

## Введение

Лабораторный практикум по исследованию и моделированию основных процессов химической технологии является фактически вторым этапом изучения студентами бакалавриата направления 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» базовой специальной дисциплины «Моделирование энерго- и ресурсосберегающих процессов в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Практикум предназначен для практического освоения студентами основных приёмов экспериментального исследования и примеров математического моделирования типовых химико-технологических и смежных процессов.

Представленные в лабораторном практикуме лабораторные и расчётно-практические работы ориентированы на такие объекты, как противоточный теплообменник «труба в трубе», насадочный абсорбер, стенд по изучению парожидкостного равновесия, тарельчатая колонна периодической ректификации, периодический кристаллизатор, стенд по изучению кинетики процесса сушки дисперсных материалов, реактор непрерывного действия с мешалкой и четырёхкоридорный проточный аэротенк.

При выполнении работ лабораторного практикума студенты решают конкретные задачи получения достоверных опытных данных с применением современного оборудования, целенаправленной обработки результатов исследований и использование их для идентификации параметров математических моделей процессов с последующей проверкой адекватности этих моделей.

Каждой теме работы практикума предпослана самостоятельная подготовка студентов к конкретной работе с использованием ранее полученных теоретических знаний о физико-химических особенностях исследуемых процессов и математических описаниях статистики или динамики их функционирования.

Выполнение студентами всех работ лабораторного практикума планируется с использованием маршрутной системы, а допуск каждого студента к занятию производится после представления им рабочей тетради с материалом подготовки к работе и краткого собеседования.

## 1. Лабораторная работа № 1

### Исследование и моделирование процесса теплопередачи в аппарате «труба в трубе»

**Цель работы:** исследование на экспериментальной установке процесса теплообмена в аппарате «труба в трубе», расчёт на основании опытных данных коэффициентов теплопередачи и компьютерное моделирование статистики процесса теплообмена.

Теплообменные аппараты разнообразных конструкций получили широкое применение в химической технологии и нефтехимии.

Основные сложности при расчётах теплообменников связаны с необходимостью определения коэффициентов теплопередачи между потоками хладагентов и теплоносителей в объёме аппарата, зависящих от коэффициентов теплоотдачи, на величины которых существенно влияет гидродинамика (структура) движения потоков, а установить математическую формализацию этого влияния для конкретных гидродинамических режимов движения потоков очень сложно.

Экспериментальная часть работы выполняется на установке, фото-снимок которой показан на рис. 1.

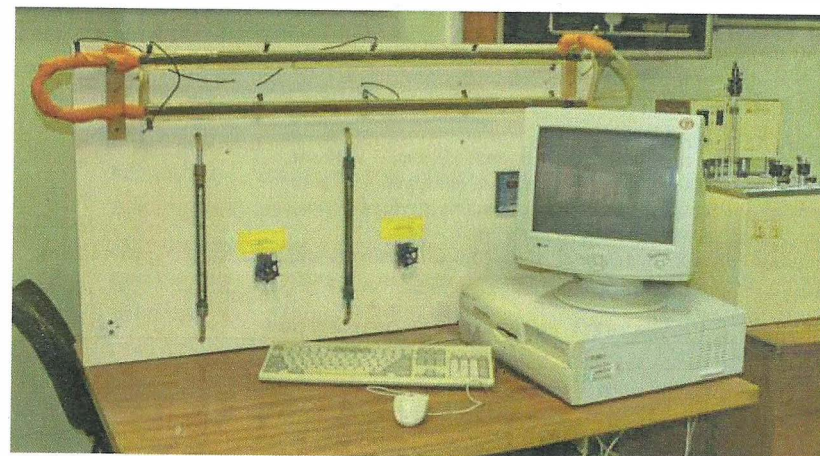


Рис. 1. Экспериментальная установка по исследованию теплообмена в аппарате «труба в трубе»

Принципиальная схема лабораторной установки (рис. 1) показана на рис. 2.

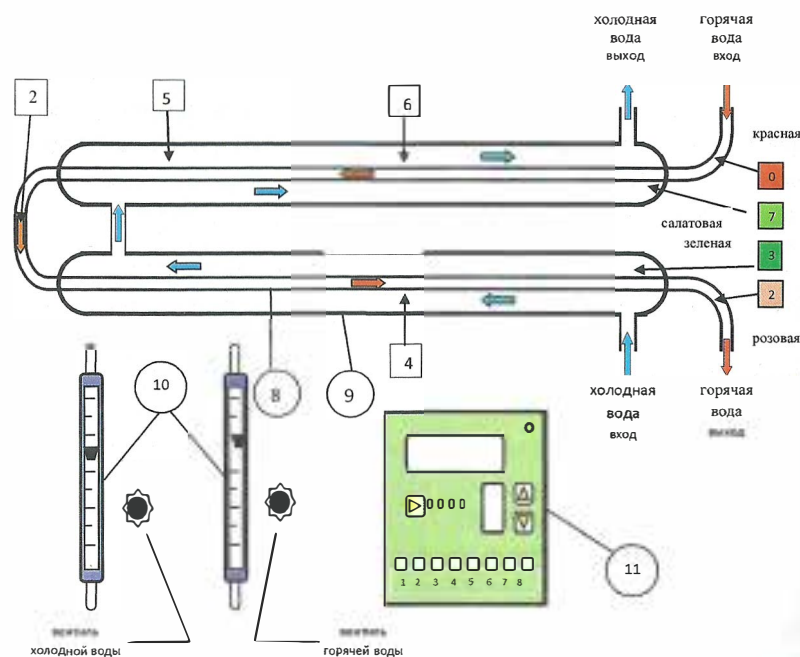


Рис. 2. Принципиальная схема установки по исследованию процесса теплообмена в аппарате «труба в трубе»:

1, 2, ..., 7 – термопары ТХК, 8 – две стеклянные трубы, 9 – две медные трубы, 10 – ротаметры РС-3, 11 – многоканальный термометр «Элемер» ТМ5103.

#### Размеры труб:

общая длина труб (поверхности теплообмена) – 1900 мм,  
наружный диаметр верхней стеклянной трубы – 37 мм,  
наружный диаметр нижней стеклянной трубы – 33 мм,  
наружные диаметры двух медных труб – 14 мм,  
толщина стенок стеклянных труб – 1,6 мм, толщина стенок медных труб – 1,2 мм.

Таблица 1

#### Результаты градуировки ротаметров

Объемные расходы $U$ потоков воды	Показания шкал ротаметров %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_1$ горячей воды, мл/мин	132,8	182,8	232,7	282,7	332,6	382,6	432,5	482,5	532,5	582,4
$U_2$ холодной воды, мл/мин	24,6	29,4	39,6	54,2	72,5	93,6	116,8	141,2	166,0	190,4

Экспериментальная часть работы выполняется студентами в соответствии с заданными преподавателем значениями объемных расходов потоков горячей ( $U_1$ ) и холодной ( $U_2$ ) воды, которые устанавливаются по показаниям шкал ротаметров (рис. 1) и табл. 1. Холодная вода поступает в стеклянные трубы из водопроводной сети, а горячая вода противотоком подается в медные трубы при заданной температуре из термостата.

#### Порядок выполнения работы.

1. В лаборатории включить на общем электрощите тумблер для подачи электропитания на розетки установки, предназначенные для подключения термостата, многоканального термометра, компьютера и монитора.
2. Подключить к электрической сети компьютер, монитор и многоканальный термометр.
3. Подключить к электросети термостат, установить заданную температуру горячей воды в термостате и включить тумблеры для подачи электропитания на обогреватель и циркуляционный насос термостата.
4. Открыть кран подачи из сети водопровода холодной воды в стеклянные трубы.
5. Открыть вентиль перед ротаметром подачи холодной воды, установить максимум её объемного расхода (95 – 100%) для удаления из стеклянных труб воздушных пузырей.
6. При помощи вентиля подачи в трубы теплообменника потоков холодной и горячей воды установить заданные преподавателем величины расходов этих водных потоков по соответствующим показаниям шкал ротаметров. (Эти показания при проведении эксперимента надо контролировать и аккуратно поддерживать при помощи указанных вентиля).
7. Используя пароль «Student», запустить на компьютере программу «The Fish», зафиксировав «Start».
8. После достижения времени (40 – 50 мин.) наступления статистики теплообмена, когда на дисплее кривые регистраций термопарами показаний восьми температур выйдут на постоянный уровень, зафиксировать «Stop».



9. Закрыть вентили подачи в теплообменник холодной и горячей воды, выключить оба тумблера на термостате.
10. По показанию внешнего термометра необходимо зафиксировать температуру окружающего воздуха.
11. Зафиксировать показания электронного многоканального термометра, записать на USB-флеш-накопитель численные результаты и полученные дисплей-рисунки (показано на рис. 3).
12. Выключить компьютер и монитор, отключить их и многоканальный термометр от электросети
13. Пригласить преподавателя по завершению экспериментальной части лабораторной работы.

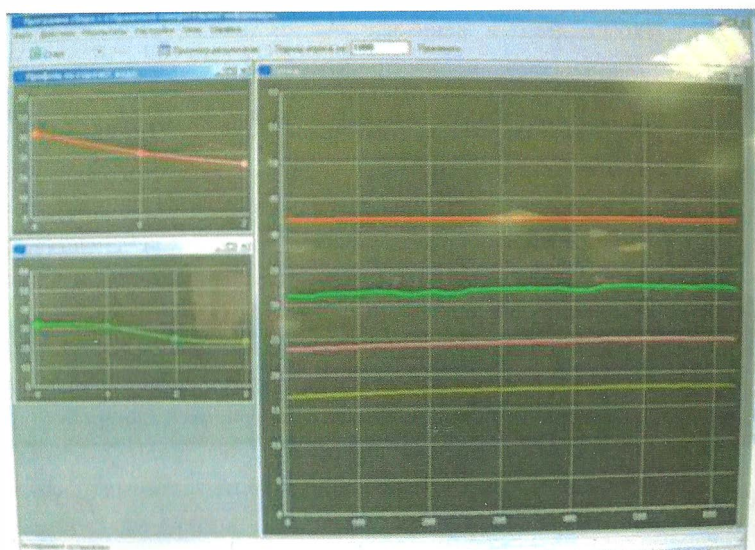


Рис. 3. Фотографии дисплея компьютера для установившегося режима работы теплообменника:

слева – профили изменений температур по длине труб, справа – изменения температур во времени

Используя полученные результаты исследования теплообмена в аппарате «труба в трубе» и справочные данные о величинах удельных теплоёмкостей и плотностей воды при разных температурах её потоков, надо выполнить:

1. Определить величины тепловых потоков в теплообменнике с учётом тепловых потерь в окружающую среду.
2. Вычислить коэффициенты теплопередачи между потоками горячей и холодной воды и между потоком нагреваемой холодной водой и окружающим воздухом.
3. Составить математическое описание статистики теплообмена в аппарате с использованием модели идеального вытеснения для интерпретации структур потоков в трубах теплообменника.
4. Решить поставленную задачу компьютерного моделирования статистики теплообмена в аппарате.
5. Сравнить экспериментальные и расчётные профили температур.
6. Оценить влияние тепловых потерь. Сделать выводы.

Для более детального анализа процесса теплообмена в аппарате «труба в трубе» рассмотрим показанную на рис. 4 схему теплообмена между горячей жидкостью (1), поток которой движется внутри круглой трубы (1) и холодной жидкостью (2), текущей противотоком по круглой трубе (2), внутри которой расположена труба (1).

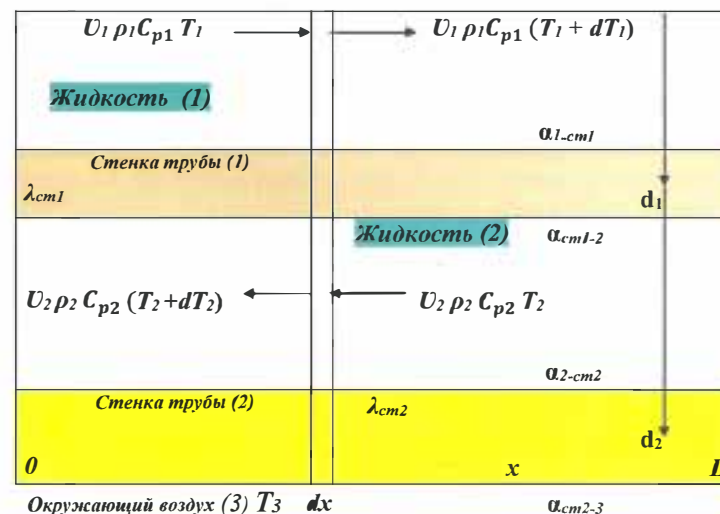


Рис. 4. Схема теплообмена в аппарате «труба в трубе» с учётом локальных коэффициентов теплоотдачи и коэффициентов теплопроводности материалов (меди и стекла) труб

На рис. 4 обозначены:  $U, \rho, C_p, T$  – объёмные скорости движения, плотности, удельные теплоёмкости и температуры жидкостей (1), (2);  $T_3$  – температура окружающего воздуха;  $d_1, d_2$  – средние диаметры труб, равные полусуммам наружных и внутренних диаметров труб;  $L$  – длина труб;  $x$  – текущая координата длины трубы;  $\lambda_{cm}$  – теплопроводность материала трубы;  $\alpha_{1-cm1}, \alpha_{cm1-2}, \alpha_{2-cm2}$  – коэффициенты теплоотдачи между потоками жидкостей и поверхностями (наружными и внутренними) стенок;  $\alpha_{cm2-3}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы (2) к окружающему аппарату воздуху;  $dT_1, dT_2$  – дифференциалы изменения температур жидкостей на дифференциале  $dx$  длины труб аппарата.

Допускаем, что структуры потоков жидкостей в трубах аппарата соответствуют модели идеального вытеснения, массовые потоки ( $G = U \cdot \rho$ ) жидкостей и их удельные теплоёмкости, равные значениям при средних температурах потоков воды, постоянны по длине труб теплообменника.

Строгое математическое описание процесса теплообмена предполагает запись частных уравнений теплоотдачи Ньютона-Рихмана, содержащих коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{1-cm1}, \alpha_{cm1-2}, \alpha_{2-cm2}, \alpha_{cm2-3}$ , которые сильно зависят от гидродинамических факторов (особенно в случае нетурбулентных режимов движения). Практически нет адекватных уравнений для расчёта этих коэффициентов теплопередачи. Поэтому удобным является рассмотрение не частных эффектов теплопередачи, а упрощённых процессов теплопередачи. В нашем случае это процесс теплопередачи между горячей жидкостью (1) и нагреваемой ею жидкостью (2) и теплопередача (теплопотеря) от жидкости (2) в окружающий воздух. Интенсивности этих теплопередач характеризуются соответствующими коэффициентами теплопередачи  $K_{12}$  и  $K_{23}$ , которые равны:

$$K_{12}^{-1} = 1/\alpha_{1-ct1} + \delta_{ct1}/\lambda_{ct1} + 1/\alpha_{ct1-2}, \quad K_{23}^{-1} = 1/\alpha_{ct1-2} + \delta_{ct2}/\lambda_{ct2} + 1/\alpha_{ct2-3},$$

где  $\delta_{ct1}, \delta_{ct2}$  – толщины стенок труб.

Для статического режима теплообмена в аппарате «труба в трубе» с учётом потери тепла в окружающую среду можно записать три уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned} Q_1 &= U_1 \rho_1 C_{p1} (T_{1ax} - T_{1вых}) = K_{12} F_{12} \Delta \bar{T}_{12}, \\ Q_2 &= U_2 \rho_2 C_{p2} (T_{2вых} - T_{2ax}), \\ Q_3 &= Q_1 - Q_2 = K_{23} F_{23} \Delta \bar{T}_{23}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_1$  – тепло, расходуемое потоком горячей жидкости (1) на нагревание потока холодной жидкости (2) и на потери тепла в окружающий воздух;  $K_{12}$  – коэффициент теплопередачи от жидкости (1) к жидкости (2);  $K_{23}$  – коэффициент теплопередачи от жидкости (2) к окружающему воздуху;  $F_{12}, F_{23}$  – поверхности теплообмена, определяемые длиной труб  $L$  и средними диаметрами труб  $d_1, d_2$ ;  $\Delta \bar{T}_{12}, \Delta \bar{T}_{23}$  – средние движущие температурные силы процессов теплопередачи, определяемые значениями входных и выходных температур жидкостей и температурой окружающего воздуха.

$$\Delta \bar{T} = \frac{1}{2} (\Delta T_B + \Delta T_M) \text{ или, если } \Delta T_B / \Delta T_M > 1.7, \text{ то } \Delta \bar{T} = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_B}{\Delta T_M}},$$

где  $\Delta T_B, \Delta T_M$  – большая и меньшая разности температур потоков жидкостей (1) и (2) на концах труб, а также большая и меньшая разности между входной и выходной температурами жидкости (2) и постоянной температурой окружающего воздуха  $T_3$ .

Для конкретной конструкции теплообменника «труба в трубе», зная длину  $L$  и средние диаметры труб аппарата, легко вычислить площади  $F_{12}, F_{23}$  ( $F = \pi d L$ ), а при проведении лабораторного эксперимента с помощью соответствующих измерительных приборов зафиксировать величины объёмных скоростей потоков жидкостей (1), (2), их температуры и температуру окружающего воздуха  $T_3$ . Значения удельных плотностей и теплоёмкостей жидкостей при данных температурах определяются из справочника.

Таким образом, неизвестные параметры теплопередачи  $K_{12}, K_{23}$  вычисляются из следующих уравнений:

$$K_{12} = \frac{Q_1}{F_{12} \Delta \bar{T}_{12}}, \quad K_{23} = \frac{Q_3}{F_{23} \Delta \bar{T}_{23}} \quad (2)$$

Рассмотрим простой статический баланс тепловых потоков применительно к микрообъёму горячей жидкости (1), передающему тепло микрообъёму жидкости (2) через микроповерхность  $dF = \pi d_1 dx$ :

$$U_1 \rho_1 C_{p1} T_1 - U_1 \rho_1 C_{p1} (T_1 + dT_1) = K_{12} dF_{12} (T_1 - T_2),$$

$$\text{откуда получим: } - U_1 \rho_1 C_{p1} dT_1 = K_{12} \pi d_1 dx (T_1 - T_2), \quad (3)$$

Перейдя к безразмерной координате длины труб теплообменника ( $z = \frac{x}{L}$ , а  $dx = \pi d_1 L dz$ ), из уравнения (3) получим:

$$\frac{dT_1(z)}{dz} = - \frac{K_{12} F_{12}}{U_1 \rho_1 C_{p1}} (T_1(z) - T_2(z)). \quad (4)$$

Аналогично легко получить уравнение теплового баланса для второй жидкости, которая получает тепло от горячей жидкости и отдаёт его часть окружающему воздуху :

$$\frac{dT_2(z)}{dz} = \frac{K_{12} F_{12}}{V_2 \rho_2 C_{p2}} (T_1(z) - T_2(z)) - \frac{K_{23} F_{23}}{V_2 \rho_2 C_{p2}} (T_2(z) - T_3). \quad (5)$$

Таким образом, для компьютерного моделирования статике процесса теплообмена в аппарате «труба в трубе» надо реализовать алгоритм численного интегрирования системы уравнений (4,5), задавшись граничными температурными условиями на концах труб, например, для  $z = 0$   $T_1(0) = T_{1ex}$ ,  $T_2(0) = T_{2вх}$ .

Для решения задачи расчёта профилей изменения температур потоков горячей и холодной воды по длине труб теплообменника рекомендуется использовать метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

#### Библиографический список

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. Ч. 1. Теоретические основы химической технологии. Гидродинамические и тепловые процессы и аппараты. – М : Химия, 1995. – 400 с.
2. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Теплообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
4. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
5. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 416 с. ( С. 284 – 297).
6. Кольцова Э.М., Скичко А.С., Женса А.В. Численные методы решения уравнений математической физики и химии. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. – 224 с.

## 2. Лабораторная работа № 2

### Исследование и расчёт парожидкостного равновесия в бинарной системе «ацетон – вода»

В составе отдельных блоков математических описаний и модулей расчёта всех массообменных процессов химической и нефтехимической технологий важное значение имеют блоки, учитывающие межфазные равновесия в системах «пар-жидкость», «газ-жидкость» и «жидкость-жидкость». Математическое описание парожидкостного равновесия особенно актуально для многочисленных процессов ректификации.

**Цель работы:** экспериментальное исследование на лабораторной установке парожидкостного равновесия в бинарной смеси «ацетон – вода» и расчёт состава паровой фазы по известному составу жидкой фазы и давлению кипения смеси с использованием модели Вильсона.

Фотоснимок установки по исследованию парожидкостного равновесия показан на рис. 1.



Рис. 1. Лабораторная установка по исследованию парожидкостного равновесия