**Нестационарное поле** характеризуется изменением температур, как в пространстве, так и во времени. Математической формулировкой нестационарного температурного поля служит выражение:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1.2)$$

Одной из основных характеристик температурного поля является его температурный градиент. **Температурный градиент** - вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный частной производной от температуры по этому направлению:

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (1.3)$$

При изучении явления теплопереноса вводятся понятия теплового потока ( $Q$ ) и плотность теплового потока ( $q$ ).

**Тепловой поток** – количество теплоты, проходящее в единицу времени:

$$Q = \frac{Q'}{\tau}, \quad (1.4)$$

где  $Q'$  – количество теплоты, Дж;  $\tau$  – время, с;  $Q$  – тепловой поток, Вт.

**Плотность теплового потока (удельный тепловой поток)** - количество теплоты, прошедшее через единицу поверхности в единицу времени:

$$q = \frac{Q'}{F\tau} = \frac{Q}{F}, \quad (1.5)$$

где  $F$  – площадь поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Основой описания процесса теплопроводности является **закон Фурье**, согласно которому количество теплоты  $dQ$ , передаваемое посредством теплопроводности через элемент поверхности  $dF$ , перпендикулярный тепловому потоку, за время  $d\tau$  прямо пропорционально температурному градиенту  $\frac{\partial t}{\partial n}$ , поверхности  $dF$ , времени  $d\tau$  и коэффициенту теплопроводности  $\lambda$ :

$$dQ' = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau \quad \text{или} \quad q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (1.6)$$

Знак «-» в уравнении (1.6) указывает на то, что направление теплового потока противоположно вектору температурного градиента, это объясняется тем, что в природе теплота самопроизвольно переходит всегда из области с большей температурой в область с меньшей температурой.

**Коэффициент теплопроводности**  $\lambda$  показывает, какое количество тепла проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на 1 град на единицу длины нормали к изотермической поверхности,

$$[\lambda] = \left[ \frac{dQ \partial n}{\partial t dF d\tau} \right] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{град} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сек}} \right] = \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right].$$

Для практических расчетов необходимо иметь выражение для определения теплового потока, проходящего через поверхность заданной конфигурации и площади. При проектировании теплообменных аппаратов наиболее часто встречаются расчеты теплопроводности плоских и цилиндрических стенок.

Для плоской стенки толщиной  $\delta$  из уравнений (1.5) и (1.6) имеем:

$$Q = qF = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} F. \quad (1.7)$$

Интегрируя (1.7) в пределах от  $n=0$  до  $n=\delta$  и от  $t=t_{\text{сr1}}$  до  $t=t_{\text{сr2}}$ , получим:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{сr1}} - t_{\text{сr2}}) F. \quad (1.8)$$

Для трубы с внутренним радиусом  $r_{\text{вн}}$  и наружным  $r_{\text{н}}$  площадь цилиндрической поверхности равна:

$$F = 2\pi r \ell, \quad (1.9)$$

где  $r$  – средний радиус трубы, м;  $\ell$  – длина трубы, м.

Таким образом, из уравнения (1.7) имеем:

$$Q = qF = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} 2\pi r \ell. \quad (1.10)$$

Разделяя переменные:

$$Q \left( \frac{dr}{r} \right) = -2\pi \ell \lambda \cdot dt \quad (1.11)$$

и интегрируя:

$$Q \int_{r_{\text{BH}}}^{r_{\text{H}}} \frac{dr}{r} = -2\pi\ell\lambda \cdot \int_{t_{\text{CT1}}}^{t_{\text{CT2}}} dt, \quad (1.12)$$

получим:

$$Q = \frac{2\pi\ell(t_{\text{CT1}} - t_{\text{CT2}})}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{BH}}}}. \quad (1.13)$$

При использовании уравнений (1.8.), (1.13) для практических расчетов необходимо иметь значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$ . Численное значение  $\lambda$  зависит от физико-химических свойств теплопроводящего материала, температуры и давления. Влияние давления на значение  $\lambda$  проявляется лишь в газовой среде. Для твердых тел и жидкостей этим влиянием можно пренебречь. В настоящее время аналитическое определение значений коэффициентов теплопроводности различных материалов весьма затруднительно. Поэтому коэффициенты теплопроводности находят экспериментальным путем. Для большинства материалов они найдены и приводятся в справочной литературе. Однако дальнейшее развитие химической технологии, способствующее получению новых веществ и материалов, ставит задачи по совершенствованию методов определения коэффициентов теплопроводности.

На практике часто для определения коэффициентов теплопроводности применяют метод цилиндрического слоя. Коэффициент теплопроводности в этом случае определяют при установившемся процессе теплообмена из выражения:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln \frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{BH}}} 2\pi\ell(t_{\text{CT1}} - t_{\text{CT2}})}{2\pi\ell(t_{\text{CT1}} - t_{\text{CT2}})}. \quad (1.14)$$

## 1.2. КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОТЫ

Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты связан с переносом самой среды. Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. Совместный перенос теплоты путем конвекции и теплопроводности называют **конвективным теплообменом**.

**Теплоотдача** - конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью (стенкой).

Количество теплоты, переданное в процессе теплоотдачи, определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

для установившегося режима

$$Q = \alpha(t_{\text{CT}} - t_{\text{Ж}})F, \text{ Вт}; \quad (1.15)$$

для неустановившегося режима

$$Q' = \alpha(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})F\tau, \text{ Дж}, \quad (1.16)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{\text{ж}}$ ,  $t_{\text{ст}}$  - средние температуры жидкости и стенки, °С;  $F$  - поверхность стенки, м<sup>2</sup>;  $Q$  ( $Q'$ ) - тепловой поток (количество теплоты), Вт (Дж);  $\tau$  - время, с.

**Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$**  - характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Коэффициент  $\alpha$  показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 градус (К),  $[\alpha] = \left[ \frac{Q}{F(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}} \right] = \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$ .

Установлено, что коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов: вида и режима движения жидкости, ее физических свойств, размеров и формы стенки, шероховатости стенки. Определение  $\alpha$  является основной задачей расчета теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют из критериальных уравнений, полученных преобразованием дифференциальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена методами теории подобия.

Согласно положений теории подобия конвективный теплообмен без изменения агрегатного состояния вещества в стационарных условиях может быть описан критериальным уравнением вида:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, \Gamma, \dots), \quad (1.17)$$

$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$  - **критерий Нуссельта**, характеризующий подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости;

$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{wl\rho}{\mu}$  - **критерий Рейнольдса**, который характеризует гидродинамический режим потока при вынужденном движении и является мерой соотношения сил инерции и вязкого трения;

$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c\mu}{\lambda}$  - **критерий Прандтля**, который характеризует физико - химические свойства теплоносителя и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке;

$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t$  - **критерий Грасгофа**, характеризующий соотношение сил вязкого трения и подъемной силы, описывает режим свободного движения теплоносителя;

$\Gamma_i = \frac{l_i}{l}$  - **безразмерный геометрический симплекс**, характеризующий геометрическое подобие системы.

В выражении этих критериев:  $\nu = \mu/\rho$  - кинематический коэффициент вязкости теплоносителя, м<sup>2</sup>/с;  $w$  - скорость движения теплоносителя, м/с;

$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>;  $l$  – определяющий размер, м;  $l_i$  – характерный размер, м;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, 1/К;  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}$  – температурный напор между стенкой и теплоносителем, °С;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К);  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $c$  – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);  $\tau$  – время процесса, с.

Критерий Нуссельта, входящий в уравнение (1.17), является определяемым. При известном значении  $Nu$  коэффициент теплоотдачи может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}. \quad (1.18)$$

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

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

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \left( \frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \varepsilon_{\ell}, \quad (1.19)$$

где  $Pr_{\text{ст}}$  – критерий Прандтля для теплоносителя при температуре стенки;

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

$$Nu = C \cdot Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \varepsilon_{\ell}. \quad (1.20)$$

Значение коэффициента  $C$  определяется из таблицы 1.1 в зависимости от величины критерия Рейнольдса.

Для приближенных расчетов можно пользоваться уравнением:

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}. \quad (1.21)$$

Таблица 1.1

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	6,0	10,3	15,5	19,5	27,0	33,0

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

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \varepsilon_{\ell}. \quad (1.22)$$

Определяющей температурой в уравнениях (1.18)-(1.22) является средняя температура жидкости, определяющим размером – эквивалентный диаметр сечения потока:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (1.23)$$