

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

Кафедра инженерной химии и промышленной экологии

Процессы и аппараты химической технологии

Методические указания к самостоятельному изучению дисциплины
и выполнению курсовой работы для студентов бакалавриата
заочной формы обучения
по направлению подготовки 18.03.01 – Химическая технология

Составитель
С. В. Петров

Санкт-Петербург
2023

Утверждено
на заседании кафедры
30.05.2023 г.,
протокол № 8

Рецензент
Л. М. Штягина

В методических указаниях отражено содержание дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом и излагаются требования к курсовой работе для студентов бакалавриата, обучающихся по заочной форме направления 18.03.01 – Химическая технология. Определена тематика курсовой работы, приведено примерное содержание её разделов, 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=2023_____, по паролю. – Загл. с экрана.
Дата подписания к использованию «_____.2023 г. Рег. № _____.23.

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

В установках химической технологии используются механические 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, определяют эффективность химических производств.

1. Содержание дисциплины

Раздел 1. Гидравлика

Тема 1. Введение. Предмет дисциплины и его задачи. Классификация процессов химической технологии.

Тема 2. Основы теории переноса. Жидкость. Определение. Свойства жидкости.

Тема 3. Гидростатика. Гидростатическое давление. Основное уравнение гидростатики.

Тема 4. Уравнения движения жидкости.

Тема 5. Физическое моделирование химико-технологических процессов

Раздел 2. Гидравлические процессы

Тема 6. Течение жидкости через зернистый слой. Гидродинамика взвешенного слоя.

Тема 7. Классификация насосов. Основные параметры работы. Устройство и принцип действия центробежного и объемных насосов.

Тема 8. Сжатие и перемещение газов. Основные закономерности сжатия газов. Устройство и принцип действия

Раздел 3. Гидромеханические процессы

Тема 9. Классификация неоднородных систем и способы их разделения. Процесс отстаивания. Конструкции отстойников.

Тема 10. Процесс фильтрования. Конструкции фильтров.

Тема 11. Процесс центрифугирования. Конструкции центрифуг.

Тема 12. Очистка газов от твёрдых и жидких частиц. Конструкции пылеуловителей.

Тема 13. Перемешивание. Мощность, потребляемая мешалкой. Конструкции мешалок.

Раздел 4. Основы теплопередачи

Тема 14. Основные понятия. Способы переноса теплоты. Теплопроводность. Уравнения теплопроводности.

Тема 15. Конвективная теплоотдача. Механизм переноса теплоты. Уравнение теплоотдачи. Тепловое подобие.

Тема 16. Основное уравнение теплопередачи. Средняя разность температур.

Раздел 5. Процессы нагревания и выпаривания

Тема 17. Промышленные теплоносители. Процессы нагревания, охлаждения, конденсации. Расчёт и конструкции теплообменных аппаратов.

Тема 18. Процессы выпаривания. Уравнения материальных тепловых балансов одно- и многокорпусной установок.

Тема 19. Температурные потери при выпаривании. Полезная разность температур и её распределение по корпусам. Устройство выпарных аппаратов. Расчёт выпарных установок.

Раздел 6. Основы массопередачи

Тема 20. Основы массопередачи. Общие положения. Уравнения массоотдачи и массопередачи. Подобие диффузионных процессов.

Тема 21. Абсорбция. Материальный баланс. Уравнение рабочей линии. Выбор абсорбента. Конструкции и расчёт абсорбёров.

Тема 22. Ректификация и перегонка. Фазовое равновесие жидкость-пар. Уравнения рабочих линий для верхней и нижней частей колонны. Конструкции и расчет ректификационных колонн.

Тема 23. Экстракция из растворов. Равновесия в системах жидкость-жидкость. Расчёт процесса экстракции. Конструкции экстракторов.

Тема 24. Адсорбция. Промышленные адсорбенты. Конструкции и расчёт адсорбёров периодического и непрерывного действия.

Тема 25. Процессы сушки. Классификация. Диаграмма состояния влажного воздуха. Материальный и тепловой балансы процесса сушки. Расчёт процесса сушки. Конструкции сушилок.

Тема 26. Новейшие достижения в области процессов и аппаратов. Заключение.

Раздел 7. Проектирование установок

Тема 27. Насосная установка.

Тема 28. Выпарная установка.

Тема 29. Установка непрерывной ректификации.

Тема 30. Абсорбционная установка.

Тема 31. Адсорбционная установка.

Тема 32. Сушильная установка.

Тема 33. Расчёт теплообменных установок.

2. Перечень вопросов по модулю «Гидромеханические процессы» дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии»

1. Методы подобия. Причины возникновения, основные принципы. Подобное преобразование уравнений Навье-Стокса, критерии подобия Эйлера, Рейнольдса, Фруда и их физический смысл.
2. Истечение жидкостей из отверстий и насадков. Расчёт скорости и расхода, явления сжатия струи.
3. Уравнение Эйлера движения невязкой, несжимаемой жидкости. Стационарные и нестационарные течения. Уравнение Бернулли.
4. Предмет, цели и задачи гидравлики.
5. Насосы и трубопроводы, принципы расчёта насосных установок, ха-

рактеристики объёмных, инерционных насосов, трубопроводов, совмещённая графическая характеристика насоса и трубопровода.

6. Графическая характеристика трубопровода, что это такое, как рассчитывается, зачем нужна.
7. Определения и основные свойства жидких сред, сжимаемые и несжимаемые (капельные) жидкости.
8. Параметры течения жидкости в трубе. Расход, средняя скорость, гидравлический радиус трубы, эквивалентный диаметр, уравнение сплошности (неразрывности) потока.
9. Параметры жидкой среды, плотность, вязкость, скорость, гидростатическое давление – определения и основные свойства.
10. Правила расчёта сил давления, действующих на произвольно ориентированные плоские поверхности. Примеры расчёта сил давления на вертикальную и горизонтальную крышку заданной площади и глубины погружения.
11. Гидравлические сопротивления. Определения, типы, физический смысл, способы расчёта сопротивлений на участке трубы, коэффициенты сопротивлений, уравнения Дарси – Вейсбаха и Альштуля.
12. Уравнение равновесия неподвижной жидкости и основное уравнение гидростатики.
13. Дисперсные системы, эмульсии, дымы и туманы, пыли. Параметры дисперсных систем, распределение частиц по размерам, концентрация, насыпная и действительная плотность, порозность. Методы определения параметров дисперсных систем.
14. Отстаивание, горизонтальные, радиальные и вертикальные отстойники, особенности, области применения, плюсы и минусы
15. Перемешивание, типы мешалок, критерии мощности, Рейнольдса, Фруда и способ подбора мешалки
16. Фильтрование, предназначение, принцип действия, фильтрующие материалы, плюсы и минусы. Скорость фильтрование и уравнение фильтрования
17. Установки кипящего слоя, конструкция, предназначение, плюсы и минусы, гидравлическая характеристика кипящего слоя, критические скорости и способы их расчёта
18. Мокрая очистка газов от пыли. Основные принципы, особенности, конструкции плюсы и минусы, скрубберы, пенные аппараты, газопромыватели, трубы Вентури
19. Решение уравнения Навье-Стокса в случае стационарного ламинарного потока в круглой трубе, законы течения Пуазеля.
20. Закон Стокса движения гладкого шарика в вязкой жидкости
21. Закон сохранения энергии в движущейся несжимаемой жидкости. Напор, определение, скоростная, пьезометрическая и геометрическая составляющая напора.
22. История гидравлики, инженерные конструкции, аппараты и законы, открытые в древности.

23. Определение и смысл элементарного объёма жидкости. Вывод объёмных плотностей сил тяжести, инерции, давления, вязкости. Уравнения неразрывности потока. Уравнение Навье-Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости.
24. Расчёт разрежения, создаваемого водоструйным насосом, исходя из уравнения Бернулли.
25. Местные сопротивления, их типы, способы расчёта падения напора, что такое напор
26. Режимы течения жидкости, характеристика, причины возникновения, формальное описание с помощью критерия Рейнольдса, его физический смысл и простейший вывод.
27. Расчёт усилия, развивающегося гидравлическим прессом
28. Гидравлический удар, почему возникает, полезные и вредные свойства, способы использования и предотвращения
29. Геометрические параметры трубопроводов, внутренний и внешний диаметр, шероховатость, эквивалентный диаметр
30. Режимы течения воды в трубопроводах в зависимости от скорости и шероховатости, гидравлически гладкие и шероховатые трубы
31. Кинетика осаждения частиц близких к сферическим в вязких средах, числа Рейнольдса, Архимеда и их связь в ламинарной и турбулентной области
32. Способы расчёта и подбора отстойников
33. Циклоны, центрифуги, вихревые камеры, предназначение, принцип работы, достоинства и недостатки
34. Электрофильтры, назначение, конструкция, принцип действия, плюсы и минусы, способы подбора и расчёта размеров
35. Гравитационная очистка газов от пыли, пылевые мешки и камеры, принцип действия, особенности, плюсы и минусы, способы расчёта и подбора
36. Способы расчёта и подбора центрифуг
37. Гидроприводы, типы, конструкции, принцип действия, достоинства и недостатки.
38. Устройства для измерения скорости и расхода жидкости и газа, лопастные, поплавковые, Пито- Прандтля и др, конструкции, принцип действия, плюсы и минусы.
39. Устройства для измерения давления, манометры, U образники, конструкции, принцип действия, достоинства и недостатки.
40. Водонапорные башни, устройство, зачем нужны, плюсы и минусы
41. Водопроводная арматура, вентили, задвижки, переходники, соединения, тройники, конструкции, особенности, плюсы и минусы
42. Поршневой насос односторонний, устройство, достоинства и недостатки.
43. Поршневой насос двухсторонний принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
44. Плунжерный насос, принцип действия, устройство, достоинства и не-

достатки.

45. Мембранный насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
46. Способы сглаживания пульсаций при работе поршневых насосов, многоцилиндровые насосы, воздушные колпаки
47. Ротационный пластинчатый насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
48. Водокольцевой насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
49. Шестерённый насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
50. Винтовой насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
51. Гидравлические прессы, назначение, конструкции, плюсы и минусы.
52. Осевой вентилятор конструкция, особенности, плюсы и минусы
53. Центробежный насос, устройство, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
54. Многоступенчатая турбогазодувка, устройство, работа, плюсы и минусы
55. Вихревой насос, устройство, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
56. Струйные насосы, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
57. Эрлифты, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
58. Монтежю, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
59. Гидравлический таран, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
60. Щековая дробилка, конструкция, принцип действия, достоинства и недостатки
61. Шаровые мельницы, конструкция, особенности, плюсы и минусы
62. Вибромельницы, устройство, принцип работы, особенности, плюсы и минусы
63. Коллоидная мельница, конструкция, особенности, плюсы и минусы

3. Перечень вопросов по модулю «Тепломассообменные процессы»
дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии»

1. Теплопередача. Молекулярная теплопроводность, конвекция, излучение. Основные тепловые свойства жидкостей и твёрдых тел. Теплоёмкость, теплоты фазовых переходов, коэффициент теплового расширения, коэффициент теплопроводности.
2. Уравнение конвективного теплообмена и его подобное преобразование. Критерии теплового подобия гомохронности, Нуссельта, Пекле,

Прандтля, Грасгофа.

3. Схема передачи тепла от ядра потока к плоской стенке. Уравнения теплоотдачи.
4. Схема передачи тепла от одного потока к другому через твёрдую стенку. Уравнение теплопередачи
5. Уравнения теплопроводности, стационарное распределение температуры в плоской стенке.
6. Уравнение теплопроводности и его стационарное решение для цилиндрической трубы
7. Движущая сила процесса теплопередачи, средняя движущая сила, влияние прямотока, противотока и перекрёстного тока на среднюю движущую силу.
8. Алгоритм подбора теплообменников, уравнения теплового баланса, критериальные уравнения, уравнения теплопередачи, тепловой поток и тепловая нагрузка, температуры ядра потока и стенок.
9. Способы нагрева вещества глухим и острым паром, электрические нагреватели сопротивления и высокочастотные, нагрев инфракрасными излучателями, особенности, области применения, плюсы и минусы.
10. Массопередача, определения, типы массопередачи.
11. Уравнения конвективной диффузии и основные массобменные критерии подобия, диффузионные критерии Нуссельта, Фурье, Пекле, Прандтля
12. Равновесие при массопередаче, типы равновесия между фазами, способы описания, графические схемы описания равновесия.
13. Описание фазового равновесия, фазы, компоненты, концентрации, температуры, химические потенциалы, правило фаз Гиббса
14. Уравнения массоотдачи и массопередачи, общая схема передачи тепла от ядра одной жидкой фазы к другой, через поверхность раздела, схема концентраций для уравнений.
15. Движущая сила уравнений массотдачи, средняя движущая сила, число и высота единицы переноса
16. Простая перегонка, перегонка под уменьшенным давлением, перегонка с водяным паром, фракционная перегонка, дифференциальное уравнение простой перегонки, плюсы, минусы, область применения, схемы аппаратов
17. Основные типы линий равновесия жидкость – пар при перегонке и ректификации
18. Общие принципы графического расчёта колонных аппаратов. Рабочие линии и равновесные линии, теоретические ступени массопередачи. Подбор сечения, диаметра и высоты колонны
19. Типы колонных аппаратов, насадочные, ситчатые и тарельчатые колонны, достоинства и недостатки
20. Ректификация, общая схема потоков в колонне ректификации.
21. Схема графического расчёта ректификации. Материальный баланс и

- рабочие линии, схема расчёта числа ступеней ректификации, флегмовое число, минимальное флегмовое число.
22. Жидкостная экстракция, определение, схема однократной экстракции и построение её на треугольной диаграмме.
 23. Треугольная диаграмма для трёхкомпонентной системы ограниченно растворимых жидкостей. Определение точки по составу и составу по точке, правило рычага при смешении двух потоков
 24. Основные параметры влажного воздуха, абсолютная и относительная влажность, удельная энталпия, парциальное давление влаги в воздухе, диаграмма Рамзина, определение состояния воздуха по температурам холодного и мокрого термометров, что это, построение на диаграмме процесса адиабатической сушки
 25. Сушка, определение, конвективная сушка и сушка в кипящем слое, достоинства и недостатки обеих методов.
 26. Кинетика конвективной сушки, влажность материала, скорость сушки, области на кинетической диаграмме сушки
 27. Материальный и тепловой баланс конвективной сушилки, определение расходов воздуха и тепла на сушку
 28. Выпарка, схема однокорпусной и многокорпусной выпарной установки, материальный баланс выпарного аппарата.
 29. Тепловой баланс выпарного аппарата, общая полезная разность температур и распределение её по корпусам.
 30. Алгоритм расчёта однокорпусной выпарной установки, типы температурных потерь.
 31. Схемы выпарных аппаратов, принцип действия, достоинства и недостатки, однокорпусные, многокорпусные с прямотоком, противотоком и параллельным током.
 32. Диаграмма состояния влажного воздуха, построение процесса адиабатической сушки на диаграмме состояния, температуры мокрого и сухого термометров.
 33. Абсорбция, типы абсорбции, конструкции абсорбционных колонн. Равновесные линии абсорбции
 34. Адсорбенты, что это, какие бывают, способы приготовления, свойства, изотермы адсорбции и их типы
 35. Схема адсорбционной установки периодического действия и описание стадий работы адсорбера
 36. Схема адсорбционной установки непрерывного действия кипящего слоя, принцип работы, достоинства и недостатки
 37. Теплообменник «труба в трубе» конструкция, действие, плюсы и минусы.
 38. Кожухотрубчатый одноходовой теплообменник, устройство, достоинства, недостатки.
 39. Кожухотрубчатый многоходовой теплообменник, устройство, достоинства, недостатки.
 40. Кожухотрубчатый теплообменник с плавающей головкой, устройство,

достоинства, недостатки.

41. Кожухотрубчатый теплообменник с линзовым компенсатором, устройство, достоинства и недостатки
42. Кожухотрубчатый теплообменник с U образными трубками, устройство, достоинства и недостатки
43. Змеевиковый теплообменник, устройство, достоинства, недостатки.
44. Орёбранный теплообменник, устройство, достоинства, недостатки.
45. Графитовый теплообменник, устройство, достоинства, недостатки.
46. Спиральный теплообменники, устройство, достоинства, недостатки.
47. Конденсатор водяного пара смешения с барометрической трубой, где применяется, плюсы и минусы
48. Конденсатоотводчики, что это, конструкции, область применения, плюсы и минусы
49. Змеевиковый выпарной аппарат, схема, как работает, достоинства и недостатки
50. Выпарной аппарат с центральной циркуляционной трубой и внутренней нагревательной камерой, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
51. Выпарной аппарат с подвесной нагревательной камерой, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
52. Выпарной аппарат с выносной циркуляционной трубой, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
53. Выпарной аппарат с выносной нагревательной камерой, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
54. Выпарной аппарат с вынесенной зоной кипения, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
55. Выпарной прямоточный аппарат с поднимающейся плёнкой, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
56. Роторный выпарной прямоточный аппарат, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
57. Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
58. Схема выпарной установки с тепловым насосом, конструкция, принцип работы, плюсы и минусы
59. Поверхностный абсорбер, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
60. Трубчатый абсорбер, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
61. Абсорбер с плоско-параллельной насадкой, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
62. Абсорбер с восходящей плёнкой, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
63. Насадочный абсорбер, типы насадок, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
64. Эмульгационный насадочный абсорбер, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости

ства, недостатки область применимости

65. Тарельчатый адсорбер с провальными решётками, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
66. Тарельчатый адсорбер с переливными трубками
67. Конструкции массообменных тарелок, ситчатые, колпачковые, конструкция колпачков, капсулные, клапанные, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
68. Полый распыливающий адсорбер, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
69. Адсорбер Вентури, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
70. Схема установки непрерывной ректификации, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
71. Схема установки периодической ректификации, устройство, работа, достоинства, недостатки область применимости
72. Смесительные многоступенчатые экстракторы, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
73. Распылительный колонный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
74. Полочный колонный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
75. Ситчатый колонный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
76. Роторно-дисковый колонный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
77. Ситчатый с поршневым пульсатором колонный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
78. Насадочный с пневматическим пульсатором колонный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
79. Центробежный экстрактор, схема, принцип работы, достоинства и недостатки
80. Горизонтальный адсорбер, устройство, работа, особенности, достоинства и недостатки
81. Вертикальный адсорбер, устройство, работа, особенности, достоинства и недостатки
82. Кольцевой адсорбер, устройство, работа, особенности, достоинства и недостатки
83. Адсорбер, с движущимся слоем активного угля, устройство, работа, особенности, достоинства и недостатки
84. Однокамерный адсорбер с движущимся слоем, устройство, работа, особенности, достоинства и недостатки
85. Многокамерный адсорбер с движущимся слоем, устройство, работа, особенности, достоинства и недостатки
86. Камерная сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
87. ТунNELьная сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки

88. Ленточная сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
89. Барабанная сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
90. Однокамерная с кипящим слоем сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
91. Двухкамерная с кипящим слоем сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
92. Ступенчато-противоточная с кипящим слоем сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
93. Распылительная сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
94. Пневматическая сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
95. Гребковая вакуум сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки
96. Двухвальцовальная сушилка, устройство, работа, достоинства и недостатки

4. Курсовая работа

Выполнение и защита курсовой работы является формой промежуточной аттестации. Главной целью курсовой работы 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 курсовой работы является углубление и закрепление знаний по теоретической части и в лабораторном практикуме дисциплины и более глубокому осмыслинию сведений, полученных на учебных практиках.

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

Курсовая работа состоит из расчётно-пояснительной записи объёмом ≈ 20 страниц и графической части – чертежа аппарата.

Расчётно-пояснительная записка должна включать следующие составляющие:

- титульный лист (приложение А);
- задание на проектирование (приложение Б, двусторонний бланк);
- 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 расчетно-пояснительной записи и графической части приведены в пособии [6].

Вариант исходных данных для курсовой работы определяется по последней цифре в зачетной книжке (таблица 1).

Таблица 1. 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 однотрубный кожухотрубчатый теплообменник, последовательность расчета которого приведена в пособии [6].

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

Физические свойства растворов (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].

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 вискозных волокон и пленки выпариванию подвергается отработанная осадительная ванна, которая в процессе формования 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_{vt} и теплоту парообразования r_{bt} вторичного пара. Тепловая нагрузка выпарного аппарата, Вт,

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

где r – теплота парообразования, Дж/кг; $Q_{\text{конц}}$ – 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:

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

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

В ориентировочном расчете поверхности теплообмена для K_{\min} и $\Delta t_{\text{пол}}$ 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 $\Delta'_{\text{атм}}$, определенную при атмосферном давлении, по формуле И. А. Тищенко пересчитывают для давления в аппарате:

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

где T_e – 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

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

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 $P_{\text{ср}}$ определяют температуру в среднем слое $t_{\text{ср}}$.

Гидростатическая депрессия

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

Для выпарных аппаратов пленочного типа гидростатическая депрессия принимается равной нулю.

Плотность раствора определяется по средней концентрации:

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_{\text{H}} + x_{\text{K}}}{2}. \quad (8)$$

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

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

Полезная разность температур

$$t_{\text{пол}} = T - t. \quad (10)$$

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:

a) 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;

b) 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

$$\alpha = R \frac{\lambda}{\delta} (0.25 \cdot \text{Re})^N \left(\frac{q \delta}{\lambda T'} \right)^M, \quad \text{Re} = \frac{4 \Gamma}{\mu}, \quad (11)$$

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

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); ν – кинематическая вязкость, м²/с; δ – толщина пленки, м; Re – критерий Рейнольдса; q – удельная теп-

ловая нагрузка, Вт/м²; μ – динамическая вязкость, Па·с; Γ – линейная массовая плотность орошения, кг/м·с; G – массовый расход выпариваемого раствора, кг/с; P – 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:

$$X_1 = \frac{GX_{\text{H}}}{G - W_1}, \quad (13)$$

$$X_n = X_k = \frac{GX_{\text{H}}}{G - W_1 - W_2 - \dots - W_n}. \quad (14)$$

Перепад давлений в одном корпусе

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

где P_1 и P_{k} – давление греющего пара в первом корпусе и давление в барометрическом конденсаторе.

Затем определяют давление вторичного пара по корпусам

$$P_{\text{вт}_1} = P_1 - \Delta P, \quad P_{\text{вт}_2} = P_{\text{вт}_1} - \Delta P \quad (16)$$

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

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

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

Тепловые нагрузки по корпусам определяют по формуле

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

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

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

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

или при условии минимальной поверхности

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

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 2).

Таблица 2. Температурный режим процесса выпаривания

Корпус	Температура греющего пара $T_i, ^\circ\text{C}$	Температура кипения раствора $t_i, ^\circ\text{C}$	Температура вторичного пара $T'_i, ^\circ\text{C}$
1	T_1	$t_1 = T_1 - \Delta t_{\text{пол } 1}$	$T'_1 = t_1 - \Delta'_1 - \Delta''_1$
2	$T_2 = T_1' - \Delta'''_{1-2}$	$t_2 = T_2 - \Delta t_{\text{пол } 2}$	$T'_2 = t_2 - \Delta'_2 - \Delta''_2$
i	$T_i = T_{i-1}' - \Delta'''_{(i-1)-i}$	$t_i = T_i - \Delta t_{\text{пол } i}$	$T'_i = t_i - \Delta'_i - \Delta''_i$
Конденсатор	$T_k = T_n' - \Delta'''_{n-k}$		

По этим температурам находят энталпию 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 – энталпия 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

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

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_ext_inf_publish.php?id=1861, 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. http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1136
7. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
8. **Романков, П. Г.** Массообменные процессы химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2017. – <http://www.iprbookshop.ru/67361.html>.
9. **Романков, П. Г.** Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2020 <http://www.iprbookshop.ru/97815.html>.
10. **Иваненко, И. И.** Гидравлика Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет / И. И. Иваненко. – ЭБС АСВ, 2012. – <http://www.iprbookshop.ru/18992.html>
11. **Калайдо, А. В.** Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод / А. В. Калайдо, Е. Я. Сердюкова. – Луганск: Книта, 2020. – <http://www.iprbookshop.ru/111210.html>.
12. **Чулкова, Э. Н.** Гидрогазодинамика. Контрольные работы / Э. Н. Чулкова, В. Д. Шаханов, И. В. Багров. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2014. – http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1576

Приложение А

Пример оформления титульного листа курсовой работы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна**

Институт _____ **прикладной химии и экологии** _____

Направление _____ **18.03.01 – Химическая технология** _____

Кафедра _____ **инженерной химии и промышленной экологии** _____

КУРСОВАЯ РАБОТА
(пояснительная записка)
по дисциплине «Процессы и аппараты химической
технологии»
на тему «Расчёт выпарной установки»

Исполнитель – студент уч. группы _____
(группа)

(фамилия, имя, отчество, подпись)

Руководитель курсовой работы _____

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

Оценка _____

Санкт-Петербург
20____

Приложение Б

Пример оформления задания курсовой работы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**"Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна"**

Кафедра _____ инженерной химии и промышленной экологии _____

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ)

Студенту _____
группы _____

Тема проекта (работы) _____

Утверждена на заседании кафедры ИХПЭ, протокол №____ от «__»____ 20__ г.

Содержание задания

Задача проекта (работы) _____

Исходные данные:

а) технологические параметры: _____

б) конструктивные параметры: _____

в) особые условия: _____

г) объем проекта (работы): _____

Пособия и рекомендуемые материалы: _____

Сроки выполнения задания: _____

Подготовительный этап (срок): _____

Пояснительная записка (количество листов и содержание) _____

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) _____

Руководитель _____
(подпись)

Задание принял к исполнению _____ — _____
(дата) _____
(подпись студента)