



*Федеральное агентство по рыболовству*  
*Федеральное государственное бюджетное образовательное*  
*учреждение высшего образования*  
**«Астраханский государственный технический университет»**  
Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций сертифицирована DQS  
по международному стандарту ISO 9001:2015

Институт нефти и газа  
Кафедра «Технологические машины и оборудование»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ**

по дисциплине

**Моделирование тепломассообменных процессов в области**

**пищевой технологии**

Направление:

**19.06.01 Промышленная экология и биотехнологии**

Направленность

**«Процессы и аппараты пищевых производств»**

Уровень образования: высшее образование – **подготовка кадров высшей**  
**квалификации**

Квалификация выпускника: **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

Форма обучения – **очная**

Астрахань – 2017

**Составитель:**

Заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование»,



доктор технических наук, профессор И.Ю. Алексанян

**Рецензент:**

Доцент кафедры «Теплоэнергетика и холодильные машины», кандидат технических наук, доцент С.А. Путилин

**Методические указания рекомендованы:**

Кафедрой «Технологические машины и оборудование»

Протокол № 5 от «25» 05 2017г.

Заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование»,



доктор технических наук, профессор И.Ю. Алексанян

## Содержание

Практическая работа №1	4
Практическая работа №2	6
Практическая работа №3	8
Практическая работа №4	10
Рекомендуемая литература	18

## Практическая работа № 1

«Математические модели гидродинамической структуры потоков»

**Цель работы:** изучить типовые математические модели структуры потоков в аппаратах, основные методы определения гидродинамической структуры потоков, Проанализировать структуру потока в аппарате методом возмущений.

**Задание:** Объем аппарата составляет  $V=0,016 \text{ м}^3$ . Аппарат заполнен протекающей жидкостью без воздушных пузырей. При расходе жидкости  $w = 0.003 \text{ м}^3/\text{с}$  проведен эксперимент импульсным вводом индикатора. На выходе из аппарата получены значения, приведенные в таблице 1 (по вариантам). Определить объем застойной зоны в аппарате и модель характеризующую структуру потока в нем.

Таблица 1 – Исходные данные

t, с	№№	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	>100
0,01 $C_{\text{инд}}$ , МОЛЬ/М <sup>3</sup>	1	0	0,5	1	4	15	13	10	6	2	1	0
	2	0	0	1	6	11	13	10	5	1	0	0
	3	0	0,5	1	4	15	13	10	6	2	1	0
	4	0	0,5	1	4	15	13	10	6	2	1	0
	5	0	0,5	1	4	15	13	10	6	2	1	0
	6	0	0,2	0,5	2	7	7	3	2	1	0	0
	7	0	1	2	4	5	9	11	8	6	3	0
	8	0	0	1	4	5	8	15	12	8	4	0
	9	0	0,5	1	4	15	13	10	6	2	1	0
	10	0	3	1	6	12	13	10	5	1	0,5	0
	11	0	0	3	6	9	12	7	3	0,5	0	0
	12	0	1	1	3	5	9	11	9	7	3	0
	13	0	0	1	5	10	12	10	7	4	2	0
	14	0	2	4	6	11	8	10	5	2	0	0
	15	0	0	1	5	10	13	10	5	1	0	0
	16	0	2,5	1	4	7	13	10	5	1	0	0
	17	0	1,5	3	4	11	13	10	5	1	0	0

### Контрольные вопросы:

1. Назовите типовые математические модели структуры потоков в аппаратах.
2. Что такое кривая отклика?
3. Перечислите методы определения гидродинамической структуры потоков.

4. Перечислите модели идеального вытеснения.
5. Перечислите модели идеального смешения?
6. Дать характеристику диффузионной модели?

**Структура отчета:**

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Расчетная часть.
4. Выводы. Заключение.

**Порядок выполнения практической работы:**

1. Определить среднее время пребывания  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt}$$

За верхний предел интеграла можно принять значение времени, при котором концентрация равна нулю. Например, так как концентрация при  $t > 100$  равна нулю, то в качестве верхнего предела интеграла можно принять 100.

2. Вычислить застойную зону аппарата, зная объем рабочей зоны и полный объем аппарата. Объем рабочей зоны:

$$V_{\text{раб}} = \tau \cdot w$$

3. Определить дисперсию времени пребывания  $\sigma^2$ :

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C(t)dt}{\tau^2 \int_0^{\infty} C(t)dt} - 1$$

За верхний предел интеграла можно принять значение времени, при котором концентрация равна нулю.

Дисперсия характеризует разброс данных относительно среднего значения. Чем больше дисперсия, тем сильнее проявляется продольное перемешивание жидкости. Идеальные потоки характеризуются следующими значениями: для вытеснения  $\sigma^2 = 0$ , для смешения  $\sigma^2 = 1$ .

На основе анализа литературных источников и раздаточного материала:

4. Сделать вывод.
5. Подготовить ответы на контрольные вопросы к опросу по теме работы.

## Практическая работа № 2

### «Идентификация математической модели структуры потока»

**Цель работы:** изучить основные математические модели структуры потоков присущие реальным аппаратам, основные методы определения гидродинамической структуры потоков. Проанализировать структуру потока в аппарате методом моментов.

**Задание:** Через насадочный аппарат длиной  $L = 12$  м, внутренним диаметром  $d = 0,07$  м и коэффициентом заполнения насадкой  $\phi$  протекает жидкость с объемной скоростью  $v = 0,001$  м<sup>3</sup>/с. Построить математическую модель структуры гидродинамического потока в аппарате, рассчитать моменты функции распределения и определить число ячеек  $n$  ячеечной модели. Значения времени  $t$  – общие для всех вариантов.

Таблица 1 – Исходные данные

$t, c$	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5,4	0,3	0,5	1,0	0,1	0,1	3,3	0,1	4,3	6,5
2	14	2,0	2,8	4,9	1,1	0,8	9,9	0,5	12,2	16,5
3	4	4,9	6,8	10,6	3,6	2,6	16,5	1,8	19,3	23,6
4	21,7	8,7	11,3	16,1	7,2	5,5	21,7	3,9	24,2	26,8
5	25,8	12,6	15,5	20,0	11,3	9,0	25,1	6,8	26,6	26,7
6	27,1	16,1	18,9	22,0	14,9	12,5	26,8	9,9	27,0	24,5
7	26,1	18,9	21,2	22,3	17,6	15,6	27,0	13,0	25,9	21,3
8	23,8	20,9	22,2	21,2	19,1	17,8	26,1	15,6	23,8	17,7
9	20,9	22,0	22,3	19,3	19,5	19,1	24,5	17,6	21,3	14,3
10	17,4	22,4	21,6	16,9	19,0	19,5	22,4	18,9	18,5	11,2
12	14,7	21,2	18,5	11,9	16,0	18,2	17,7	19,4	13,2	6,6
14	9,5	18,5	14,6	7,7	12,1	15,2	13,2	17,9	8,9	3,6
16	5,8	15,2	10,8	4,6	8,4	12,6	9,5	15,2	5,8	1,9
18	3,4	11,9	7,7	2,71,5	5,4	8,4	6,6	12,1	3,6	1,0
20	1,9	8,9	5,2	0,8	3,4	5,7	4,5	9,1	2,2	0,5
22	1,1	6,5	3,4	0,4	2,0	3,8	3,0	6,6	1,3	0,2
24	0,6	4,6	2,2	0,2	1,2	2,4	1,9	4,7	0,8	0,1
26	0,3	3,3	1,4	0,1	0,6	1,5	1,20,8	3,2	0,5	0
28	0,2	2,2	0,9	0	0,4	0,9	0,5	2,1	0,3	-
30	0,1	1,5	0,5	-	0,2	0,5	0,3	1,4	0,2	-
32	0	1,0	0,3	-	0,1	0,3	0,2	0,9	0,1	-
34	-	0,7	0,2	-	0	0,2	0,1	0,6	0	-
36	-	0,4	0,1	-	-	0,1	0	0,4	-	-
38	-	0,3	0	-	-	0	-	0,2	-	-
40	-	0,2	-	-	-	-	-	0,1	-	-
42	-	0,1	-	-	-	-	-	0	-	-
44	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-

### **Контрольные вопросы:**

1. Назовите основные математические модели структуры потоков присущие реальным аппаратам.
2. Объясните суть метода определения гидродинамической структуры потоков моментами.
3. Дать характеристику ячеечной модели?
- 4.

### **Структура отчета:**

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Расчетная часть.
4. Графическая часть
5. Выводы. Заключение.

### **Порядок выполнения практической работы:**

1. Построить график функции распределения времени пребывания по исходным данным
2. Выбор вида модели. Выбор математической модели можно сделать на основе анализа кривой функции распределения времени пребывания частиц в аппарате и соотношения его размеров. Исходя из соотношения размеров аппарата ( $L / d > 20$ ), можно выбрать либо модель идеального вытеснения, либо однопараметрическую диффузионную модель.
3. Идентификация параметров выбранной зависимости. Решить задачу с помощью пакета Mathcad.
4. Определить линейную скорость потока
5. Определить коэффициент продольного перемешивания  $D_x = U L / Pe$ .

Для нахождения значения критерия Пекле  $Pe$  проанализировать дифференциальную функцию распределения времени пребывания. Эта функция может быть охарактеризована ее числовыми характеристиками – моментами. Для определения моментов построенный график разбить по оси  $X$  на равные интервалы и методом прямоугольников найти площадь под кривой для каждого интервала.

Вычислить размерные моменты. Вычислить приведенные и безразмерный моменты. Зная второй безразмерный момент второго порядка, можно вычислить по приведенным выше формулам значение критерия Пекле.

6. Записать математическую модель

7. Решить модель и сделать выводы о ее адекватности.

8. Построить график расчетной функции распределения и сравнить её с экспериментальной (исходные данные).

9. На основе анализа литературных источников и раздаточного материала подготовить ответы на контрольные вопросы к опросу по теме работы.

### **Практическая работа № 3**

#### *«Моделирование противоточного теплообменника»*

**Цель работы:** изучить основные модели, используемые при моделировании теплообменных аппаратов, основные параметры математической модели теплообменных аппаратов. Приобрести навыки построения математической модели теплообменных аппаратов.

**Задание:** Определить необходимую длину противоточного теплообменника для охлаждения  $1,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  сероуглерода от температуры кипения  $46,3^\circ\text{C}$  до  $22^\circ\text{C}$ . Охлаждающая вода нагревается до  $25^\circ\text{C}$ . Диаметр внутренней трубы теплообменника  $0,075 \text{ м}$ ; расход охлаждающей воды  $0,32 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; плотность сероуглерода  $-129 \text{ кг}/\text{м}^3$ , воды  $- 998 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; теплоемкость сероуглерода  $- 0,32 \text{ ккал}/(\text{кг град})$ , воды  $- 0,999 \text{ ккал}/(\text{кг град})$ ; коэффициент теплопередачи  $- 168 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \text{ кг град})$ . Для найденной длины теплообменника исследовать стационарный режим прямоточного теплообменника. Установить, какую температуру приобретает охлаждаемый поток. Определить профили температур по длине теплообменника.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Перечислите основные тепловые процессы в химической технологии.
2. Какие гидродинамические модели структуры потоков применяются при моделировании теплообменных аппаратов?
3. Перечислите параметры математической модели теплообменных аппаратов и их размерности.
4. Каковы принципы составления уравнений тепловых балансов?
5. Перечислите управляющие параметры процесса теплообмена.
6. В чем отличие математической модели трубчатой печи от модели теплообменного аппарата?
7. На основании каких законов разрабатываются математические модели тепловых процессов?

8. Дать характеристику математической модели теплообменного аппарата типа «смешение-смешение».
9. Дать характеристику математической модели теплообменного аппарата типа «вытеснение-вытеснение».
10. Дать характеристику математической модели теплообменного аппарата типа «перемешивание-вытеснение».

**Структура отчета:**

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Основная часть.
4. Выводы. Заключение.

**Порядок выполнения практической работы:**

1. Определить необходимую длину противоточного теплообменника
2. Составить математическую модель теплообменника. Записать краевые условия.
3. Решить модель с помощью программы *MathCad* и численных методов.
4. Определить температурные профили потоков интегрированием системы уравнений при определенных начальных условиях.
5. Построить график изменения температур по длине теплообменника.
6. Сделать выводы.
7. Подготовить ответы на контрольные вопросы к опросу по теме работы.

## Практическая работа № 4

### «Моделирование массообменных аппаратов»

**Цель работы:** изучить фундаментальные законы, лежащие в основе описания массообменных процессов, основы и принципы моделирования массообменных процессов.

**Задание:** 1. Используя программу *MathCad* произвести расчет процесса адсорбции целевого компонента из паровоздушной смеси в  $i$ -ом слое адсорбента небольшой высоты. Распределение концентрации целевого компонента в паровоздушной смеси по высоте аппарата в целом находится путем повторения расчета  $H/h$  раз. Расход паровоздушной смеси  $Q=0.07$  м<sup>3</sup>/с; концентрация паровоздушной смеси на входе в аппарат  $C_{ex}=0,1$  кг/м<sup>3</sup>; начальная концентрация паровоздушной смеси межзерновом пространстве  $C_0=0,0$  кг/м<sup>3</sup>; начальная концентрация сорбируемого вещества в адсорбенте  $C_{T0}=0,0$  кг/м<sup>3</sup>; высота слоя адсорбента  $H=0,64$  м; высота  $i$ -ого слоя адсорбента  $h=0,008$  м; диаметр аппарата  $D_a=1$  м; средний диаметр частицы  $d=4*10^{-3}$  м; константа Генри  $\Gamma=400$ ; коэффициент внутренней диффузии  $D_i=3*10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с; коэффициент диффузии в паровоздушной смеси  $D_r=8,5*10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; плотность паровоздушной смеси  $\rho=1,2$  кг/м<sup>3</sup>; динамический коэффициент вязкости  $\mu=1,8*10^{-5}$  Па·с; время процесса  $t=0\dots 100$  с.

#### Контрольные вопросы:

1. Назовите основные массообменные процессы, применяющиеся в химической технологии. Какие фундаментальные законы лежат в основе описания массообменных процессов?
2. Что такое фазовое равновесие? Какие методы расчета констант фазового равновесия вы знаете?
3. Какие основные задачи решаются при моделировании равновесия «жидкость-пар»?
4. Что такое массопередача и массоотдача? Как связаны между собой коэффициенты массоотдачи и массопередачи?

5. Какие уравнения входят в математическое описание процесса ректификации?  
Что является исходными данными и результатом расчета при моделировании процесса ректификации?
6. В чем коренное отличие моделирования насадочной колонны от тарельчатой?
7. Какие численные методы, применяющиеся для решения систем нелинейных уравнений, вы знаете?
8. Какими математическими моделями описывается процесс абсорбции?
9. Какими математическими моделями описывается процесс адсорбции?

**Структура отчета:**

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Расчетная часть.
4. Выводы. Заключение.

**Порядок выполнения практической работы:**

1. Вычислить максимальное значение адсорбции.
2. Вычислить радиус частицы адсорбента.
3. Определить степень завершенности процесса.
4. Определить площадь поперечного сечения аппарата.
5. Определить фиктивную скорость парогазовой смеси.
6. Вычислить критерий Рейнольдса.
7. Вычислить коэффициент продольной диффузии.
8. Составить математическую модель, определить корни и коэффициенты.
9. Рассчитать выходную функцию
10. Графически изобразить зависимость изменения безразмерной концентрации целевого компонента в парогазовой смеси на выходе из первого слоя адсорбента.
11. Сделать выводы
12. Подготовить ответы на контрольные вопросы к опросу по теме работы.

## Рекомендуемая литература

### **а) основная литература:**

- 1) Кудинов, И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях [Электронный ресурс] : учеб. пособие / И.В. Кудинов, В.А. Кудинов, А.В. Еремин, С.В. Колесников ; под ред. Э.М. Карташова. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 208 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/56168>. — Загл. с экрана.
- 2) Прудников, В.В. Фазовые переходы и методы их компьютерного моделирования / В.В. Прудников, А.Н. Вакилов, П.В. Прудников. - Москва : Физматлит, 2009. - 224 с. - ISBN 978-5-9221-0961-1. (Режим доступа - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68374>).
- 3) Турчак, Л.И. Основы численных методов/ под ред. В.В. Щенникова / под ред. В.В. Щенникова — М.: Наука, 1987. — 318с. (Библиотека АГТУ –19 экз.).

### **б) дополнительная литература:**

- 4) Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов - Изд. 11-е, стер., дораб., перепеч. с изд. 1973 г. - М.: Альянс, 2005. — 750с. (Библиотека АГТУ – 23 экз.).
- 5) Вобликова, Т.В. Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие / Т.В. Вобликова, С.Н. Шлыков, А.В. Пермяков ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2013. - 212 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9596-0958-0 ; То же [Электронный ресурс]. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277522>
- 6) Остриков, А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : ГИОРД, 2012. — 616 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/4887>.

**в) ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

- 7) Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>).
- 8) Российская государственная библиотека. URL: <http://www.rsl.ru/>.

**г) методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля):**

- 9) Максименко Ю.А. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов / Методические указания. Кафедра Технологические машины и оборудование, 2017г. Протокол № 5 от «25» 05 2017г. (Образовательный портал: <http://portal.astu.org>).