

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



К.М. Федоров, Ю.Н. Гуляева

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Часть 2

ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 663.62

Федоров К.М., Гуляева Ю.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. Курсовое проектирование. Ч. 2. Выпарные установки: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 40 с.

Даны методические указания к выполнению и оформлению курсового проекта, а также методические рекомендации по расчету трехкорпусной вакуум-выпарной установки.

Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов направлений бакалавриата 220700, 151000, 240700, 260100, 260200 очной и заочной форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Арет

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014

© Федоров К.М., Гуляева Ю.Н., 2014

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основная цель курсового проектирования – систематизация, закрепление, расширение теоретических знаний, развитие навыков самостоятельной работы по комплексному решению инженерных задач, пользования специальной научно-технической литературой.

В курсовом проекте выполняется проектная разработка основной аппаратуры какой-либо установки (выпарной, ректификационной, сушильной и т. п.) с обязательными в каждом проекте технологическими, тепловыми, гидравлическими расчетами тепло- или массообменных аппаратов.

Студент несет полную ответственность за правильность расчетов, стиль и оформление, работы. Преподаватель-руководитель проекта обеспечивает систематические консультации, направляет работу студента, дает рекомендации по основным разделам разрабатываемой темы с указанием, какие литературные источники должны быть изучены.

Полностью оформленный проект студент в назначенное время защищает его. Оценка проекта производится с учетом уровня защиты, качества выполнения, степени самостоятельности работы студента и ритмичности при работе над проектом.

1.1. Содержание и объем курсового проекта

Курсовой проект по процессам и аппаратам пищевых производств состоит из пояснительной записки и графической части. Ниже приведены содержание и объем курсового проекта, порядок оформления технической документации, требования при защите.

Содержание пояснительной записки. Пояснительная записка к курсовому проекту, содержащая все исходные, расчетные и графические (вспомогательные) материалы, должна быть оформлена в определенной последовательности.

1. Титульный лист.
2. Бланк задания на проектирование.
3. Оглавление (содержание).
4. Введение.
5. Технологическая схема установки и ее описание.
6. Выбор конструкционных материалов для аппарата.

7. Обоснование выбора основного и вспомогательного оборудования.
8. Технологический расчет аппаратов.
9. Расчет или подбор вспомогательного оборудования.
10. Гидравлические расчеты.
11. Расчет тепловой изоляции.
12. Выбор точек контроля за работой установки.
13. Техническая характеристика установки (сводная таблица по результатам расчетов).
14. Основные обозначения.
15. Заключение (выводы и предложения).
16. Список использованной литературы.

Титульный лист. Пример выполнения титульного листа приведен на стр. 12.

В названии проекта должна быть указана производительность установки. Например: «Трехкорпусная вакуум-выпарная установка производительностью 2 кг/с».

Задание на проектирование. Приводятся исходные данные для проектирования.

Введение. В этом разделе необходимо кратко описать сущность и назначение данного процесса, сравнительную характеристику аппаратов для его осуществления. Материалы берутся из научно-технической и патентной литературы.

Технологическая схема установки. Должны быть приведены принципиальная схема установки с экспликацией оборудования, и ее описание с указанием позиций (номеров аппаратов). На схеме проставляют стрелки, указывающие направление всех потоков, значения их расходов, температур и других параметров. Примеры графического выполнения технологических схем даны в [1].

В описании технологической схемы следует остановиться на возможных ее вариантах, рассмотреть меры, позволяющие интенсифицировать основной процесс (например, предварительное охлаждение газа перед абсорбцией), а также проанализировать пути, ведущие к уменьшению энергозатрат (пара, воды, хладоносителя). Далее следует обосновать окончательный вариант технологической схемы, принятый к проектированию. Описание технологической схемы должно быть четким и кратким и сопровождаться ссылками на источники информации.

Выбор конструкционных материалов аппаратов. В этом разделе необходимо привести данные по обоснованию выбора материалов, из которых будет изготовлено оборудование, входящая в технологическую схему установки (с учетом скорости коррозии материала в данной среде, его механических и теплофизических свойств).

Обоснование выбора основного и вспомогательного оборудования. Как правило, в задании на проектирование указываются производительность, начальные и конечные концентрации (или температуры). Например: Рассчитать и спроектировать вакуум-выпарную установку для концентрирования цельного молока $G_H = 2$ кг/с от начальной концентрации $x_H = 4\%$ до конечной $x_K = 40\%$ при следующих условиях:

- 1) обогрев производится насыщенным водяным паром давлением 0,1 МПа;
- 2) давление в барометрическом конденсаторе $P_{БК} = 0,015$ МПа;
- 3) взаимное направление пара и раствора – прямоток;
- 4) отбор экстрапара не производится;
- 5) тип аппарата – с наружной циркуляционной трубой.

Расчет или подбор вспомогательного оборудования (теплообменника, конденсатора, вакуумного насоса) студент должен выполнять самостоятельно.

Технологический расчет аппаратов. Задачей этого раздела проекта является расчет основных размеров аппаратов (диаметра, высоты, поверхности теплопередачи и т. д.). Для проведения технологического расчета необходимо предварительно найти по справочникам физико-химические свойства перерабатываемых веществ (плотность, вязкость и т. п.), составить материальные и тепловые балансы. Затем на основе анализа литературных данных и рекомендаций данного пособия выбирается методика расчета размеров аппаратов. При этом особое внимание следует уделять гидродинамическому режиму работы того или иного аппарата, выбор которого должен быть обоснован с учетом технико-экономических показателей его работы.

В технологическом расчете с помощью уравнений материального и теплового балансов отдельных аппаратов или узлов технологической схемы определяют расходы, составы и температуры получаемых продуктов, тепловые производительности, расходы теплоносителей – греющего пара, охлаждающей воды, хладонотителя. По

кинетическим уравнениям тепло-и массопередачи рассчитывают размеры аппаратов и подбирают стандартные.

В сводке основных свойств рабочих сред и входящих в них компонентов должны быть приведены физико-химические и термодинамические свойства материалов, влияющие на протекание тех или иных процессов в проектируемой установке (удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности, диффузии, вязкости и так далее), их зависимость от температуры и состава материалов.

Справочные данные имеются в [1–2].

Если необходимые значения того или иного свойства находятся за пределами значений независимой переменной, то следует прибегнуть к методам экстраполяции. Окончательно сведения о свойствах необходимо представить в виде таблиц, графиков или уравнений для каждого свойства отдельно.

Расчет или подбор вспомогательного оборудования. Кроме основных аппаратов в установку входят различные виды вспомогательного оборудования: насосы, вентиляторы, газодувки, компрессоры, вакуум-насосы, конденсатоотводчики, емкости для хранения сырья и продукции и т. п. Все это оборудование должно быть рассчитано или подобрано по нормальям, каталогам или ГОСТам с учетом конкретных условий их работы.

Гидравлические расчеты. В этот же раздел входит гидравлический расчет аппаратов, целью которого является определение гидравлических сопротивлений элементов аппаратов и размеров патрубков и трубопроводов.

Расчет тепловой изоляции. В этом же разделе выбирается материал для теплоизоляции аппарата и рассчитывается толщина тепловой изоляции.

Выбор точек контроля. В этом разделе проекта необходимо указать, а затем нанести на технологическую схему, все точки контроля работы установки (измерение расхода жидкости или газа, давления, температуры, концентрации, уровня жидкости и т. д.). На технологической схеме на некоторых узлах (аппаратах) указать принцип регулирования заданного режима их работы. Например, конечную температуру нагреваемой в теплообменнике жидкости можно, например, регулировать путем изменения давления подаваемого в этот теплообменник греющего пара.

Техническая характеристика установки. Приводятся основные параметры установки, полученные по результатам расчетов и проектирования. Например, для конвективной сушилки:

| | |
|------------------------------------|-------|
| Производительность, кг/час: | |
| – по сухому продукту..... | 350 |
| – по испаренной влаге..... | 308 |
| Температура теплоносителя, °С..... | 70–80 |
| Расход воздуха, кг/час..... | 30160 |
| Габаритные размеры, мм: | |
| – длина..... | 1200 |
| – ширина..... | 1200 |
| – высота..... | 91515 |
| и так далее. | |

Заключение (выводы и предложения). Заканчивая расчетную часть проекта, студент должен дать анализ полученных результатов, их соответствия заданию на проект, высказать соображения о возможных путях совершенствования данного процесса и его аппаратного оформления.

Список использованной литературы. Литературные источники, которые использовались при составлении пояснительной записки, располагаются в порядке упоминания их в тексте или по алфавиту (по фамилии первого автора работы). Сведения о книгах должны включать: фамилию и инициалы автора, название книги, место издания, издательство, год издания, число страниц. Например: Гребенюк С.М. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1987. – 304 с.

Сведения о статьях должны включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, наименование журнала, серию, год выпуска, том, номер журнала, страницы.

1.2. Последовательность выполнения курсового проекта

1) Рекомендуется изучить литературу по теме проекта; наметить основные этапы работы; составить календарный план.

2) Составить принципиальную технологическую схему установки, на которую нанести исходные данные задания: расходы, температуры потоков, давления.

Согласовать схему с руководителем проекта.

3) Изучить физико-химические и термодинамические свойства

веществ и их смесей в области рабочих давлений, температур, составов.

- 4) Выполнить расчет оборудования установки.
- 5) Подобрать стандартное оборудование.
- 6) Закончив расчеты, оформить пояснительную записку; вычертить технологическую схему установки.
- 7) Приступить к выполнению чертежа общего вида и сборочных единиц аппарата; составить спецификацию к сборочному чертежу.

1.3. Оформление пояснительной записки

Пояснительная записка оформляется на стандартных листах бумаги (формат А4). Текстовые материалы выполняются рукописным способом или на компьютере. Расстояние от края листа до границы текста должно быть: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху и снизу – не менее 20 мм. Страницы записки нумеруются, а в оглавлении указываются номера страниц, соответствующие каждому разделу записки. Заголовки разделов должны быть краткими и соответствовать содержанию. Переносы слов в заголовках не допускаются, точку в конце заголовка не ставят. Расстояние между заголовком и последующим текстом должно быть равно 10 мм, расстояние между последней строкой текста и последующим заголовком – 15 мм.

Терминология и определения в записке должны быть едиными и соответствовать установленным стандартам, а при их отсутствии – общепринятым в научно-технической литературе. Сокращения слов в тексте и подписях, как правило, не допускаются, за исключением сокращений, установленных ГОСТ 7.12–77.

Все расчетные формулы в пояснительной записке приводятся сначала в общем виде, нумеруются, дается объяснение обозначений и размерностей всех входящих в формулу величин. Затем в формулу подставляют численные значения величин и записывают результат расчета. Все расчеты должны быть выполнены в международной системе единиц СИ. Если из справочников и других источников значения величин взяты в какой-либо другой системе единиц, перед постановкой их в уравнения необходимо сделать пересчет в систему единиц СИ. В тексте указываются ссылки на источник основных расчетных формул, физических констант и других справочных данных.

Ссылки на литературные источники указывают в квадратных скобках. Например: «...для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе используем формулу [2, с. 110]».

Все иллюстрации (графики, схемы, чертежи, фотографии) именуется рисунками. Рисунки должны быть простыми и наглядными, давать только общее представление об устройстве аппарата или узла, а не служить чертежом для изготовления. Все рисунки должны быть однотипными, т. е. выполнены либо карандашом, либо тушью, либо чернилами на листах записки или на миллиметровой бумаге. Рисунок нумеруют и располагают после ссылки на него. Все подписи, загромождающие рисунок, следует переносить в текстовую часть. Кривые или другие элементы на рисунках обозначают цифрами. Подписи под рисунками должны быть краткими, необходимые объяснения целесообразно приводить в тексте.

Все таблицы, как и рисунки, нумеруют. Заголовок таблицы помещают под словом «Таблица». Все слова в заголовках и надписях таблицы пишут полностью, без сокращений. Если повторяющийся в графе текст состоит из одного слова, его допускается заменять кавычками. Если повторяющийся текст состоит из трех или более слов, то при первом повторении его заменяют словами «То же», а при следующем – кавычками. Ставить кавычки вместо повторяющихся цифр, марок, знаков, математических и химических символов не допускается.

Распечатки с расчетов с использованием компьютеров должны соответствовать формату А4. Распечатки включают в общую нумерацию страниц записки и помещают в Приложение.

Объем пояснительной записки составляет обычно 30–40 страниц рукописного текста.

1.4. Графическая часть курсового проекта

Обычно она состоит из технологической схемы установки (один лист) и чертежа основного аппарата с узлами (один лист).

Технологическая схема (окончательный вариант) выполняется на листе чертежной бумаги (лист А2 или А3) в соответствии с ГОСТ 2.701–76 без соблюдения масштаба; действительное пространственное расположение аппаратов учитывается приближенно (или вообще не учитывается). При выполнении схемы применяют услов-

ные графические изображения, установленные стандартами ЕСКД, пояснения к ним приведены в [1].

Технологическая схема должна дать полное представление о принципах работы установки. Если будут приняты параллельно работающие аппараты, то все они должны быть изображены на схеме. Основные аппараты нумеруют по направлению движения рабочей среды. Номера аппаратов наносят на полочках линий-выносок справа и выше изображений.

На схеме должны быть сделаны надписи, характеризующие исходные, промежуточные и конечные продукты.

В правом нижнем углу располагают основную надпись (штамп) размером 185×55 мм по ГОСТ 2.104–68. Над нею помещают таблицу экспликации аппаратов и другого оборудования, входящего в схему. Указания по заполнению таблиц [1].

Чертеж общего вида аппарата, указанного в задании, выполняется на уровне технического проекта (ГОСТ 2.120–73), который определяет конструкцию аппарата, взаимодействие его составных частей и поясняет принцип работы аппарата.

На чертеже (лист А1 или А2) должны быть даны общий вид аппарата, разрезы, сечения, текстовая часть, надписи и данные о составных частях аппарата. Требования к оформлению чертежей общего вида определяются стандартами ЕСКД. В соответствии с ГОСТ 2.109–73 чертеж выполняется с максимальными упрощениями.

Главный вид располагают вдоль большей стороны листа, на остальной части располагают другие виды, сечения, разрезы, обеспечивающие полное представление об аппарате. Основные виды вычерчивают в одинаковом масштабе. При вычерчивании многоходовых теплообменных аппаратов необходимо показать расположение перегородок в крышках теплообменника. Общий вид рекомендуется вычерчивать в наибольшем из возможных масштабов, при необходимости – с разрывом аппарата. В данном случае дополнительно этот аппарат следует вычертить в меньшем масштабе без разрыва.

На свободном месте вычерчивают сборочные единицы аппарата, которые на общем виде изображаются упрощенно (например, фланцевое соединение), в масштабе большем, чем основные виды. Давать на чертеже аппарата обозначения чистоты поверхности, допусков, сварки, термической обработки не требуется.

Основную надпись (штамп) располагают в правом нижнем углу по отношению к рабочему положению **аппарата**, выполняя ее по ГОСТ 2.104—68 [1–35].

Над основной надписью помещают таблицу составных частей изделия; при отсутствии места ее прилагают к чертежу на листах формата А4. Над таблицей составных частей на чертеже приводят техническую характеристику в виде колонки шириной 185 мм.

На свободном поле чертежа помещают таблицу штуцеров.

На чертеже общего вида проставляются размеры: габаритные, установочные и присоединительные и номера всех **сборочных** единиц и деталей.

Для выполнения чертежа рекомендуется:

- 1) выписать по стандартам основные размеры аппарата;
- 2) по стандартам или нормам на детали выполнить эскиз сборочных единиц аппарата (днищ, фланцев, опор, перегородок и т. п.) для детального ознакомления с их конструкцией и размерами;
- 3) приступить к компоновке чертежа общего вида, наметив основные контуры аппарата в рабочем положении, сборочные единицы;
- 4) после одобрения руководителем проекта принятой компоновки листа – завершить чертеж.

1.5. Защита курсового проекта

К защите допускается студент, выполнивший задание на проектирование в установленном объеме и оформивший его в соответствии с требованиями данного пособия. Оценка курсового проекта включает в себя оценку качества расчета и оформления записки, качества выполнения графической части проекта и ответов на поставленные вопросы.

Министерство образования и науки Российской Федерации

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовому проекту по процессам и аппаратам на тему:

(название курсового проекта, система, производительность установки)

ПРОЕКТИРОВАЛ СТУДЕНТ _____
(номер группы]

(подпись, ф. и. о.)

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

(подпись, ф. и. о.)

ПРОЕКТ ЗАЩИЩЕН С ОЦЕНКОЙ _____

(подпись, ф. и. о.) _____

(дата, год) _____

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРЕХКОРПУСНОЙ ВАКУУМ-ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ [1]

Основные условные обозначения:

c – теплоемкость, Дж/(кг·К);
 d – диаметр, м;
 D – расход греющего пара, кг/с;
 F – поверхность теплопередачи, м²;
 G – расход, кг/с;
 g – ускорения свободного падения, м/с²;
 H – высота, м;
 i, I – энтальпия жидкости и пара, кДж/кг;
 K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
 P – давление, МПа;
 Q – тепловая нагрузка, кВт;
 q – удельная тепловая нагрузка, Вт/м²;
 r – теплота парообразования, кДж/кг;
 t, T – температура, град;
 w, W – производительность по испаряемой воде, кг/с;
 x – концентрация, % (масс.);
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 λ – теплопроводность, Вт/(м·К);
 μ – вязкость, Па·с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 σ – поверхностное натяжение, Н/м;
 Re – критерий Рейнольдса;
 Nu – критерий Нуссельта;
 Pr – критерий Прандтля.

Индексы:

1, 2, 3 – первый, второй, третий корпус выпарной установки;
в – вода;
вп – вторичный пар;
г – греющий пар;
ж – жидкая фаза;
к – конечный параметр;
н – начальный параметр;
ср – среднее значение;
ст – стенка.

2.1. Введение

В пищевой промышленности жидкие смеси, концентрирование которых осуществляется выпариванием, отличаются большим разнообразием как физических параметров (вязкость, плотность, температура кипения, величина критического теплового потока и др.), так и других характеристик (кристаллизующиеся, пенящиеся, нетермостойкие растворы и др.). Свойства смесей определяют основные требования к условиям проведения процесса (вакуум-выпаривание, прямо- и противоточные, одно- и многокорпусные выпарные установки), а также к конструкциям выпарных аппаратов.

Такое разнообразие требований вызывает определенные сложности при правильном выборе схемы выпарной установки, типа аппарата, числа ступеней в многокорпусной выпарной установке. В общем случае такой выбор является задачей оптимального поиска и выполняется технико-экономическим сравнением различных вариантов с использованием ЭВМ.

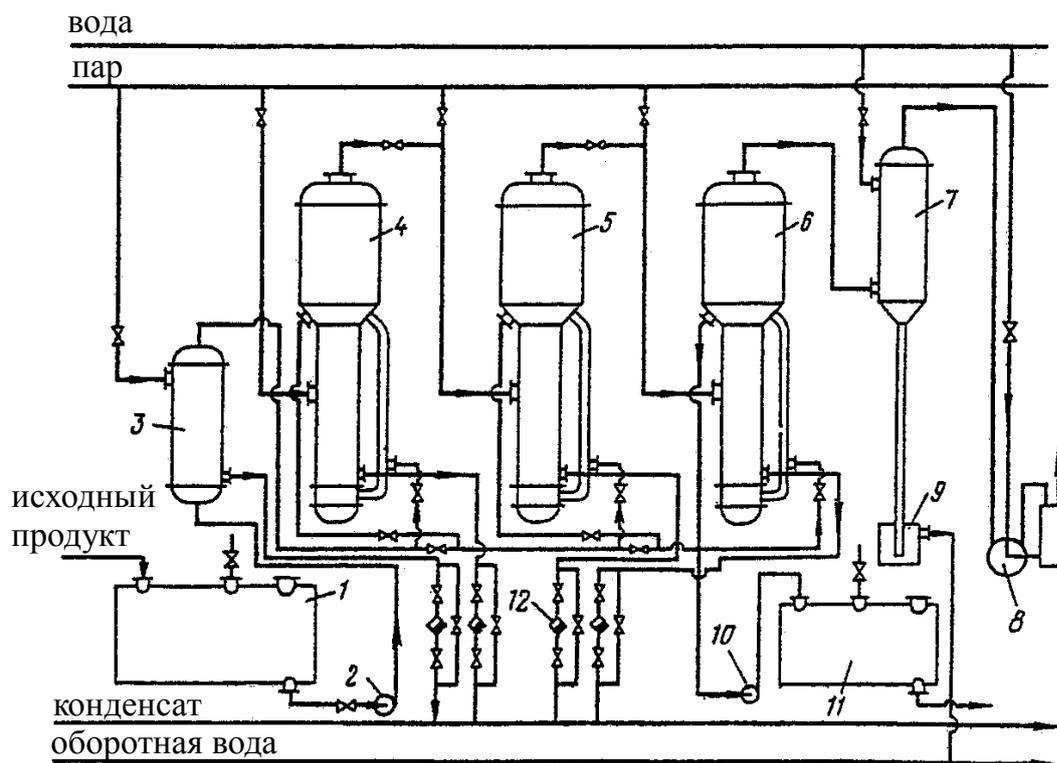


Рис. 1. Принципиальная схема трехкорпусной выпарной установки:
1 – емкость исходного раствора; 2, 10 – насосы; 3 – теплообменник-подогреватель;
4–6 – выпарные аппараты; 7 – барометрический конденсатор; 8 – вакуум-насос;
9 – гидрозатвор; 11 – емкость упаренного раствора; 12 – конденсатоотводчик

Принципиальная схема трехкорпусной выпарной установки показана на рис. 1. Исходный разбавленный раствор из промежуточной емкости 1 центробежным насосом 2 подается в теплообменник 3 (где подогревается до температуры, близкой к температуре кипения), а затем – в первый корпус 4 выпарной установки. Предварительный подогрев раствора повышает интенсивность кипения в выпарном аппарате 4.

Первый корпус обогревается свежим водяным паром. Вторичный пар, образующийся при концентрировании раствора в первом корпусе, направляется в качестве греющего во второй корпус 5. Сюда же поступает частично сконцентрированный раствор из 1-го корпуса. Аналогично третий корпус 6 обогревается вторичным паром второго и в нем производится концентрирование раствора, поступившего из второго корпуса.

Самопроизвольный переток раствора и вторичного пара в следующие корпуса возможен благодаря общему перепаду давлений, возникающему в результате создания вакуума конденсацией вторичного пара последнего корпуса в барометрическом конденсаторе смешения 7 (где заданное давление поддерживается подачей охлаждающей воды и отсосом неконденсирующихся газов вакуум-насосом 8). Смесь охлаждающей воды и конденсата выводится из конденсатора при помощи барометрической трубы с гидрозатвором 9. Образующийся в третьем корпусе концентрированный раствор центробежным насосом 10 подается в промежуточную емкость упаренного раствора 11.

Конденсат греющих паров из выпарных аппаратов выводится с помощью конденсатоотводчиков 12.

Задание на проектирование. Спроектировать трехкорпусную выпарную установку для концентрирования водного раствора продукта от начальной концентрации x_n до конечной x_k при следующих условиях:

- 1) обогрев производится насыщенным водяным паром давлением P_r ;
- 2) давление в барометрическом конденсаторе $P_{бк}$;
- 3) взаимное направление пара и раствора – прямоток;
- 4) отбор экстрапара не производится.

2.2. Определение поверхности теплопередачи выпарных аппаратов

Поверхность теплопередачи каждого корпуса выпарной установки определяют по основному уравнению теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{\Pi}}. \quad (1)$$

Для определения тепловых нагрузок Q , коэффициентов теплопередачи K и полезных разностей температур Δt_{Π} необходимо знать распределение упариваемой воды, концентраций растворов и их температур кипения по корпусам. Эти величины находят методом последовательных приближений.

Производительность установки по выпариваемой воде определяют из уравнения материального баланса:

$$W = G_{\text{H}} \left(1 - \frac{x_{\text{H}}}{x_{\text{K}}} \right). \quad (2)$$

Концентрации упариваемого раствора

Распределение концентраций раствора по корпусам установки зависит от соотношения нагрузок по выпариваемой воде в каждом аппарате. В первом приближении на основании практических данных принимают, что производительность по выпариваемой воде распределяется между корпусами в соответствии с соотношением

$$w_1 : w_2 : w_3 = 1,0 : 1,1 : 1,2.$$

Тогда

$$w_1 = \frac{1,0 W}{1,0 + 1,1 + 1,2}; \quad w_2 = \frac{1,1 W}{3,3}; \quad w_3 = \frac{1,2 W}{3,3}.$$

Далее рассчитываются концентрации растворов в корпусах

$$x_1 = \frac{G_{\text{H}} x_{\text{H}}}{G_{\text{H}} - w_1}; \quad x_2 = \frac{G_{\text{H}} x_{\text{H}}}{G_{\text{H}} - w_1 - w_2}; \quad x_3 = \frac{G_{\text{H}} x_{\text{H}}}{G_{\text{H}} - w_1 - w_2 - w_3}.$$

Концентрация раствора в последнем корпусе x_3 соответствует заданной концентрации упаренного раствора x_k .

Температуры кипения растворов

Общий перепад давлений в установке равен

$$\Delta P_{\text{общ}} = P_{\Gamma_1} - P_{\text{бк}}.$$

В первом приближении общий перепад давлений распределяют между корпусами поровну. Тогда давления греющих паров в корпусах можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{\Gamma_1} & - \text{из задания;} \\ P_{\Gamma_2} & = P_{\text{вп}_1} = P_{\Gamma_1} - \Delta P_{\text{общ}} / 3; \\ P_{\Gamma_3} & = P_{\text{вп}_2} = P_{\Gamma_2} - \Delta P_{\text{общ}} / 3. \end{aligned}$$

Давление пара в барометрическом конденсаторе

$$P_{\text{бк}} = P_{\Gamma_3} - \Delta P_{\text{общ}} / 3,$$

что соответствует заданному значению $P_{\text{бк}}$.

По давлениям паров находим их температуры и энтальпии (см. приложение 1)

$$P, \text{ Па}; \quad t, \text{ }^\circ\text{C}; \quad I, \text{ кДж/кг}$$

При определении температуры кипения растворов в аппаратах исходят из следующих допущений. Распределение концентраций раствора в выпарном аппарате с интенсивной циркуляцией практически соответствует модели идеального перемешивания. Поэтому концентрацию кипящего раствора принимают равной конечной в данном корпусе и, следовательно, температуру кипения раствора определяют при конечной концентрации.

Изменение температуры кипения по высоте кипятильных труб происходит вследствие изменения гидростатического давления столба жидкости. Температуру кипения раствора в корпусе принимают соответствующей температуре кипения в среднем слое жидкости. Та-

ким образом, температура кипения раствора в корпусе отличается от температуры греющего пара в последующем корпусе на сумму температурных потерь $\sum \Delta$ от температурной (Δ'), гидростатической (Δ'') и гидродинамической (Δ''') депрессий $\sum \Delta = \Delta' + \Delta'' + \Delta'''$.

Гидродинамическая депрессия обусловлена потерей давления пара на преодоление гидравлических сопротивлений трубопроводов при переходе из корпуса в корпус. Обычно в расчетах принимают $\Delta''' = 1,0 - 1,5$ град на корпус. Примем для каждого корпуса $\Delta''' = 1$ град. Тогда температуры вторичных паров в корпусах (в °С) равны:

$$\begin{aligned} t_{\text{вп}_1} &= t_{\text{г}_2} + \Delta_1'''; \\ t_{\text{вп}_2} &= t_{\text{г}_3} + \Delta_2'''; \\ t_{\text{вп}_3} &= t_{\text{г}_4} + \Delta_3'''. \end{aligned}$$

Сумма гидродинамических депрессий

$$\sum \Delta''' = \Delta_1''' + \Delta_2''' + \Delta_3''' = 1 + 1 + 1 = 3^\circ \text{C}.$$

По температурам вторичных паров определим их давления. Они равны соответственно $P_{\text{вп}_1}$; $P_{\text{вп}_2}$; $P_{\text{вп}_3}$.

Гидростатическая депрессия обусловлена разностью давлений в среднем слое кипящего раствора и на его поверхности. Давление в среднем слое кипящего раствора $P_{\text{ср}}$ каждого корпуса определяется по уравнению

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{вп}} + \rho g H (1 - \varepsilon) / 2, \quad (3)$$

где H – высота кипятельных труб в аппарате, м; ρ – плотность кипящего раствора, кг/м³; ε – паронаполнение (объемная доля пара в кипящем растворе, м³/м³).

Для выбора значения H необходимо ориентировочно оценить поверхность теплопередачи выпарного аппарата $F_{\text{ор}}$. При кипении водных растворов можно принять удельную тепловую нагрузку аппаратов с естественной циркуляцией $q = 20000 - 50000$ Вт/м², аппаратов с принудительной циркуляцией $q = 40000 - 80000$ Вт/м². Примем

$q = 40000 \text{ Вт/м}^2$. Тогда поверхность теплопередачи 1-го корпуса ориентировочно равна:

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q}{q} = \frac{w_1 r_1}{q},$$

где r_1 – теплота парообразования вторичного пара, Дж/кг.

По ГОСТ 11987–81 (см. приложение 2) принимаем высоту кипяtilьных труб H . Плотность растворов по корпусам ρ_u можно считать по следующим зависимостям

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 10[1,42x + (100 - x)]; \\ \rho_u &= \rho_0 - 0,0005(T_u - T_0), \end{aligned}$$

где x – средняя концентрация раствора в корпусе, %; T_u – температура раствора в корпусе, °К.; T_0 – 293 °К

При пузырьковом (ядерном) режиме кипения паронаполнение составляет $\varepsilon = 0,4 \div 0,6$.

Давления в среднем слое кипяtilьных труб корпусов (в Па) равны:

$$\begin{aligned} P_{1\text{cp}} &= P_{\text{вп}1} + \rho_1 g H (1 - \varepsilon) / 2; \\ P_{2\text{cp}} &= P_{\text{вп}2} + \rho_2 g H (1 - \varepsilon) / 2; \\ P_{3\text{cp}} &= P_{\text{вп}3} + \rho_3 g H (1 - \varepsilon) / 2. \end{aligned}$$

Этим давлениям соответствуют следующие температуры кипения и теплоты испарения растворителя [2]

$$P, \text{ Па}; \quad t, \text{ °С}; \quad r, \text{ кДж/кг}$$

Определим гидростатическую депрессию по корпусам (в °С)

$$\Delta_1'' = t_{1\text{cp}} - t_{\text{вп}1}; \quad \Delta_2'' = t_{2\text{cp}} - t_{\text{вп}2}; \quad \Delta_3'' = t_{3\text{cp}} - t_{\text{вп}3}.$$

Сумма гидростатических депрессий

$$\sum \Delta'' = \Delta''_1 + \Delta''_2 + \Delta''_3.$$

Температурную депрессию Δ' определим по уравнению

$$\Delta' = 0,38 e^{0,05+0,045x}. \quad (4)$$

где x - средняя концентрация раствора в корпусе.
Сумма температурных депрессий

$$\sum \Delta' = \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3.$$

Температуры кипения растворов в корпусах равны (в °С)

$$\begin{aligned} t_{к1} &= t_{г2} + \Delta'_1 + \Delta''_1 + \Delta'''_1; \\ t_{к2} &= t_{г3} + \Delta'_2 + \Delta''_2 + \Delta'''_2; \\ t_{к3} &= t_{ок} + \Delta'_1 + \Delta''_1 + \Delta'''_1. \end{aligned}$$

Определение тепловых нагрузок

Расход греющего пара в 1-й корпус D , производительность каждого корпуса по выпаренной воде W , тепловые нагрузки по корпусам Q и удельный расход греющего пара d определяются по следующим уравнениям:

$$Q_1 = D(I_{г1} - i_1) = W_1 r_1;$$

$$Q_2 = W_2 r_2;$$

$$Q_3 = W_3 r_3;$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3;$$

$$d = \frac{D}{W}.$$

Результаты расчета сведены в таблицу:

| Параметр | Корпус | | |
|---|--------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Производительность по испаряемой воде, w , кг/с | | | |
| Концентрация растворов, x , % | | | |
| Давление греющих паров, $P_{г}$ | | | |
| Температура греющих паров, $t_{г}$, °С | | | |
| Температурные потери, $\Sigma\Delta$, град | | | |
| Температура кипения раствора $t_{к}$, °С | | | |
| Полезная разность температур, $\Delta t_{п}$, град | | | |

Расчет коэффициентов теплопередачи

Коэффициенты теплопередачи в корпусах выпарной установки можно рассчитать по следующей эмпирической зависимости

$$K_{1,2,3} = \frac{2500}{e^{0,023+0,024x_{ср}}},$$

где $x_{ср}$ – средняя концентрация раствора в корпусах, %.

Распределение полезной разности температур

Полезные разности температур в корпусах установки находим из условия равенства их поверхностей теплопередачи

$$\Delta t_{пj} = \sum \Delta t_{п} \frac{\frac{Q_j}{K_j}}{\sum_{j=1}^3 \frac{Q}{K}}, \quad (5)$$

где $\Delta t_{пj}$, Q_j , K_j – соответственно полезная разность температур, тепловая нагрузка, коэффициент теплопередачи для j -го корпуса.

Проверим общую полезную разность температур установки:

$$\sum \Delta t_{\text{п}} = \Delta t_{\text{п1}} + \Delta t_{\text{п2}} + \Delta t_{\text{п3}}.$$

Теперь рассчитаем поверхность теплопередачи выпарных аппаратов по формуле (1).

2.3. Расчет барометрического конденсатора

Для создания вакуума в выпарных установках обычно применяют конденсаторы смешения с барометрической трубой. В качестве охлаждающего агента используют воду, которая подается в конденсатор чаще всего при температуре окружающей среды (около 20°C). Смесь охлаждающей воды и конденсата выливается из конденсатора по барометрической трубе. Для поддержания постоянства вакуума в системе из конденсатора с помощью вакуум-насоса откачивают неконденсирующиеся газы.

Необходимо рассчитать расход охлаждающей воды, основные размеры (диаметр и высоту) барометрического конденсатора и барометрической трубы, производительность вакуум-насоса.

Расход охлаждающей воды

Расход охлаждающей воды $G_{\text{в}}$ определяют из теплового баланса конденсатора:

$$G_{\text{в}} = \frac{w_3(I_{\text{бк}} - c_{\text{в}}t_{\text{к}})}{c_{\text{в}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})}, \quad (6)$$

где $I_{\text{бк}}$ – энтальпия паров в барометрическом конденсаторе, Дж/кг; $t_{\text{н}}$ – начальная температура охлаждающей воды, °C; $t_{\text{к}}$ – конечная температура смеси воды и конденсата, °C, $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг °C).

Разность температур между паром и жидкостью на выходе из конденсатора должна быть 3–5 град. Поэтому конечную температуру воды $t_{\text{к}}$ на выходе из конденсатора примем на 3 град ниже температуры конденсации паров.

Диаметр конденсатора

Диаметр барометрического конденсатора $d_{\text{бк}}$ определяют из

уравнения расхода

$$d_{\text{бк}} = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\rho\pi v}}, \quad (7)$$

где ρ – плотность паров, кг/м³; v – скорость паров, м/с.

При остаточном давлении в конденсаторе порядка 10^4 Па скорость паров $v = 15\text{--}25$ м/с.

Выбираем барометрический конденсатор диаметром $d_{\text{бк}}$ (см. приложение 3).

Высота барометрической трубы

В соответствии с нормами, внутренний диаметр барометрической трубы $d_{\text{бт}}$ равен 300 мм. Скорость воды в барометрической трубе

$$v = \frac{4(G_{\text{в}} + w_3)}{\rho\pi d_{\text{бт}}^2}.$$

Высота барометрической трубы

$$H_{\text{бт}} = \frac{B}{\rho_{\text{в}}g} + \left(1 + \sum \xi + \lambda \frac{H_{\text{бт}}}{d_{\text{бт}}}\right) \frac{v_{\text{в}}^2}{2g} + 0,5, \quad (8)$$

где B – вакуум в барометрическом конденсаторе, Па; $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений; λ – коэффициент трения в барометрической трубе; 0,5 – запас высоты на возможное изменение барометрического давления, м.

$$B = P_{\text{атм}} - P_{\text{бк}};$$

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} = 0,5 + 1,0 = 1,5,$$

где $\xi_{\text{вх}}, \xi_{\text{вых}}$ – коэффициенты местных сопротивлений на входе в трубу и на выходе из нее.

Коэффициент трения λ зависит от режима течения жидкости. Определим режим течения воды в барометрической трубе:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{в}} d_{\text{от}} \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}.$$

Для гладких труб

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}.$$

2.4. Расчет производительности вакуум-насоса

Производительность вакуум-насоса $G_{\text{возд}}$ определяется количеством газа (воздуха), который необходимо удалять из барометрического конденсатора:

$$G_{\text{возд}} = 2,5 \cdot 10^{-5} (w_3 + G_{\text{в}}) + 0,01 w_3, \quad (9)$$

где $2,5 \cdot 10^{-5}$ – количество газа, выделяющегося из 1 кг воды; 0,01 – количество газа, подсасываемого в конденсатор через неплотности, на 1 кг паров.

Объемная производительность вакуум-насоса равна

$$V_{\text{возд}} = \frac{R(273 + t_{\text{возд}}) G_{\text{возд}}}{M_{\text{возд}} P_{\text{возд}}}, \quad (10)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); $M_{\text{возд}}$ – молекулярная масса воздуха, кг/кмоль; $t_{\text{возд}}$ – температура воздуха, °С; $P_{\text{возд}}$ – парциальное давление сухого воздуха в барометрическом конденсаторе, Па.

Температуру воздуха рассчитывают по уравнению

$$t_{\text{возд}} = t_{\text{н}} + 4 + 0,1(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}).$$

Давление воздуха равно

$$P_{\text{возд}} = P_{\text{ок}} - P_{\text{п}},$$

где $P_{\text{п}}$ – давление сухого насыщенного пара (Па) при $t_{\text{возд}}$.

Зная объемную производительность $V_{\text{возд}}$ и остаточное давление $P_{\text{ок}}$, по каталогу подбираем вакуум-насос типа ВВН (см. приложение 4).

2.5. Расчет предварительного теплообменника

Расчет теплообменника сводится к определению поверхности теплопередачи в результате совместного решения следующих уравнений:

$$Q = KF\Delta t; \quad Q = G_{\text{н}} C_{\text{н}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) x_1.$$

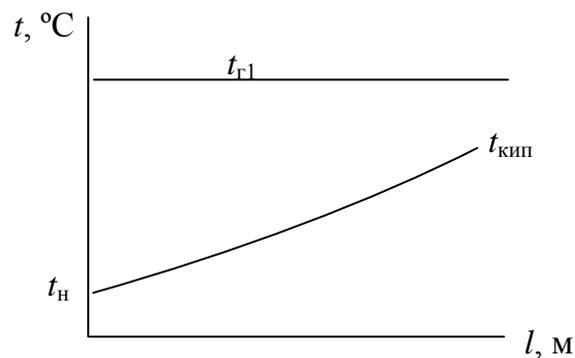
где $x_1 = 1,03 \div 1,05$ - потери тепла в окружающую среду.

Коэффициент теплопередачи принимается равным $K = 800 \div 1200 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Средняя разность температур определяется как среднелогарифмическая разность температур

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{\delta}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\bar{\delta}}}{\Delta t_{\text{м}}}}.$$

$\Delta t_{\bar{\delta}}$ и $\Delta t_{\text{м}}$ определяется по температурному графику



t – начальная температура раствора, поступающего в теплообменник; $t_{\text{кип}}$ – температура кипения раствора в 1-ом корпусе выпарной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И.** и др. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию /Под ред. Ю.И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

2. **Гребенюк С.М., Михеева Н.С., Грачев Ю.П.** и др. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств. – М.: Агропромиздат, 1987. – 304 с.

3. **Остриков А.Н., Абрамов О.В., Логинов О.В.** и др. Процессы и аппараты пищевых производств /Под ред. А.Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2012. –616 с.

**Свойства насыщенного водяного пара
(водяной пар в состоянии насыщения)**

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-3}, \text{Па}$ | $r, \text{кДж/кг}$ | $I, \text{кДж/кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 10 | 1,23 | 2476,9 | 2518,7 | 41,99 | 0,0094 |
| 11 | 1,31 | 2474,3 | 2520,4 | 46,19 | 0,0100 |
| 12 | 1,40 | 2472,3 | 2522,5 | 50,38 | 0,0106 |
| 13 | 1,50 | 2469,7 | 2524,2 | 54,57 | 0,0113 |
| 14 | 1,59 | 2467,6 | 2526,3 | 58,75 | 0,0120 |
| 15 | 1,71 | 2465,1 | 2527,9 | 62,94 | 0,0128 |
| 16 | 1,82 | 2462,6 | 2529,6 | 67,13 | 0,0136 |
| 17 | 1,94 | 2460,1 | 2531,3 | 71,31 | 0,0144 |
| 18 | 2,06 | 2457,6 | 2532,9 | 75,50 | 0,0153 |
| 19 | 2,19 | 2455,5 | 2535,0 | 79,68 | 0,0163 |
| 20 | 2,34 | 2453,0 | 2536,7 | 83,86 | 0,0173 |
| 21 | 2,49 | 2450,5 | 2538,4 | 88,04 | 0,0183 |
| 22 | 2,64 | 2448,4 | 2540,5 | 92,22 | 0,0194 |
| 23 | 2,82 | 2445,9 | 2542,2 | 96,41 | 0,0205 |
| 24 | 2,98 | 2443,8 | 2544,3 | 100,59 | 0,0217 |
| 25 | 3,17 | 2441,3 | 2546,9 | 104,77 | 0,0230 |
| 26 | 3,36 | 2438,8 | 2547,6 | 108,95 | 0,0243 |
| 27 | 3,56 | 2436,7 | 2549,7 | 113,13 | 0,0257 |
| 28 | 3,78 | 2434,2 | 2551,4 | 117,31 | 0,0272 |
| 29 | 4,00 | 2432,1 | 2553,5 | 121,48 | 0,0287 |
| 30 | 4,24 | 2429,6 | 2555,1 | 125,66 | 0,0304 |
| 31 | 4,46 | 2427,0 | 2556,8 | 129,84 | 0,0320 |
| 32 | 4,86 | 2424,9 | 2558,9 | 134,02 | 0,0338 |
| 33 | 5,10 | 2422,4 | 2560,6 | 138,20 | 0,0356 |
| 34 | 5,33 | 2419,9 | 2562,3 | 142,38 | 0,0376 |
| 35 | 5,63 | 2417,8 | 2564,3 | 146,56 | 0,0396 |
| 36 | 5,95 | 2415,3 | 2566,0 | 150,74 | 0,0417 |
| 37 | 6,27 | 2412,8 | 2567,7 | 154,92 | 0,0439 |
| 38 | 6,63 | 2410,7 | 2569,8 | 159,09 | 0,0462 |
| 39 | 6,99 | 2408,2 | 2571,5 | 163,27 | 0,0486 |
| 40 | 7,35 | 2405,7 | 2573,1 | 167,45 | 0,0511 |
| 41 | 7,75 | 2403,6 | 2575,2 | 171,63 | 0,0538 |
| 42 | 8,20 | 2401,1 | 2576,9 | 175,81 | 0,0565 |
| 43 | 8,64 | 2398,6 | 2578,6 | 179,99 | 0,0594 |
| 44 | 9,10 | 2396,1 | 2580,2 | 184,17 | 0,0623 |
| 45 | 9,57 | 2393,6 | 2581,9 | 188,35 | 0,0654 |
| 46 | 10,10 | 2391,0 | 2583,6 | 192,53 | 0,0686 |

Продолжение приложения 1

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-3}, \text{Па}$ | $r, \text{кДж/кг}$ | $I, \text{кДж/кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 47 | 10,62 | 2388,9 | 2585,7 | 196,71 | 0,0721 |
| 48 | 11,15 | 2386,4 | 2587,4 | 200,89 | 0,0756 |
| 49 | 11,75 | 2383,9 | 2598,0 | 205,07 | 0,0792 |
| 50 | 12,35 | 2381,8 | 2591,1 | 209,26 | 0,0830 |
| 51 | 12,99 | 2379,3 | 2592,8 | 213,44 | 0,0869 |
| 52 | 13,61 | 2376,8 | 2594,5 | 217,62 | 0,0911 |
| 53 | 14,40 | 2374,7 | 2596,6 | 221,80 | 0,0953 |
| 54 | 15,01 | 2372,2 | 2598,2 | 225,98 | 0,0997 |
| 55 | 15,75 | 2369,7 | 2599,9 | 230,17 | 0,1043 |
| 56 | 16,38 | 2367,6 | 2602,0 | 234,35 | 0,1092 |
| 57 | 17,30 | 2365,1 | 2603,7 | 238,54 | 0,1141 |
| 58 | 18,20 | 2362,6 | 2605,4 | 242,72 | 0,1193 |
| 59 | 19,05 | 2360,1 | 2607,0 | 246,92 | 0,1246 |
| 60 | 19,92 | 2357,6 | 2608,7 | 251,09 | 0,1301 |
| 61 | 20,84 | 2355,0 | 2610,4 | 255,28 | 0,1359 |
| 62 | 21,81 | 2352,5 | 2612,1 | 259,46 | 0,1419 |
| 63 | 22,81 | 2350,0 | 2613,7 | 263,65 | 0,1481 |
| 64 | 23,88 | 2347,5 | 2615,4 | 267,84 | 0,1545 |
| 65 | 25,01 | 2345,0 | 2617,1 | 272,02 | 0,1611 |
| 66 | 26,20 | 2342,5 | 2618,8 | 276,21 | 0,1681 |
| 67 | 27,38 | 2340,0 | 2620,4 | 280,40 | 0,1752 |
| 68 | 28,31 | 2337,5 | 2622,1 | 284,59 | 0,1826 |
| 69 | 29,80 | 2335,4 | 2624,2 | 289,78 | 0,1902 |
| 70 | 31,10 | 2332,9 | 2625,9 | 292,97 | 0,1979 |
| 71 | 32,45 | 2330,3 | 2627,6 | 297,16 | 0,2063 |
| 72 | 34,10 | 2327,8 | 2629,2 | 301,36 | 0,2147 |
| 73 | 35,45 | 2325,3 | 2630,9 | 305,55 | 0,2234 |
| 74 | 37,00 | 2322,8 | 2632,6 | 309,74 | 0,2325 |
| 75 | 38,45 | 2320,3 | 2634,2 | 313,94 | 0,2416 |
| 76 | 40,17 | 2317,8 | 2635,9 | 318,13 | 0,2514 |
| 77 | 41,90 | 2315,3 | 2637,6 | 322,33 | 0,2614 |
| 78 | 43,60 | 2312,8 | 2639,3 | 326,52 | 0,2716 |
| 79 | 45,50 | 2310,3 | 2640,9 | 330,72 | 0,2823 |
| 80 | 47,40 | 2307,7 | 2642,6 | 334,92 | 0,2929 |
| 81 | 49,40 | 2305,2 | 2644,3 | 339,11 | 0,3045 |
| 82 | 51,49 | 2302,7 | 2646,0 | 343,31 | 0,3162 |
| 83 | 53,40 | 2300,2 | 2647,5 | 347,51 | 0,3281 |
| 84 | 55,70 | 2297,7 | 2649,3 | 351,71 | 0,3406 |
| 85 | 57,60 | 2295,2 | 2651,0 | 355,92 | 0,3531 |
| 86 | 60,20 | 2292,7 | 2652,7 | 360,12 | 0,3665 |

Продолжение приложения 1

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-3}, \text{Па}$ | $r, \text{кДж/кг}$ | $I, \text{кДж/кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 87 | 62,40 | 2290,2 | 2654,3 | 364,32 | 0,3800 |
| 88 | 65,00 | 2287,6 | 2656,0 | 368,53 | 0,3941 |
| 89 | 67,50 | 2284,7 | 2657,3 | 378,73 | 0,4085 |
| 90 | 71,00 | 2282,2 | 2658,9 | 376,94 | 0,4229 |
| 91 | 72,70 | 2279,7 | 2660,6 | 381,15 | 0,4386 |
| 92 | 75,70 | 2277,2 | 2662,7 | 385,36 | 0,4543 |
| 93 | 78,40 | 2274,7 | 2664,4 | 389,57 | 0,4705 |
| 94 | 82,50 | 2272,2 | 2666,1 | 393,78 | 0,4871 |
| 95 | 84,50 | 2269,2 | 2667,3 | 397,99 | 0,5039 |
| 96 | 87,70 | 2266,7 | 2669,0 | 402,20 | 0,5218 |
| 97 | 91,00 | 2264,2 | 2670,7 | 406,42 | 0,5400 |
| 98 | 94,30 | 2261,7 | 2672,3 | 410,63 | 0,5586 |
| 99 | 97,70 | 2258,8 | 2673,6 | 414,85 | 0,5777 |
| 100 | 101,30 | 2256,3 | 2675,3 | 419,06 | 0,6974 |
| 101 | 104,99 | 2254,6 | 2677,9 | 423,28 | 0,6177 |
| 102 | 108,78 | 2252,0 | 2679,5 | 427,50 | 0,6384 |
| 103 | 112,67 | 2249,3 | 2681,0 | 431,73 | 0,6597 |
| 104 | 116,68 | 2246,6 | 2682,6 | 435,95 | 0,6817 |
| 105 | 120,80 | 2243,9 | 2684,1 | 440,17 | 0,7036 |
| 106 | 125,04 | 2241,3 | 2685,7 | 444,40 | 0,7273 |
| 107 | 129,41 | 2238,6 | 2687,2 | 448,63 | 0,7510 |
| 108 | 133,90 | 2235,9 | 2688,8 | 452,85 | 0,7754 |
| 109 | 138,52 | 2233,2 | 2690,3 | 457,08 | 0,8004 |
| 110 | 143,26 | 2230,5 | 2691,8 | 461,32 | 0,8254 |
| 111 | 148,14 | 2227,7 | 2693,3 | 465,55 | 0,8523 |
| 112 | 153,16 | 2225,0 | 2694,8 | 469,78 | 0,8793 |
| 113 | 158,32 | 2222,3 | 2696,3 | 474,02 | 0,9070 |
| 114 | 163,61 | 2219,5 | 2697,8 | 478,26 | 0,9354 |
| 115 | 169,05 | 2216,8 | 2699,3 | 482,50 | 0,9635 |
| 116 | 174,64 | 2214,1 | 2700,8 | 486,74 | 0,9942 |
| 117 | 180,38 | 2211,3 | 2702,2 | 490,98 | 1,0248 |
| 118 | 186,26 | 2208,5 | 2703,7 | 495,22 | 1,0561 |
| 119 | 192,33 | 2205,7 | 2705,2 | 499,47 | 1,0882 |
| 120 | 198,54 | 2202,9 | 2706,6 | 503,7 | 1,1199 |
| 121 | 204,91 | 2200,1 | 2708,1 | 508,0 | 1,1547 |
| 122 | 211,45 | 2197,3 | 2709,5 | 512,2 | 1,1892 |
| 123 | 218,15 | 2194,4 | 2710,3 | 516,5 | 1,2244 |
| 124 | 225,03 | 2191,6 | 2712,3 | 520,7 | 1,2606 |
| 125 | 232,09 | 2188,8 | 2713,3 | 525,0 | 1,2969 |
| 126 | 239,32 | 2186,0 | 2715,2 | 529,2 | 1,3354 |

Продолжение приложения 1

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-3}, \text{Па}$ | $r, \text{кДж/кг}$ | $I, \text{кДж/кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 127 | 246,74 | 2183,1 | 2716,6 | 533,5 | 1,3742 |
| 128 | 254,34 | 2180,1 | 2717,9 | 537,8 | 1,4138 |
| 129 | 263,13 | 2177,3 | 2719,3 | 542,0 | 1,4543 |
| 130 | 270,12 | 2174,4 | 2720,7 | 546,3 | 1,4959 |
| 131 | 278,30 | 2171,5 | 2722,1 | 550,6 | 1,5383 |
| 132 | 286,68 | 2168,6 | 2723,4 | 554,8 | 1,5817 |
| 133 | 295,27 | 2165,7 | 2724,8 | 559,1 | 1,6261 |
| 134 | 304,06 | 2162,7 | 2726,1 | 563,4 | 1,6715 |
| 135 | 313,06 | 2159,7 | 2727,4 | 567,7 | 1,7179 |
| 136 | 322,27 | 2156,8 | 2728,8 | 572,0 | 1,7653 |
| 137 | 331,71 | 2153,9 | 2730,1 | 576,2 | 1,8138 |
| 138 | 341,37 | 2150,9 | 2731,4 | 580,5 | 1,8632 |
| 139 | 351,25 | 2147,9 | 2732,7 | 584,8 | 1,9139 |
| 140 | 361,36 | 2144,9 | 2734,0 | 589,1 | 1,9656 |
| 141 | 371,70 | 2141,8 | 2735,2 | 593,4 | 2,0184 |
| 142 | 382,28 | 2138,8 | 2736,5 | 597,7 | 2,0723 |
| 143 | 383,11 | 2135,8 | 2737,8 | 602,0 | 2,1275 |
| 144 | 404,18 | 2132,7 | 2739,0 | 606,3 | 2,1838 |
| 145 | 415,50 | 2129,7 | 2740,3 | 610,6 | 2,2491 |
| 146 | 427,07 | 2126,6 | 2741,5 | 614,9 | 2,2999 |
| 147 | 348,90 | 2123,5 | 2742,5 | 619,2 | 2,3598 |
| 148 | 450,99 | 2120,4 | 2743,9 | 623,5 | 2,4209 |
| 149 | 463,34 | 2117,3 | 2745,1 | 627,8 | 2,4833 |
| 150 | 475,97 | 2114,1 | 2746,3 | 632,2 | 2,5471 |
| 151 | 488,87 | 2111,0 | 2747,5 | 636,5 | 2,6121 |
| 152 | 502,05 | 2107,9 | 2748,7 | 640,8 | 2,6783 |
| 153 | 515,52 | 2104,7 | 2749,8 | 645,1 | 2,7460 |
| 154 | 529,26 | 2101,5 | 2751,0 | 649,5 | 2,8150 |
| 155 | 543,31 | 2098,3 | 2752,1 | 653,8 | 2,8855 |
| 156 | 557,64 | 2095,2 | 2753,3 | 658,1 | 2,9573 |
| 157 | 572,28 | 2092,0 | 2754,4 | 662,4 | 3,0305 |
| 158 | 587,22 | 2088,7 | 2755,5 | 666,8 | 3,1051 |
| 159 | 602,48 | 2085,5 | 2756,6 | 671,1 | 3,1813 |
| 160 | 618,04 | 2082,2 | 2757,7 | 675,5 | 3,2589 |
| 161 | 633,93 | 2079,0 | 2758,8 | 679,8 | 3,3381 |
| 162 | 650,14 | 2075,6 | 2759,8 | 684,2 | 3,4188 |
| 163 | 666,68 | 2072,4 | 2760,9 | 688,5 | 3,5010 |
| 164 | 683,55 | 2069,0 | 2761,9 | 692,9 | 3,5847 |
| 165 | 700,75 | 2065,7 | 2763,0 | 697,3 | 3,6702 |
| 166 | 718,30 | 2062,4 | 2764,0 | 701,6 | 3,7573 |

Продолжение приложения 1

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-3}, \text{Па}$ | $r, \text{кДж/кг}$ | $I, \text{кДж/кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 167 | 736,20 | 2059,0 | 2765,0 | 706,0 | 3,8460 |
| 168 | 754,45 | 2055,6 | 2766,0 | 710,4 | 3,9364 |
| 169 | 773,05 | 2052,3 | 2767,0 | 714,7 | 4,0284 |
| 170 | 792,02 | 2048,9 | 2768,0 | 719,1 | 4,1222 |
| 171 | 811,39 | 2045,4 | 2768,9 | 723,5 | 4,2176 |
| 172 | 831,06 | 2042,0 | 2769,9 | 727,9 | 4,3148 |
| 173 | 851,14 | 2038,5 | 2770,8 | 732,3 | 4,4140 |
| 174 | 871,61 | 2035,1 | 2771,8 | 736,7 | 4,5149 |
| 175 | 892,46 | 2031,6 | 2772,7 | 741,1 | 4,6176 |
| 176 | 913,70 | 2028,1 | 2773,6 | 745,5 | 4,7236 |
| 177 | 935,34 | 2024,6 | 2774,6 | 749,9 | 4,8286 |
| 178 | 957,39 | 2021,0 | 2775,3 | 754,3 | 4,9374 |
| 179 | 979,84 | 2017,5 | 2776,2 | 758,7 | 5,0474 |
| 180 | 1002,70 | 2014,0 | 2777,1 | 763,1 | 5,1596 |

Приложение 2

**Основные размеры выпарных аппаратов
(по ГОСТ 11987-81)**

F – номинальная поверхность теплообмена; D – диаметр греющей камеры; D_1 – диаметр сепаратора; D_2 – диаметр циркуляционной трубы; H – высота аппарата; H_1 – высота парового пространства; d – диаметр трубы; l – длина трубы; M – масса аппарата.

Техническая характеристика выпарного аппарата с естественной циркуляцией и соосной греющей камерой (тип 1, исполнение 1)

| $F, \text{м}^2$ | | $D,$ мм, не менее | $D_1,$ мм, не более | $D_2,$ мм, не более | $H,$ мм, не более | $M,$ кг, не более |
|-----------------|----------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| $l=3000$ мм | $l=4000$ мм | | | | | |
| 10 | - | 400 | 600 | 250 | 10500 | 1000 |
| 16 | - | 600 | 800 | 300 | 10500 | 1200 |
| 25 | - | 600 | 1000 | 400 | 11000 | 2200 |
| 40 | - | 800 | 1200 | 500 | 11000 | 3000 |
| 63 | - | 1000 | 1400 | 600 | 11500 | 4800 |
| 100 | - | 1000 | 1800 | 700 | 11500 | 6000 |
| - | 160 | 1200 | 2400 | 1200 | 12500 | 8600 |
| - | 250 | 1400 | 3000 | 1400 | 12500 | 13000 |
| - | 400 | 1800 | 3800 | 1800 | 12500 | 21000 |

Примечания. 1. Высота парового пространства H_1 – не более 2000 мм. 2. Условное давление в греющей камере – от 0,014 до 1,6 МПа, в сепараторе – от 0,0054 до 1,0 МПа. 3. Диаметр трубы $d = 38 \times 2$ мм

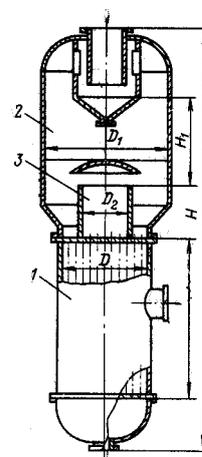


Схема аппарата (тип 1, исполнение 1):
1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – распределительная камера

Продолжение приложения 2

Техническая характеристика выпарного аппарата с естественной циркуляцией и выносной греющей камерой (тип 1, исполнение 2)

| F, м ² | | D, мм, не менее | D ₁ , мм, не более | D ₂ , мм, не более | H, мм, не более | M, кг, не более |
|-------------------|----------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| l=4000мм | l=5000мм | | | | | |
| 10 | - | 400 | 600 | 200 | 12000 | 1700 |
| 16 | - | 400 | 800 | 250 | 12000 | 2500 |
| 25 | - | 600 | 1000 | 300 | 12500 | 3000 |
| 40 | - | 600 | 1200 | 400 | 12500 | 4700 |
| 63 | - | 800 | 1600 | 500 | 13000 | 7500 |
| 100 | 112 | 1000 | 1800 | 600 | 13000 | 8500 |
| 125 | 140 | 1000 | 2200 | 700 | 13500 | 11500 |
| 160 | 180 | 1200 | 2400 | 700 | 13500 | 12000 |
| 200 | 224 | 1200 | 2800 | 800 | 14500 | 14800 |
| 250 | 280 | 1400 | 3200 | 900 | 14500 | 15000 |
| 315 | 355 | 1600 | 3600 | 1000 | 15000 | 21000 |
| - | 400 | 1600 | 3800 | 1000 | 15000 | 26500 |
| - | 450 | 1600 | 4000 | 1000 | 15000 | 31800 |
| - | 500 | 1600 | 4500 | 1200 | 16500 | 33000 |
| - | 560 | 1800 | 4500 | 1200 | 17000 | 38300 |
| - | 630 | 1800 | 5000 | 1200 | 17000 | 40000 |
| - | 710 | 2000 | 5000 | 1400 | 18000 | 50000 |
| - | 800 | 2000 | 5000 | 1400 | 18000 | 55000 |

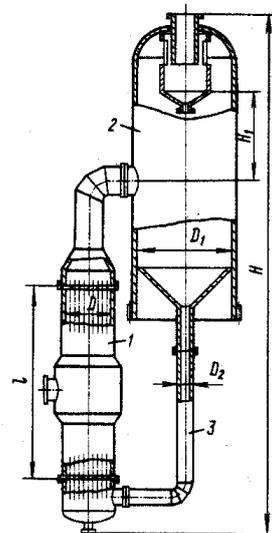


Схема аппарата (тип 1, исполнение 2):
1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – циркуляционная труба

Примечания. 1. Высота парового пространства H_1 – не более 2500 мм. 2. Условное давление в греющей камере – от 0,014 до 1,0 МПа, в сепараторе – от 0,0054 до 1,0 МПа. 3. Диаметр трубы $d = 38 \times 2$ мм

Техническая характеристика выпарного аппарата с естественной циркуляцией, соосной греющей камерой и солеотделением (тип 1, исполнение 3)

| F, м ² | | D, мм, не менее | D ₁ , мм, не более | D ₂ , мм, не более | H, мм, не более | M, кг, не более |
|-------------------|-----------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| l=4000 мм | l=6000 мм | | | | | |
| 10 | - | 400 | 600 | 200 | 14500 | 1900 |
| 16 | - | 400 | 800 | 250 | 14500 | 2500 |
| 25 | - | 600 | 1000 | 300 | 14500 | 2700 |
| 40 | 50 | 600 | 1200 | 400 | 15500 | 3000 |
| 63 | 80 | 800 | 1600 | 500 | 15500 | 3500 |
| 100 | 112 | 1000 | 1800 | 600 | 15500 | 5200 |
| 125 | 140 | 1000 | 2200 | 700 | 16000 | 10000 |
| 160 | 180 | 1200 | 2400 | 700 | 16000 | 12500 |
| 200 | 224 | 1200 | 2800 | 800 | 16000 | 15000 |
| 250 | 280 | 1400 | 3200 | 900 | 16500 | 20000 |
| 315 | 355 | 1600 | 3600 | 1000 | 17500 | 23000 |
| - | 400 | 1600 | 3800 | 1000 | 17500 | 30000 |
| - | 450 | 1600 | 4000 | 1000 | 18000 | 31500 |
| - | 500 | 1600 | 4500 | 1200 | 18000 | 33000 |
| - | 560 | 1600 | 4500 | 1200 | 18000 | 40000 |
| - | 630 | 1800 | 5000 | 1200 | 19000 | 43500 |
| - | 710 | 1800 | 5600 | 1400 | 19000 | 48500 |
| - | 800 | 2000 | 5600 | 1400 | 19000 | 50000 |

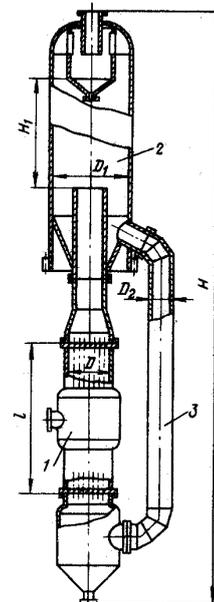
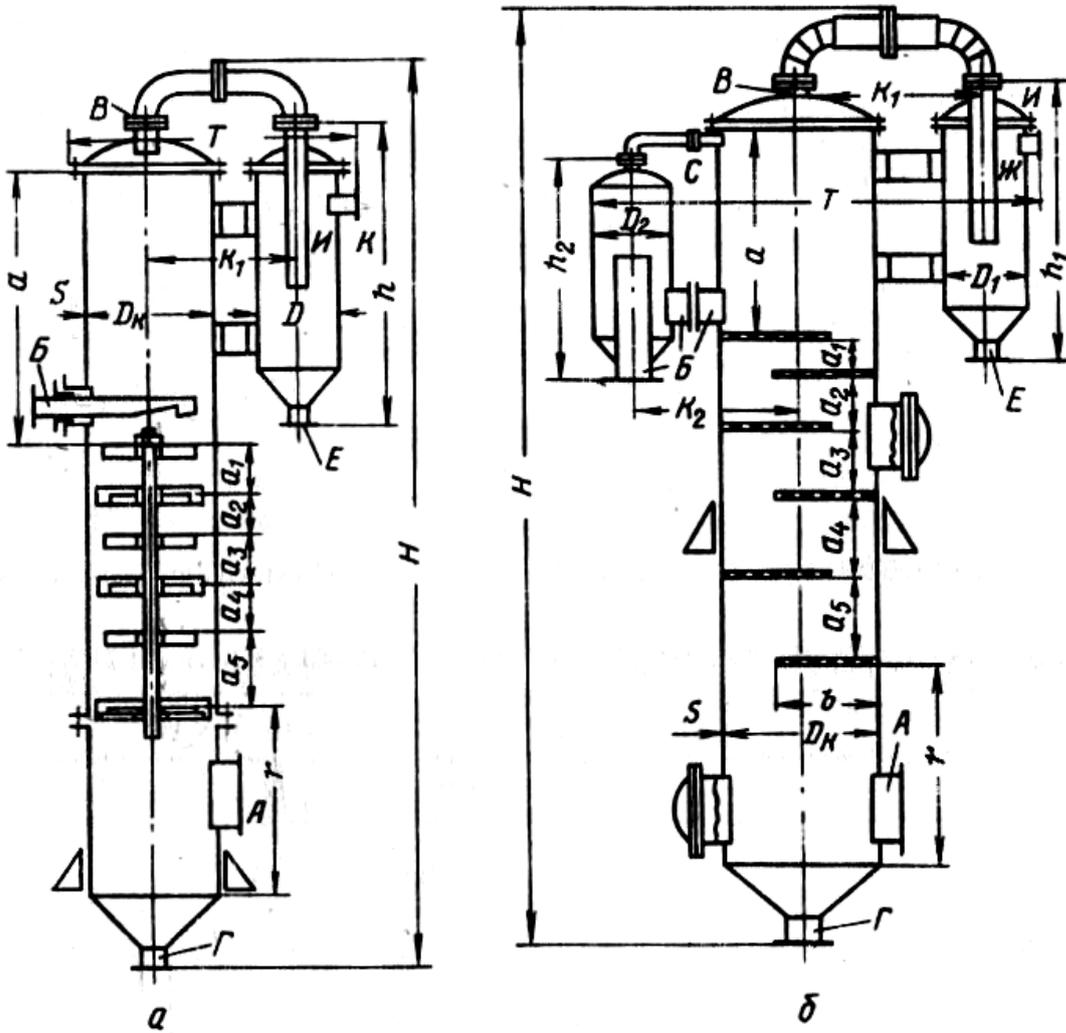


Схема аппарата (тип 1, исполнение 3):
1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – циркуляционная труба

Примечания. 1. Высота парового пространства H_1 – не более 2500 мм. 2. Условное давление в греющей камере – от 0,014 до 1,6 МПа, в сепараторе – от 0,0054 до 1,6 МПа. 3. Диаметр трубы $d = 38 \times 2$ мм

Основные размеры барометрических конденсаторов

| Размеры | Внутренний диаметр конденсатора $d_{\text{ок}}$, мм | | | | | | |
|--|--|------|------|------|------|------|------|
| | 500 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1600 | 2000 |
| Толщина стенки аппарата S | 5 | 5 | 5 | 6 | | 6 | 10 |
| Расстояние от верхней полки до крышки аппарата a | 1300 | 1300 | 130 | 1300 | 1300 | 1300 | 13 |
| Расстояние от нижней полки до днища аппарата r | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| Ширина полки b | – | – | 500 | 650 | 750 | 1000 | 1250 |
| Расстояние между осями конденсатора и ловушки: | | | | | | | |
| K_1 | 675 | 725 | 950 | 1100 | 1200 | 1450 | 1650 |
| K_2 | – | – | 835 | 935 | 1095 | 1355 | 1660 |
| Высота установки H | 4300 | 4550 | 5080 | 5680 | 6220 | 7530 | 8500 |
| Ширина установки T | 1300 | 1400 | 2350 | 2600 | 2975 | 3200 | 3450 |
| Диаметр ловушки D | 400 | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 800 |
| Высота ловушки h | 1440 | 1440 | 1700 | 1900 | 2100 | 2300 | 2300 |
| Диаметр ловушки D_1 | – | – | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 |
| Высота ловушки h_1 | – | – | 1350 | 1350 | 1400 | 1450 | 1550 |
| Расстояние между полками: | | | | | | | |
| a_1 | 220 | 260 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 |
| a_2 | 260 | 300 | 260 | 320 | 400 | 500 | 650 |
| a_3 | 320 | 360 | 320 | 400 | 480 | 640 | 800 |
| a_4 | 360 | 400 | 380 | 475 | 575 | 750 | 950 |
| a_5 | 390 | 430 | 440 | 550 | 660 | 880 | 1070 |
| Условные проходы штуцеров: | | | | | | | |
| для входа пара (А) | 300 | 350 | 350 | 400 | 450 | 600 | 800 |
| для входа воды (Б) | 100 | 125 | 200 | 200 | 250 | 300 | 400 |
| для выхода парогазовой смеси (В) | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 200 | 250 |
| для барометрической трубы (Г) | 125 | 150 | 200 | 200 | 250 | 300 | 400 |
| для воздушник (С) | – | – | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| для входа парогазовой смеси (И) | 80 | 100 | 180 | 150 | 260 | 200 | 250 |
| для выхода парогазовой смеси (Ж) | 50 | 70 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| для барометрической трубы (Е) | 50 | 50 | 70 | 70 | 80 | 80 | 100 |



Схемы барометрических конденсаторов:

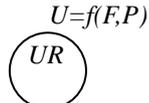
а – с concentрическими полками (изготавливаются диаметром 500 и 600 мм);
 б – с сегментными полками (изготавливаются диаметром 800 и 2000 мм)

Техническая характеристика вакуум-насосов типа ВВН

| Типоразмер | Остаточное давление, мм рт. ст. | Производительность, м ³ /мин | Мощность на валу, кВт |
|------------|---------------------------------|---|-----------------------|
| ВВН-0,75 | 110 | 0,75 | 1,3 |
| ВВН-1,5 | 110 | 1,5 | 2,1 |
| ВВН-3 | 75 | 3 | 6,5 |
| ВВН-6 | 38 | 6 | 12,5 |
| ВВН-12 | 23 | 12 | 20 |
| ВВН-25 | 15 | 25 | 48 |
| ВВН-50 | 15 | 50 | 94 |

| № п/п | Обозначение | Прибор |
|-------|---|--|
| 1 |  | Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту отбора сигнала (термометр термоэлектрический (термопара), термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра, датчик пирометра и т. п.) |
| 2 |  | Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите (милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический и т. п.) |
| 3 |  | Прибор для измерения температуры с автоматическим обегаяющим устройством, регистрирующий, установленный на щите (многоточечный самопишущий потенциометр, мост автоматический и т. п.) |
| 4 |  | Прибор для измерения перепада давления показывающий, установленный по месту (дифманометр показывающий и т. п.) |
| 5 |  | Прибор для измерения соотношения расходов регистрирующий, установленный на щите (любой вторичный прибор для регистрации соотношения потоков) |

Продолжение приложения 5

| № п/п | Обозначение | Прибор |
|-------|---|---|
| 6 |  | Прибор для измерения любой электрической величины, установленный по месту * |
| 7 |  | Прибор для измерения качества продукта показывающий, установленный по месту (например: газоанализатор показывающий для контроля содержания кислорода в дымовых газах) |
| 8 |  | Прибор для измерения качества продукта регистрирующий, регулирующий, установленный на щите (например: вторичный самопишущий прибор регулятора концентрации серной кислоты в растворе) |
| 9 |  | Прибор для измерения нескольких разнородных величин регистрирующий, установленный по месту (например: самопишущий дифманометр-расходомер с дополнительной записью давления; надпись, расшифровывающая измеряемые величины, наносится справа от прибора) |
| 10 |  | Прибор для измерения уровня показывающий, с контактным устройством, установленный на щите (например: вторичный прибор с сигнальным устройством; буквы H и L означают сигнализацию верхнего и нижнего уровней) |

Надписи, расшифровывающие конкретную измеряемую электрическую величину, располагают либо рядом с прибором, либо в виде таблицы на поле чертежа.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ | 3 |
| 1.1. Содержание и объем курсового проекта | 3 |
| 1.2. Последовательность выполнения курсового проекта | 7 |
| 1.3. Оформление пояснительной записки | 8 |
| 1.4. Графическая часть курсового проекта | 9 |
| 1.5. Защита курсового проекта | 11 |
| 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРЕХКОРПУСНОЙ ВАКУУМ-ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ | 13 |
| 2.1. Введение | 14 |
| 2.2. Определение поверхности теплопередачи выпарных аппаратов | 16 |
| 2.3. Расчет барометрического конденсатора | 22 |
| 2.4. Расчет производительности вакуум-насоса | 24 |
| 2.5. Расчет предварительного теплообменника | 25 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 26 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ 1–5..... | 27 |



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития **на 2009–2018 годы**. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Институт холода и биотехнологий является преемником Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), который в ходе реорганизации (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 2209 от 17 августа 2011г.) в январе 2012 года был присоединен к Санкт-Петербургскому национальному исследовательскому университету информационных технологий, механики и оптики.

Созданный 31 мая 1931года институт стал крупнейшим образовательным и научным центром, одним из ведущих вузов страны в области холодильной, криогенной техники, технологий и в экономике пищевых производств.

В институте обучается более 6500 студентов и аспирантов. Коллектив преподавателей и сотрудников составляет около 900 человек, из них 82 доктора наук, профессора; реализуется более 40 образовательных программ.

Действуют 6 факультетов:

- холодильной техники;
- пищевой инженерии и автоматизации;
- пищевых технологий;
- криогенной техники и кондиционирования;

- экономики и экологического менеджмента;
- заочного обучения.

За годы существования вуза сформировались известные во всем мире научные и педагогические школы. В настоящее время фундаментальные и прикладные исследования проводятся по 20 основным научным направлениям: научные основы холодильных машин и термо-трансформаторов; повышение эффективности холодильных установок; газодинамика и компрессоростроение; совершенствование процессов, машин и аппаратов криогенной техники; теплофизика; теплофизическое приборостроение; машины, аппараты и системы кондиционирования; хладостойкие стали; проблемы прочности при низких температурах; твердотельные преобразователи энергии; холодильная обработка и хранение пищевых продуктов; тепломассоперенос в пищевой промышленности; технология молока и молочных продуктов; физико-химические, биохимические и микробиологические основы переработки пищевого сырья; пищевая технология продуктов из растительного сырья; физико-химическая механика и тепло-и массообмен; методы управления технологическими процессами; техника пищевых производств и торговли; промышленная экология; от экологической теории к практике инновационного управления предприятием.

В институте создан информационно-технологический комплекс, включающий в себя технопарк, инжиниринговый центр, проектно-конструкторское бюро, центр компетенции «Холодильщик», научно-образовательную лабораторию инновационных технологий. На предприятиях холодильной, пищевых отраслей реализовано около тысячи крупных проектов, разработанных учеными и преподавателями института.

Ежегодно проводятся международные научные конференции, семинары, конференции научно-технического творчества молодежи.

Издаются журнал «Вестник Международной академии холода» и электронные научные журналы «Холодильная техника и кондиционирование», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент».

В вузе ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по 11 специальностям.

Действуют два диссертационных совета, которые принимают к защите докторские и кандидатские диссертации.

Вуз является активным участником мирового рынка образовательных и научных услуг.

www.ihbt.edu.ru

Константин Михайлович Федоров
Юлия Николаевна Гуляева

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Часть 2

ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Р.А. Сафарова

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

*Печатается
в авторской редакции*

Подписано в печать 25.06.2014. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,31
Тираж 150 экз. Заказ № С 42

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9