

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

Кафедра инженерной химии и промышленной экологии

Тепломассообменные процессы в промышленной экологии

Методические указания к самостоятельному изучению дисциплины,
выполнению контрольной работы и курсового проекта для студентов
бакалавриата заочной формы обучения по направлению подготовки
20.03.01 – Техносферная безопасность

Составитель
В. Д. Шаханов

Санкт-Петербург
2017

Утверждено
на заседании кафедры
02.02.2017 г.,
протокол № 5

Рецензент
С. В. Буринский

В методических указаниях отражено содержание дисциплины «Тепло-массообменные процессы в промышленной экологии» в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом и излагаются требования к контрольной работе и курсовому проекту для студентов бакалавриата, обучающихся по заочной форме направления 20.03.01 – Техносферная безопасность. Определена тематика курсового проекта, приведено примерное содержание разделов курсового проекта, рекомендации по оформлению в соответствии с действующими стандартами.

Учебное электронное издание сетевого распространения
Издано в авторской редакции

Системные требования:

электронное устройство с программным обеспечением для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2017_____, по паролю. – Загл. с экрана.
Дата подписания к использованию __.__.2017 г. Рег. № _____

ФГБОУВО «СПбГУПТД»

Юридический и почтовый адрес: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.
<http://sutd.ru>

В установках по защите окружающей среды используются тепловые и массообменные процессы. Примером таких процессов являются адсорбция, абсорбция и сопровождающие их процессы нагревания, охлаждения, конденсации и др.

Во многих случаях процессы, изучаемые в дисциплине «Тепломассообменные процессы в промышленной экологии», определяют эффективность очистки сточных вод, выбросов и утилизации твердых отходов.

1. Содержание дисциплины

Учебный модуль 1. Гидродинамические процессы

Тема 1. Введение в дисциплину. Свойства жидкости. Основы гидростатики.

Тема 2. Основные уравнения движения жидкости и газа. Физическое моделирование.

Учебный модуль 2. Основы теплопередачи

Тема 3. Теплопроводность. Закон Фурье. Теплопроводность однослойной и многослойной плоских стенок. Система уравнений конвективного теплообмена. Критериальные уравнения конвективного теплообмена.

Тема 4. Теплоотдача без изменения агрегатного состояния в условиях вынужденной конвекции и движения теплоносителя в прямых трубах и каналах, продольном обтекании труб теплоносителя и поперечном обтекании труб теплоносителем.

Тема 5. Теплопередача при постоянных температурах теплоносителей. Теплопередача при переменных температурах теплоносителей. Основное уравнение теплопередачи. Основные схемы движения теплоносителей. Определение средней разности температур, средних температур теплоносителей и температур стенок. Расчет теплообменных аппаратов.

Учебный модуль 3. Выпаривание

Тема 5. Общие сведения. Основные закономерности. Однокорпусные выпарные установки. Температурная депрессия и температура кипения раствора.

Тема 6. Многокорпусные выпарные установки. Общая полезная разность и её распределение по корпусам. Предел числа корпусов установки. Расчет многокорпусных выпарных установок. Устройство выпарных аппаратов: змеевикового, с выносной циркуляционной трубой, с выносной нагревательной камерой, с вынесенной нагревательной камерой, с вынесенной зоной кипения, с принудительной циркуляцией, пленочного с поднимающейся пленкой.

Учебный модуль 4. Массообменные процессы

Тема 7. Общие сведения. Равновесия при массопередаче. Материальный баланс. Уравнение линии рабочих концентраций. Скорость массопередачи. Молекулярная диффузия. Уравнение массоотдачи. Уравнение массопе-

редачи. Зависимость между коэффициентами массоотдачи и массопередачи. Движущая сила массопередачи. Средняя движущая сила и число единиц переноса. Расчет рабочей высоты массообменных аппаратов.

Тема 8. Абсорбция. Общие сведения. Материальный баланс и расход поглотителя. Устройство абсорбционных аппаратов: трубчатого, насадочного, тарельчатого со сливными устройствами. Простая перегонка: фракционная, с дефлегмацией, с водяным паром.

Тема 9. Ректификация. Общие сведения, схемы периодической и непрерывной ректификации. Материальный баланс непрерывной ректификации бинарных смесей. Уравнения рабочих линий непрерывной ректификации бинарных смесей. Построение рабочих линий на y - x диаграмме. Тепловой баланс ректификационной колонны непрерывного действия.

Тема 10. Сушка. Общие сведения. Виды сушки. Способы выражения влажности материала. Материальный баланс по высушенному материалу. Параметры влажного воздуха. Y - x диаграмма. Построение на y - x диаграмме процессов сушки воздухом. Тепловой расчет конвективной сушки. Сушилки: туннельная, ленточная, двухвальцовая, однокамерная с кипящим слоем, распылительная, пневматическая.

Тема 11. Экстракция в системах жидкость-жидкость. Общие сведения. Равновесие в системах жидкость-жидкость. Схема однокамерной экстракции на треугольной диаграмме. Устройство экстракционных аппаратов: распылительного, ситчатого колонного, пульсационного, центробежного.

2. Перечень вопросов к экзамену по тепломассообменным процессам в промышленной экологии

1. Теплопроводность однослойной плоской стенки (вывод).
2. Теплопроводность многослойной плоской стенки (вывод).
3. Теплопроводность однослойной цилиндрической стенки (вывод).
4. Теплопроводность многослойной цилиндрической стенки (вывод).
5. Конвективный теплообмен. Закон охлаждения Ньютона. Размерность и физический смысл коэффициента теплоотдачи.
6. Критериальные уравнения конвективного теплообмена.
7. Теплоотдача при кипении жидкости.
8. Теплоотдача при конденсации пара.
9. Теплоотдача без изменения агрегатного состояния теплоносителя в условиях вынужденной конвекции в прямых трубах и каналах.
10. Теплоотдача без изменения агрегатного состояния теплоносителя в условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании труб теплоносителя.
11. Теплопередача при постоянных температурах теплоносителей (вывод). Размерность и физический смысл коэффициента теплопередачи.
12. Зависимость между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи (вывод).
13. Определение средней разности температур теплоносителей, средних

- температур теплоносителей и температур стенок.
14. Тепловой расчет теплообменников. Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.
 15. Тепловой расчет теплообменников. Предварительный расчет поверхности теплообмена.
 16. Устройство и принцип действия многоходового кожухотрубчатого теплообменника.
 17. Устройство и принцип действия кожухотрубчатого теплообменника с плавающей головкой.
 18. Устройство и принцип действия спирального теплообменника.
 19. Однокорпусные выпарные установки. Материальный баланс выпаривания.
 20. Однокорпусные выпарные установки. Тепловой баланс. Расчет расхода греющего пара.
 21. Многокорпусная выпарная установка с параллельным питанием корпусов.
 22. Многокорпусная прямоточная выпарная установка.
 23. Многокорпусная противоточная выпарная установка.
 24. Общая полезная разность температур и её распределение при условии равенства поверхностей нагрева корпусов (вывод).
 25. Распределение общей полезной разности температур при условии суммарной минимальной поверхности нагрева корпусов.
 26. Устройство и принцип действия выпарного аппарата с выносной циркуляционной трубой.
 27. Устройство и принцип действия выпарного аппарата с выносной нагревательной камерой.
 28. Устройство и принцип действия выпарного аппарата с принудительной циркуляцией.
 29. Устройство и принцип действия выпарного аппарата с поднимающейся пленкой.
 30. Уравнение линии рабочих концентраций (вывод).
 31. Скорость массопередачи. Молекулярная диффузия. Физический смысл и размерность коэффициента диффузии.
 32. Уравнение массоотдачи. Физический смысл и размерность коэффициента массоотдачи.
 33. Уравнение массопередачи. Физический смысл и размерность коэффициента массопередачи.
 34. Средняя движущая сила и число единиц переноса. Определение числа единиц переноса.
 35. Расчет рабочей высоты массообменных процессов.
 36. Абсорбция. Материальный баланс и расход поглотителя.
 37. Устройство и принцип действия трубчатого абсорбера.
 38. Устройство и принцип действия насадочного абсорбера.
 39. Устройство и принцип действия абсорбера с колпачковыми тарелками.
 40. Схема непрерывной ректификации.

41. Материальный баланс непрерывной ректификации бинарных смесей.
42. Уравнение рабочей линии верхней (укрепляющей) части колонны (вывод).
43. Уравнение рабочей линии нижней (исчерпывающей) части колонны (вывод).
44. Построение рабочих линий на y - x диаграмме.
45. Сушка. Способы выражения влажности материала. Материальный баланс по высушиваемому материалу.
46. I - x диаграмма.
47. Построение на I - x диаграмме процессов сушки воздухом.

3. Методические рекомендации к решению контрольных задач

Контрольная работа охватывает раздел теплопередачи. *Теплопередача* – это сложный процесс переноса теплоты от горячего теплоносителя к более холодному через разделяющую твердую стенку. Перенос теплоты от горячего теплоносителя к стенке происходит в результате конвективной теплоотдачи. Через стенку теплота переносится теплопроводностью, а от стенки к холодному теплоносителю также конвективной теплоотдачей.

Приступая к решению, следует выписать все исходные данные задачи, выбрать и записать расчетные уравнения. Подставив в расчетные уравнения числовые значения, проверить правильность подстановки и соответствие единиц измерения системе СИ.

Необходимые для решения задач физические свойства теплоносителей приведены в приложениях учебных пособий [3], [6]. Кроме того, ряд физических свойств можно рассчитать по формулам, приведенным в разделе 1 учебного пособия [6].

Физические свойства жидких теплоносителей (плотность, динамическая вязкость и др.) выбираются по средней температуре. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления находят в табл. LI [3] или прил. 23 [6].

В контрольной работе предлагается решить 5 задач, исходные данные к которым приведены ниже. Выбор варианта задания (от 00 до 20) производится по двум последним цифрам номера зачетной книжки (студенческого билета). Если число, составленное из последних цифр номера зачетной книжки более 20, то из него следует n раз ($n = 1, 2, 3$ или 4) вычесть 20, чтобы попасть в заданный диапазон. Например, если две последние цифры составляют число 78, то следует выполнять 18 вариант ($78 - 3 \cdot 20 = 18$).

Задача 1. Определить расход насыщенного водяного пара на нагревание воды.

Таблица 1. Исходные данные к задаче 1

| Последние две цифры шифра зачетной книжки | Расход воды, м ³ /ч | Температура, С | | Абсолютное давление водяного пара, кПа |
|---|--------------------------------|----------------|----------|--|
| | | начальная | конечная | |
| 00 | 110 | 2 | 49 | 340 |
| 01 | 40 | 15 | 69 | 190 |
| 02 | 86 | 7 | 56 | 310 |
| 03 | 100 | 24 | 79 | 250 |
| 04 | 54 | 51 | 80 | 290 |
| 05 | 92 | 44 | 98 | 220 |
| 06 | 80 | 34 | 86 | 320 |
| 07 | 130 | 21 | 58 | 170 |
| 08 | 46 | 38/ | 84 | 280 |
| 09 | 65 | 25 | 64 | 230 |
| 10 | 90 | 39 | 71 | 300 |
| 11 | 140 | 32 | 76 | 160 |
| 12 | 68 | 19 | 53 | 210 |
| 13 | 170 | 4 | 56 | 270 |
| 14 | 154 | 47 | 67 | 180 |
| 15 | 50 | 9 | 84 | 320 |
| 16 | 160 | 18 | 92 | 240 |
| 17 | 120 | 40 | 64 | 200 |
| 18 | 99 | 28 | 89 | 290 |
| 19 | 115 | 11 | 77 | 330 |
| 20 | 75 | 17 | 68 | 260 |

Тепловую нагрузку Q находят по уравнениям (2.2)–(2.4) раздела 2 учебного пособия [6].

Задача 2. Определить конечную температуру воды, нагреваемую насыщенным водяным паром.

Таблица 2. Исходные данные к задаче 2

| Последние две цифры шифра зачетной книжки | Расход воды, м ³ /ч | Начальная температура воды, С | Насыщенный водяной пар | |
|---|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------|
| | | | абсолютное давление, кПа | расход пара, т/ч |
| 00 | 66 | 4 | 320 | 8,0 |
| 01 | 30 | 20 | 170 | 1,8 |
| 02 | 85 | 34 | 300 | 9,2 |
| 03 | 54 | 15 | 250 | 5,4 |
| 04 | 25 | 22 | 180 | 2,9 |
| 05 | 76 | 10 | 290 | 8,8 |
| 06 | 44 | 30 | 310 | 5,5 |
| 07 | 92 | 8 | 220 | 6,7 |
| 08 | 36 | 18 | 190 | 4,1 |
| 09 | 49 | 25 | 270 | 6,1 |

| Последние две цифры шифра зачетной книжки | Расход воды, м ³ /ч | Начальная температура воды, С | Насыщенный водяной пар | |
|---|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------|
| | | | абсолютное давление, кПа | расход пара, т/ч |
| 10 | 28 | 5 | 150 | 2,9 |
| 11 | 25 | 12 | 190 | 3,1 |
| 12 | 44 | 23 | 260 | 3,9 |
| 13 | 58 | 14 | 230 | 8,1 |
| 14 | 61 | 34 | 160 | 5,1 |
| 15 | 31 | 10 | 280 | 5,0 |
| 16 | 50 | 26 | 200 | 3,0 |
| 17 | 73 | 18 | 170 | 8,8 |
| 18 | 80 | 25 | 320 | 11,2 |
| 19 | 39 | 28 | 240 | 4,7 |
| 20 | 64 | 9 | 210 | 9,0 |

Тепловую нагрузку Q находят по уравнениям (2.2)–(2.4) раздела 2 учебного пособия [6].

Задача 3. Рассчитать температуру холодной поверхности стенки.

Таблица 3. Исходные данные к задаче 3

| Последние две цифры шифра зачетной книжки | Температура поверхности горячей стенки | Плотность теплового потока, q , кВт/м ² | Материал стенки | Толщина стенки, мм |
|---|--|--|-----------------|--------------------|
| 00 | 128 | 55 | сталь | 25 |
| 01 | 86 | 25 | свинец | 26 |
| 02 | 154 | 15 | сталь | 18 |
| 03 | 119 | 10 | медь | 12 |
| 04 | 187 | 75 | алюминий | 23 |
| 05 | 55 | 50 | латунь | 12 |
| 06 | 140 | 10 | сталь | 25 |
| 807 | 213 | 90 | алюминий | 16 |
| 08 | 135 | 54 | латунь | 8 |
| 09 | 68 | 48 | сталь | 24 |
| 10 | 92 | 33 | свинец | 14 |
| 11 | 110 | 69 | сталь | 10 |
| 12 | 146 | 85 | алюминий | 24 |
| 13 | 168 | 52 | свинец | 6 |
| 14 | 122 | 39 | латунь | 19 |
| 15 | 191 | 21 | свинец | 23 |
| 16 | 174 | 18 | сталь | 18 |
| 17 | 115 | 38 | медь | 30 |
| 18 | 180 | 51 | алюминий | 16 |
| 19 | 158 | 64 | медь | 12 |
| 20 | 139 | 44 | латунь | 25 |

Уравнение теплопроводности – уравнение (3.7) учебного пособия [3], коэффициенты теплопроводности – в табл. XXIII [3] или в прил. 17 [6].

Задача 4. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от стенки к воде и плотность теплового потока.

Т а б л и ц а 4. Исходные данные к задаче 4

| Последние две цифры шифра зачетной книжки | Расход воды, м ³ /ч | Температура воды, °С | | Температура поверхности стенки со стороны воды, °С | Внутренний диаметр трубы, мм | Число труб |
|---|--------------------------------|----------------------|----------|--|------------------------------|------------|
| | | начальная | конечная | | | |
| 00 | 150 | 15 | 72 | 59 | 21 | 110 |
| 01 | 90 | 20 | 80 | 85 | 34 | 37 |
| 02 | 240 | 42 | 79 | 76 | 21 | 111 |
| 03 | 130 | 26 | 52 | 58 | 16 | 119 |
| 04 | 100 | 31 | 68 | 75 | 21 | 55 |
| 06 | 210 | 16 | 59 | 66 | 21 | 111 |
| 07 | 300 | 40 | 96 | 103 | 34 | 64 |
| 08 | 120 | 34 | 87 | 96 | 21 | 62 |
| 09 | 180 | 46 | 91 | 110 | 34 | 37 |
| 10 | 160 | 5 | 59 | 58 | 16 | 160 |
| 11 | 70 | 36 | 78 | 88 | 21 | 37 |
| 12 | 260 | 18 | 52 | 63 | 34 | 55 |
| 13 | 310 | 27 | 70 | 78 | 16 | 260 |
| 14 | 110 | 33 | 93 | 85 | 34 | 74 |
| 15 | 220 | 10 | 79 | 68 | 16 | 86 |
| 16 | 80 | 18 | 86 | 72 | 21 | 120 |
| 17 | 140 | 25 | 90 | 60 | 34 | 52 |
| 18 | 270 | 2 | 53 | 44 | 16 | 48 |
| 19 | 160 | 28 | 77 | 84 | 21 | 130 |
| 20 | 230 | 35 | 84 | 72 | 21 | 34 |

Коэффициент теплоотдачи определяется из критерия Нуссельта Nu , который при движении теплоносителей рассчитывается в прямых трубах в зависимости от режима течения теплоносителя по формулам (3.15), (3.18) и *рис. 3.1* учебного пособия [3] или (2.15), (2.18), (2.19) пособия [6].

Критерий Прандтля $Pr_{ст}$ оценивается при температуре стенки со стороны воды.

Задача 5. Рассчитать поверхность теплопередачи по исходным данным примера 1. Коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м² К), при конденсации водяного пара к стенке $\alpha_1 = 10000$, а от стенки к воде $\alpha_2 = 1500$.

Поверхность теплопередачи определяется из уравнения теплопередачи по формулам (3.5) пособия [3] и (2.1) пособия [6]. Средняя разность температур $\Delta t_{ср}$ определяется по формулам (2.7), (2.8) и *рис. 2.1* пособия [6]. Крите-

рии теплового и гидродинамического подобия приведены на стр. 142 [3] в формулах (2.11)–(2.14) пособия [6].

Коэффициент теплопередачи рассчитывается по формулам (3.53) [3] или (2.9) [6], средние значения теплопроводности загрязнений стенок для различных теплоносителей приведены в табл. XXVI [3].

3. Курсовое проектирование

Выполнение и защита курсового проекта является формой промежуточной аттестации по дисциплине «Тепломассообменные процессы в промышленной экологии».

Главной целью курсового проектирования является привитие студентам навыков самостоятельной работы по решению комплексной инженерной задачи, а также по составлению технической документации. Эти навыки необходимы в предстоящей практической деятельности по специальности.

Основной задачей курсового проектирования является углубление и закрепление знаний по теоретической части и в лабораторном практикуме дисциплины «Тепломассообменные процессы в промышленной экологии» и более глубокому осмыслению сведений, полученных на учебных практиках.

Темой курсового проектирования является проект промышленной выпарной установки. Для одного из аппаратов установки выполняется тепловой или технологический расчет и выбирается стандартный аппарат.

Курсовой проект состоит из расчётно-пояснительной записки объёмом ≈ 20 страниц и графической части – чертежа аппарата.

Расчётно-пояснительная записка должна включать следующие составляющие:

- титульный лист;
- задание на проектирование;
- содержание;
- введение;
- расчет аппарата;
- заключение;
- список использованных источников.

Графическая часть – чертеж аппарата с необходимыми видами, разрезами и сечениями, поясняющими устройство аппарата. Чертеж выполняется на листе формата А1 (594×840 мм).

Правила оформления расчётно-пояснительной записки и графической части приведены в пособии [6].

Вариант исходных данных для курсового проекта определяется по последней цифре в зачетной книжке (таблица 5).

Таблица 5. Исходные данные для расчета аппарата

| Вариант | Аппарат | Раствор | Расход раствора, т/ч | Концентрация вещества, % мас. | | Абсолютное давление, кПа | |
|---------|---|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------|--------------------------|----------------|
| | | | | начальная | конечная | греющего пара | в конденсаторе |
| 0 | Выпарной аппарат с выносной греющей камерой | NaCl | 22 | 3,8 | 24 | 430 | 24 |
| 1 | Подогреватель исходной смеси | Na ₂ SO ₄ | 50 | 8,4 | 21 | 350 | 19 |
| 2 | Пленочный выпарной аппарат | NaOH | 39 | 4,5 | 20 | 400 | 20 |
| 3 | Выпарной аппарат с выносной греющей камерой | CaCl ₂ | 28 | 9,2 | 17 | 310 | 18 |
| 4 | Подогреватель исходной смеси | Na ₂ CO ₃ | 45 | 7,0 | 23 | 370 | 21 |
| 5 | Выпарной аппарат с выносной циркуляционной трубой | MgCl ₂ | 29 | 3,9 | 19 | 410 | 19 |
| 6 | Пленочный выпарной аппарат | KNO ₃ | 36 | 5,6 | 17 | 320 | 20 |
| 7 | Подогреватель исходной смеси | KOH | 37 | 10,5 | 25 | 360 | 21 |
| 8 | Выпарной аппарат с выносной циркуляционной трубой | CuSO ₄ | 20 | 4,9 | 22 | 340 | 22 |
| 9 | Подогреватель исходной смеси | NH ₄ Cl | 43 | 3,2 | 16 | 390 | 23 |

Расчет выпарного аппарата

Цель теплового расчета выпарного аппарата – определение поверхности теплообмена греющей камеры. Греющая камера представляет собой одноканальную кожухотрубчатый теплообменник, последовательность расчета которого приведена в пособии [6].

Расчет подогревателя исходной смеси

Тепловой расчет подогревателя заключается в определении площади поверхности теплопередачи. Вначале необходимо определить конечную температуру нагреваемого раствора, равную температуре кипения раствора в выпарном аппарате. Расчет температуры кипения и последовательность расчета теплообменного аппарата приведены в пособии [6].

Общие сведения. Процесс выпаривания широко применяется для концентрирования различных технологических растворов.

Так, например, в производстве вязких волокон и пленки выпариванию подвергается отработанная осадительная ванна, которая в процессе формирования волокна разбавляется водой. При отделке хлопчатобумажных

тканей и нитей (мерсеризации) образуется разбавленный водный раствор щелочи. Для удаления избытка воды раствор выпаривают.

В промышленности применяются однокорпусные и многокорпусные выпарные установки непрерывного действия, работающие под вакуумом. Технологические схемы этих установок, а также устройство и принцип действия выпарных аппаратов различных конструкций приводятся в литературе [7].

Процесс выпаривания относится к тепловым процессам. Поэтому основной задачей проектного расчета является определение поверхности теплообмена греющей камеры. При проверочном расчете определяется производительность установки по выпаренной воде при заданной поверхности теплообмена.

После расчета коэффициента теплопередачи и поверхности теплообмена греющей камеры производят окончательный выбор стандартного выпарного аппарата.

Расчет однокорпусной выпарной установки

Количество выпаренной воды, кг/с:

$$W = G \left(1 - \frac{x_H}{x_K} \right), \quad (1)$$

где G – производительность аппарата по исходному раствору, кг/с; x_H, x_K – концентрация растворенного вещества в растворе на входе и выходе из аппарата, мас. доли. По давлению греющего пара p_1 и давлению в конденсаторе p_K определяют соответствующие температуры T и T_K . Температура вторичного пара T' в корпусе аппарата больше T_K на величину гидравлической депрессии Δ''' :

$$T' = T_K + \Delta''' . \quad (2)$$

В среднем величина Δ''' принимается равной 1.

Далее по T' определяют давление $p_{вт}$ и теплоту парообразования $r_{вт}$ вторичного пара. Тепловая нагрузка выпарного аппарата, Вт,

$$Q = W \cdot r + Q_{конц} + Q_n, \quad (3)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; $Q_{конц}$ – теплота концентрирования, Вт; Q_n – потери теплоты в окружающую среду, Вт. Если раствор в выпарной аппарат поступает с температурой ниже, чем температура кипения, то необходимо учесть расход теплоты на нагревание раствора. Для дальнейшего выполнения расчета требуются некоторые размеры аппарата – высота и диаметр трубок, их количество. Поэтому необходимо выбрать стандартный выпарной аппарат [7] по ориентировочно определенной поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{пол}}, \quad (4)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\Delta t_{пол}$ – полезная разность температур.

В ориентировочном расчете поверхности теплообмена для K_{min} и $\Delta t_{пол}$ применяют приближенные значения. Значения коэффициентов теплопередачи приводятся в [6, табл. 2.1], а полезная разность температур принимается равной разности температур греющего T и вторичного T' пара.

Температурная депрессия Δ' равна разности температур кипения раствора и чистого растворителя и зависит от природы и концентрации растворенного вещества.

Температуры кипения растворов при атмосферном давлении приведены в литературе [3]. Температурную депрессию $\Delta'_{атм}$, определенную при атмосферном давлении, по формуле И. А. Тищенко пересчитывают для давления в аппарате:

$$\Delta' = 1,62 \cdot 10^{-2} \frac{T_г^2}{r} \Delta'_{атм}, \quad (5)$$

где $T_г$ – температура кипения чистого растворителя при давлении в аппарате, К; r – теплота испарения растворителя при давлении в аппарате кДж/кг.

Гидростатическая депрессия Δ'' рассчитывается для выпарных аппаратов с кипением раствора в кипятильных трубках или трубе вскипания. Давление в среднем слое определяется по формуле

$$P_{cp} = P_{вм} + \frac{\rho \cdot g \cdot H(1 - \varepsilon)}{2}, \quad (6)$$

где ρ – плотность раствора при температуре кипения кг/м³; H – высота трубок кипятильника и трубы вскипания, м; ε – степень парозаполнения труб ($\varepsilon = 0,4 \div 0,6$).

По давлению p_{cp} определяют температуру в среднем слое t_{cp} .

Гидростатическая депрессия

$$\Delta'' = t_{cp} - T'. \quad (7)$$

Для выпарных аппаратов пленочного типа гидростатическая депрессия принимается равной нулю.

Плотность раствора определяется по средней концентрации:

$$x_{cp} = \frac{x_n + x_k}{2}. \quad (8)$$

Температуру кипения раствора с учетом температурной и гидростатической депрессии находят следующим образом

$$t = T' + \Delta' + \Delta''. \quad (9)$$

Полезная разность температур

$$t_{пол} = T - t. \quad (10)$$

Тепловой расчет выпарного аппарата заключается в определении площади поверхности теплообмена греющей камеры. Конструктивно греющая камера представляет собой одноходовой кожухотрубчатый теплообменник. Последовательность расчета приведена в [6, разд. 2].

Коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара рассчитывают по формуле

$$\alpha = 1,15 \cdot 4 \sqrt{\frac{\lambda^3 \rho^2 r g}{\mu \Delta t H}}.$$

Коэффициент теплоотдачи для кипения жидкости в зависимости от условий проведения процесса определяют следующим образом:

а) при кипении жидкости в трубах – по формуле

$$\alpha = 1,7 \cdot 10^7 \left(\frac{\lambda^{1,3} \rho^{0,5} \rho_{\text{п}}^{0,06}}{\sigma^{0,5} r^{0,6} \rho_0^{0,66} c^{0,3} \mu^{0,3}} \right)^{2,5} \Delta t^{1,5},$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К); ρ – плотность жидкости, кг/м³; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пара при давлении над поверхностью жидкости, кг/м³; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ_0 – плотность пара при атмосферном давлении и температуре кипения, кг/м³; c – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

б) для аппаратов с вынесенной зоной кипения – по формулам для расчета коэффициентов теплоотдачи при движении в трубах и каналах [6, уравнения (2.15), (2.17)–(2.21)];

в) для пленочных аппаратов

$$\alpha = R \frac{\lambda}{\delta} (0,25 \cdot \text{Re})^N \left(\frac{q \delta}{\lambda T'} \right)^M, \quad \text{Re} = \frac{4\Gamma}{\mu}, \quad (11)$$

$$\delta = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} \text{Re}^{1/3}, \quad \Gamma = \frac{G}{\Pi}, \quad \Pi = \pi d n, \quad (12)$$

где R, N, M – коэффициенты уравнения (при $q < 20000$ Вт/м² $R = 163,5$; $N = 0,264$; $M = 0,685$; при $q > 20000$ Вт/м² $R = 2, 6$; $N = 0,203$; $M = 0,322$); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); v – кинематическая вязкость, м²/с; δ – толщина пленки, м; Re – критерий Рейнольдса; q – удельная тепловая нагрузка, Вт/м²; μ – динамическая вязкость, Па·с; Γ – линейная массовая плотность орошения, кг/м·с; G – массовый расход выпариваемого раствора, кг/с; Π – смоченный периметр, м; d – внутренний диаметр трубы, м; n – количество труб; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Расчет многокорпусной выпарной установки

Основной целью теплового расчета выпарной установки является определение поверхности нагрева корпусов при заданных условиях теплового режима.

В основе расчета многокорпусной выпарной установки лежит метод последовательных приближений.

Общее количество выпаренной воды рассчитывают по формуле (1).

В предварительном расчете количество воды распределяют по корпусам поровну $W_i = \frac{W}{n}$ (n – число корпусов).

Концентрации на выходе из корпусов рассчитывают по формулам:

$$X_1 = \frac{GX_n}{G - W_1}, \quad (13)$$

$$X_n = X_k = \frac{GX_n}{G - W_1 - W_1 - \dots - W_n}. \quad (14)$$

Перепад давлений в одном корпусе

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_k}{n}, \quad (15)$$

где P_1 и P_k – давление греющего пара в первом корпусе и давление в барометрическом конденсаторе.

Затем определяют давление вторичного пара по корпусам

$$P_{вт1} = P_1 - \Delta P, \quad P_{вт2} = P_{вт1} - \Delta P \quad (16)$$

и т. д.

По давлению находят температуры вторичного пара по корпусам, а также температуры греющего пара в первом корпусе T_1 и пара в конденсаторе T_k .

Температурные потери находят так же, как для однокорпусной выпарной установки.

Общую полезную разность температур рассчитывают по формуле

$$\sum t_{пол} = T_1 - T_k - \sum \Delta, \quad (17)$$

где $\sum \Delta$ – сумма температурных потерь для всех корпусов, °С.

Тепловые нагрузки по корпусам определяют по формуле

$$Q_i = W_i r_i + Q_{конц} + Q_n, \quad (18)$$

где r_i – теплота парообразования Дж/кг; $Q_{конц}$ – теплота концентрирования; Q_n – потери теплоты в окружающую среду.

Общую полезную разность температур распределяют исходя из равенства поверхностей нагрева корпусов:

$$\Delta t_i = \frac{\frac{Q_i}{K_i} \sum \Delta t_{пол}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{K_i}} \quad (19)$$

или при условии минимальной поверхности

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{\frac{Q_i}{K_i}} \cdot \sum \Delta t_{пол}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{Q_i}{K_i}}}, \quad (20)$$

где K_i – коэффициент теплопередачи для i -го корпуса, Вт/(м²·К).

В предварительном расчете принимают ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи по корпусам. Для трехкорпусной установки соотношение коэффициентов теплопередачи может быть принято равным $K_1:K_2:K_3 = 1:0,58:0,34$. Значения K_i приведены в [6, табл. 2.1].

Затем определяют температурный режим процесса: температуры греющего пара и кипения раствора по корпусам.

Таблица 6. Температурный режим процесса выпаривания

| Корпус | Температура греющего пара $T_i, \text{ }^\circ\text{C}$ | Температура кипения раствора $t_i, \text{ }^\circ\text{C}$ | Температура вторичного пара $T_i', \text{ }^\circ\text{C}$ |
|-------------|--|---|---|
| 1 | T_1 | $t_1 = T_1 - \Delta t_{пол 1}$ | $T_1' = t_1 - \Delta_1' - \Delta_1''$ |
| 2 | $T_2 = T_1' - \Delta'''_{1-2}$ | $t_2 = T_2 - \Delta t_{пол 2}$ | $T_2' = t_2 - \Delta_2' - \Delta_2''$ |
| i | $T_i = T_{i-1}' - \Delta'''_{(i-1)-i}$ | $t_i = T_i - \Delta t_{пол i}$ | $T_i' = t_i - \Delta_i' - \Delta_i''$ |
| Конденсатор | $T_k = T_n' - \Delta'''_{n-k}$ | | |

По этим температурам находят энтальпию и фактическое давление греющего и вторичного пара в корпусах.

Расчет фактического количества выпаренной воды в корпусе производят по уравнениям

$$W_i = D_i \alpha_i + (G - W_1 - W_2 - \dots - W_{i-1}) \beta_i. \quad (21)$$

$$\alpha_i = \frac{I_i - c_i \theta_i}{I_i' - c_k t_{ki}}, \quad \beta_i = \frac{c_i (t_{k,(i-1)} - t_{ki})}{I_i' - c_k t_{ki}}, \quad (22)$$

где D_i – расход греющего пара в i -корпусе, кг/с; α_i – коэффициент испарения; β_i – коэффициент самоиспарения; I_i, I_i' – энтальпия греющего и вторичного пара, Дж/кг; c_i' – теплоемкость конденсата, Дж/(кг·К); θ_i – температура конденсации; c_i – теплоемкость раствора, Дж/(кг·К); c_k – теплоемкость воды при температуре кипения, Дж/(кг·К).

Расход пара в любом корпусе, кроме первого

$$D_{i+1} = W_i. \quad (23)$$

Если рассчитанные значения W_i отличаются от принятых в первом приближении не более чем на пять процентов, то определяют поверхности нагрева по корпусам

$$F_i = \frac{Q_i}{K_i \cdot \Delta t_{пол,i}}, \quad (24)$$

в противном случае расчет повторяют, начиная с определения концентраций на выходе из корпусов по уточненным значениям W_i .

Литература

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков – М.: Альянс, 2006.
3. Романков, П. Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. – СПб.: Химиздат, 2009.
4. Багров, И. В. Процессы и аппараты химической технологии: лаб. практикум / И. В. Багров, В. Д. Шаханов, Э. Н. Чулкова. – СПб.: СПГУТД, 2013. – Режим доступа http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=1136, по паролю.
5. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник / под ред. В. Г. Айнштейна. – М.: Логос, 2006.
6. Багров, И. В. Курсовое проектирование по дисциплинам «Процессы и аппараты химических производств»: учеб. пособие / И. В. Багров, В. Д. Шаханов, Э. Н. Чулкова. – СПб.: СПГУТД, 2012.
7. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

Приложение

Пример оформления титульного листа курсового проекта

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**"Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна"**

Институт _____ *прикладной химии и экологии* _____

Направление _____ *20.03.01 – Техносферная безопасность* _____

Кафедра _____ *инженерной химии и промышленной экологии* _____

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ
(пояснительная записка)

по дисциплине

«Тепломассообменные процессы в промышленной экологии»

на тему «Выпарная установка»

Исполнитель – студент уч. группы _____
(группа)

(фамилия, имя, отчество, подпись)

Руководитель курсового проекта _____

(ученая степень, звание, фамилия, имя, отчество, подпись)

Оценка _____

Санкт-Петербург
201__