

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович  
Должность: ректор ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ  
Дата подписания: 26.04.2021 13:15:53  
Уникальный идентификатор документа:  
5b8335c1f3d6e7bd91a51b28834cdf2b81866538

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Саратовский государственный аграрный университет  
имени Н.И. Вавилова»

## **РАСЧЕТ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК**

Методические указания  
для курсовой работы  
по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств»  
19.03.03 Продукты питания животного происхождения

Процессы и аппараты пищевых производств: методические указания для выполнения курсовых работ для обучающихся 3 курса направления подготовки 19.03.03 Продукты питания животного происхождения / Под ред. Моргуновой Н.Л.// Сост. Скрябина Л.Ю., Белова М.В., Моргунова Н.Л.//ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ.- Саратов, 2019.- 27с.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств» и предназначены для обучающихся 3 курса направления подготовки 19.03.03 Продукты питания животного происхождения, содержат краткое описание курсовых работ по процессам пищевой промышленности и их расчетам. Направлены на формирование у студентов навыков использования знаний законов тепломассообмена и правил эксплуатации теплотехнического оборудования при решении инженерных задач.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Процессы пищевой технологии в большинстве своем значительно сложны и представляют собой сочетание гидродинамических, тепловых, массообменных и механических процессов. При выполнении курсовой работы студентом проводится анализ и расчет процесса, определение его оптимальных параметров, а также производится разработка и расчет аппаратуры для проведения процесса.

## **ВЫПАРИВАНИЕ**

Выпаривание – это процесс повышения концентрации растворов твердых нелетучих веществ путем частичного испарения растворителя при кипении жидкости. Выпаривание применяют для повышения концентрации растворов нелетучих веществ, выделения из растворов чистого растворителя (дистилляция) и кристаллизации растворенных веществ, т.е. нелетучих веществ в твердом виде. В качестве примера выпаривания с выделением чистого растворителя из раствора можно привести опреснение морской воды, когда образующийся водяной пар конденсируют и полученную воду используют для различных целей. Для нагревания выпариваемых растворов до кипения используют топочные газы, электрообогрев и высокотемпературные теплоносители, но наибольшее применение находит водяной пар, характеризующийся высокой удельной теплотой конденсации и высоким коэффициентом теплоотдачи. Процесс выпаривания проводится в выпарных аппаратах. По принципу работы выпарные аппараты разделяются на периодические и непрерывно действующие. Периодическое выпаривание применяется при малой производительности установки или для получения высоких концентраций. При этом подаваемый в аппарат раствор выпаривается до необходимой концентрации, сливается и аппарат загружается новой порцией исходного раствора. В установках непрерывного действия исходный раствор непрерывно подается в аппарат, а упаренный раствор непрерывно выводится из него. В химической промышленности в основном применяют непрерывно действующие выпарные установки с высокой производительностью за счет большой поверхности нагрева (до 2500 м<sup>2</sup> в единичном аппарате). Наибольшее применение в химической технологии нашли выпарные аппараты поверхностного типа, особенно вертикальные трубчатые выпарные аппараты с паровым обогревом непрерывного действия. В зависимости от режима движения кипящей жидкости в выпарных аппаратах их разделяют на аппараты со свободной, естественной и принудительной циркуляцией, пленочные выпарные аппараты, к которым относятся и аппараты роторного типа. В данном проекте используется аппарат с естественной циркуляцией, с вынесенной греющей камерой и трубой вскипания. В этом аппарате циркуляция раствора осуществляется за счет различия плотностей в отдельных точках аппарата.

Выпариваемый раствор, поднимаясь по трубам, нагревается и по мере подъема вскипает. Образовавшаяся парожидкостная смесь направляется в сепаратор, где происходит разделение жидкой и паровой фаз. Высота парового пространства должна обеспечивать сепарацию из пара капелек

жидкости, выбрасываемых из кипяtilьных труб. Вторичный пар, проходя сепаратор и брызгоотделитель, освобождается от капель, а раствор возвращается по циркуляционной трубе в греющую камеру. В таких аппаратах облегчается очистка поверхности от отложений, т.к. доступ к трубам легко осуществляется при открытой верхней крышке греющей камеры.

Поскольку циркуляционная труба не обогревается, создаются условия для интенсивной циркуляции раствора. При этом плотность раствора в выносной циркуляционной трубе больше, чем в циркуляционных трубах, размещенных в греющих камерах, что обеспечивает сравнительно высокую скорость циркуляции раствора и препятствует образованию отложений на поверхности нагрева.

### **СПОСОБЫ ВЫПАРИВАНИЯ**

Тепло для выпаривания можно подводить любыми теплоносителями, применяемыми при нагревании. Однако в подавляющем большинстве случаев в качестве греющего агента при выпаривании используют водяной пар, который называют *греющим* или *первичным*.

(Первичным служит либо пар, получаемый из парогенератора, либо отработанный пар, или пар промежуточного отбора паровых турбин).

Пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора, называется *вторичным*.

Тепло необходимое для выпаривания раствора, обычно подводится через стенку, отделяющую теплоноситель от раствора.

Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлениях. Выбор давления, связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.

Выпаривание *под вакуумом* имеет определённые преимущества перед выпариванием при атмосферном давлении, несмотря на то, что теплота испарения раствора несколько возрастает с понижением: давления и соответственно увеличивается расход пара на выпаривание 1 кг растворителя (воды).

При выпаривании под вакуумом становится возможным проводить процесс при более низких температурах, что важно в случае концентрирования растворов веществ, склонных к разложению при повышенных температурах. Кроме того, при разрежении увеличивается полезная разность температур между греющим агентом и раствором, что позволяет уменьшить поверхность нагрева аппарата (при прочих равных условиях). В случае одинаковой полезной разности температур при выпаривании под вакуумом можно использовать греющий агент более низких рабочих параметров (температура и давление). Вследствие этого выпаривание под вакуумом широко применяют для концентрирования высококипящих растворов, например растворов щелочей, а также для

концентрирования растворов с использованием теплоносителя (пара) невысоких параметров.

Применение вакуума дает возможность использовать в качестве греющего агента, кроме первичного пара, вторичный пар самой выпарной установки, что снижает расход первичного греющего пара. Вместе с тем при применении вакуума удорожается выпарная установка, поскольку требуются дополнительные затраты на устройства для создания вакуума (конденсаторы, ловушки, вакуум-насосы), а также увеличиваются эксплуатационные расходы.

При выпаривании *под давлением выше атмосферного* также можно использовать вторичный пар, как для выпаривания, так и для других нужд, не связанных с процессом выпаривания.

Вторичный пар, отбираемый на сторону, называют *экстрапаром*. Отбор экстрапара при выпаривании под избыточным давлением позволяет лучше использовать тепло, чем при выпаривании под вакуумом. Однако выпаривание под избыточным давлением сопряжено с повышением температуры кипения раствора. Поэтому данный способ применяется лишь для выпаривания термически стойких веществ. Кроме того, для выпаривания под давлением необходимы греющие агенты с более высокой температурой.

При выпаривании *под атмосферным давлением* вторичный пар не используется и обычно удаляется в атмосферу. Такой способ выпаривания является наиболее простым, но наименее экономичным.

**Однократное выпаривание** проводится в установке, изображенной на рис.1

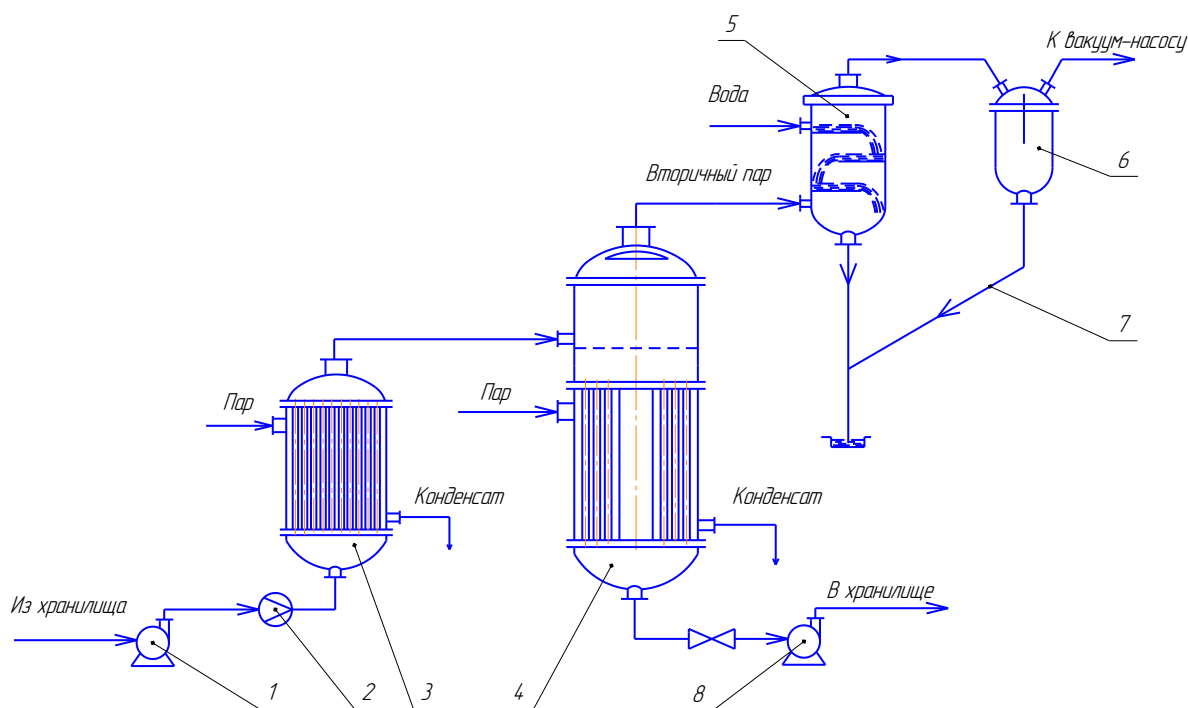


Рис. 1 Однокорпусная выпарная установка

1, 8 – насосы; 2 – расходомер; 3 – теплообменник; 4 – однокорпусной выпарной аппарат; 5 – барометрический конденсатор; 6 – ловушка; 7 – барометрическая труба.

Работа установки: исходный раствор поступает из хранилища с помощью насоса через расходомер в теплообменник, где подогревается практически до температуры кипения. Далее раствор поступает в корпус выпарного аппарата, где сгущается до заданной концентрации. По мере выпаривания непрерывно или периодически вводится свежий раствор до тех пор, пока увариваемая масса заполнит весь аппарат. Упаренный раствор выпускают, и аппарат заполняют новой порцией раствора. Вторичный пар поступает в конденсатор, а несконденсированные пары поступают в ловушку.

Корпус выпарного аппарата состоит из калоризатора (I), сепаратора (II) и отбойника (III). Наиболее распространенная конструкция выпарного аппарата с вертикальными кипячительными трубками и внутренней циркуляционной трубой. Трубки (длиной 2 – 4м) развальцованы в двух трубных решетках. Межтрубное пространство ограничивается цилиндрическими стенками аппарата и образует паровую камеру, куда подается греющий пар. Из межтрубного пространства внизу камеры отводится конденсат греющего пара. В аппаратах этого типа выпаривание осуществляется при естественной многократной циркуляции раствора. Основным достоинством таких аппаратов является улучшение теплоотдачи к раствору при его многократной организованной циркуляции в замкнутом контуре, уменьшающей скорость отложения накипи на поверхности труб.

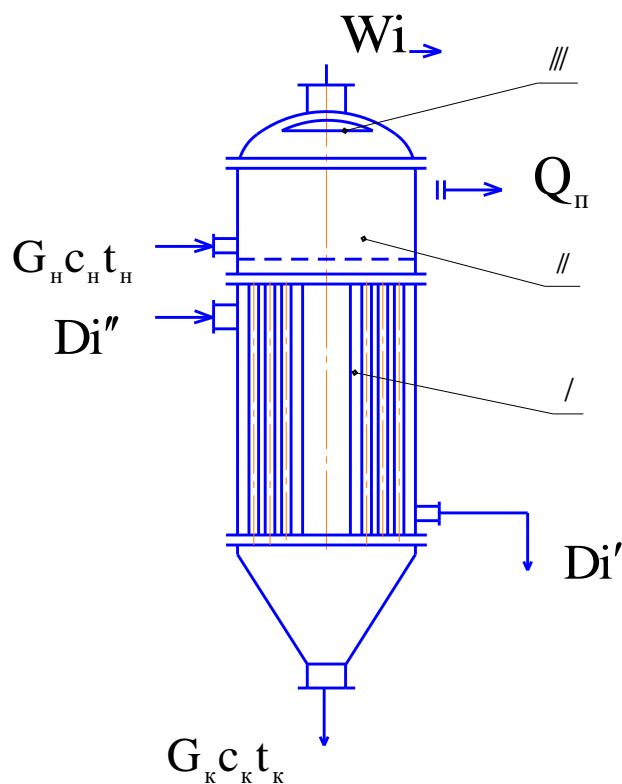


Рис. 2 Корпус выпарного аппарата

Кроме того, большинство этих аппаратов компактны. Занимают небольшую производственную площадь, удобны для осмотра и ремонта. Раствор поступает в аппарат над верхней трубной решеткой и опускается по циркуляционной трубе вниз, затем поднимается по кипяtilьным трубам и на некотором расстоянии от их нижнего края вскипает. Поэтому на большей части длины труб происходит движение вверх парожидкостной смеси, содержание пара в которой возрастает по мере ее движения. Вторичный пар поступает в сепарационное (паровое) пространство, где с помощью отбойника, изменяющего направление движения парового потока, от пара под действием инерционных сил отделяется унесенная им влага. После этого вторичный пар удаляется через штуцер сверху аппарата.

Упаренный раствор удаляется через нижний штуцер конического днища аппарата в качестве промежуточного или конечного продукта.

Циркуляция раствора в аппарате происходит вследствие разности плотностей раствора в циркуляционной трубе и парожидкостной смеси в кипяtilьных трубах. Возникновение достаточной разности плотностей обусловлено тем, что поверхность теплообмена каждой кипяtilьной трубы, приходящаяся на единицу объема выпариваемого раствора, значительно больше, чем у циркуляционной трубы, так как поверхность трубы находится в линейной зависимости от ее диаметра, а объем жидкости в трубе пропорционален квадрату ее диаметра. Следовательно, парообразование в кипяtilьных трубах должно протекать значительно интенсивней, чем в циркуляционной трубе, а плотность раствора в них будет ниже, чем в этой трубе. В результате обеспечивается естественная циркуляция, улучшающая теплопередачу и препятствующая образованию накипи на поверхности теплообмена.

В аппаратах этой конструкции циркуляционная труба, как и кипяtilьные трубы, обогревается паром, что снижает разность плотностей раствора и парожидкостной смеси и может приводить к нежелательному парообразованию в самой циркуляционной трубе. Чтобы увеличить разность плотностей используют конструкцию либо с выносной греющей камерой, либо с выносной циркуляционной трубой. Их недостатком является также жесткое крепление кипяtilьных труб, не допускающее значительной разности тепловых удлинений труб и корпуса аппарата.

Процесс выпаривания представлен на графике (рис. 3).

1 – температура перегретого пара, влетающего в калоризатор.

1 – 2 – охлаждение перегретого пара.

2 – 3 – конденсация пара в калоризаторе.

3 – 4 – охлаждение конденсата.

5 – 6 – практически принимаем в расчетах, что пар не перегрет, а конденсат не охлаждается.

7 – раствор начинает нагреваться.

9 – точка кипения раствора на поверхности.

8 – средняя точка кипения раствора – ей соответствует  $t_{ср}$ .

10 – точка температуры вторичного пара у поверхности кипящего раствора.  
 11 – точка температуры вторичного пара у входа в конденсатор.

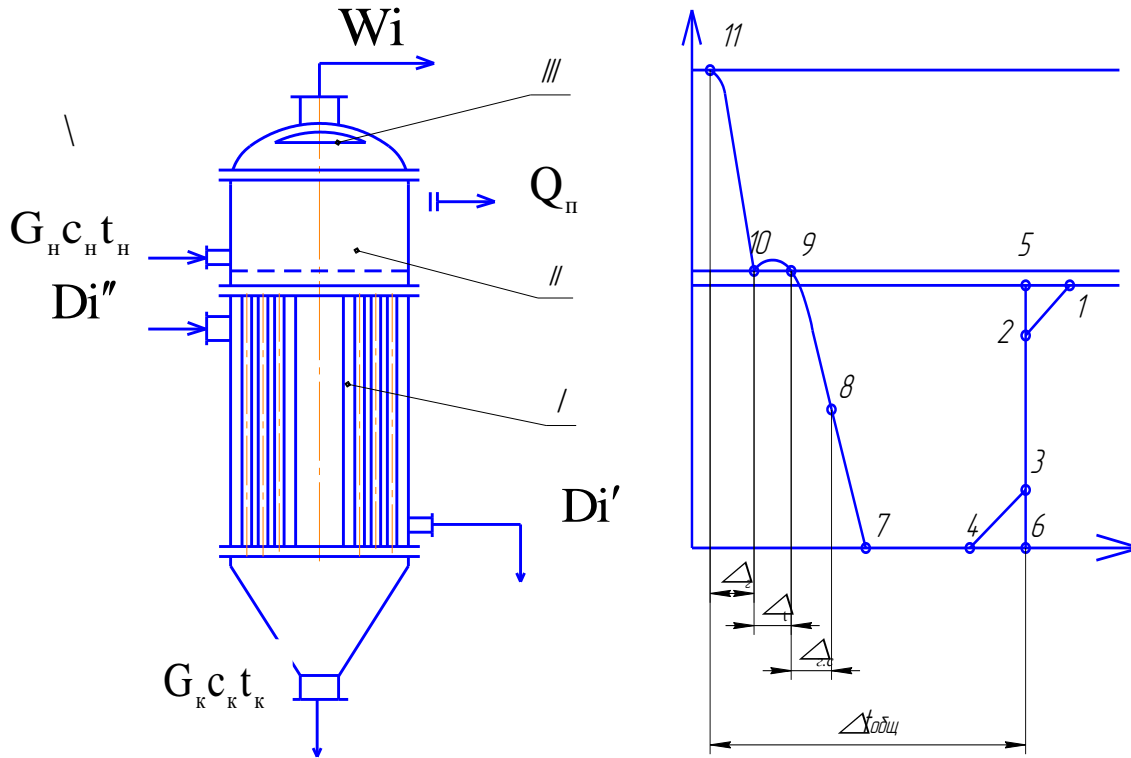


Рис.3 Процесс выпаривания

Решающим фактором, определяющим интенсивность выпаривания и производительность выпарного аппарата, является температурный перепад. От этого перепада зависит площадь поверхности теплопередачи аппарата, которая определяется из основного уравнения теплопередачи  $F = Q / K \Delta t$ , где  $\Delta t$  - полезная разность температур, которая определяется по общей разности температур и температурным депрессиям.

*Общей разностью температур* называется разность между температурой греющего пара, подаваемого в греющую камеру выпарного аппарата и температурой вторичного пара в конце паропровода, отводящего пар из выпарного аппарата.

### Многократное выпаривание

Экономичность процесса может быть повышена при использовании вторичного пара. Наиболее целесообразно использовать *многокорпусные* выпарные установки, состоящие из нескольких выпарных аппаратов, или корпусов, в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса направляется в качестве греющего в последующий корпус. При этом давление в последовательно соединенных (по ходу выпариваемого раствора) корпусах снижается таким образом, чтобы обеспечить разность температур



между вторичным паром из предыдущего корпуса и раствором, кипящим в данном корпусе, т.е. создать, необходимую движущую силу процесса выпаривания. В этих установках первичным паром обогревается только первый корпус. Следовательно, в многокорпусных выпарных установках достигается значительная экономия первичного пара по сравнению с однокорпусными установками той же производительности. Т.е. удельный расход пара составляет

- для 2-х корпусной установки 0,55 кг на 1 кг выпаренной воды;
- для 3-х корпусной – 0,4 кг;
- для 4-х корпусной – 0,3 кг.

На практике количество корпусов определяется технико-экономическим расчетом, т.е. суммарными затратами на проведение процесса. Суммарные затраты включают капитальные, амортизационные расходы, затраты на ремонт, энергозатраты, затраты на эксплуатацию. Увеличение количества корпусов ведет к увеличению металлоемкости, но понижается ее энергоемкость. Затраты на обслуживание с введением автоматического управления почти не зависят от количества корпусов. Капитальные и амортизационные затраты пропорциональны количеству корпусов. Минимум суммарных затрат на проведение процесса выпаривания определяется на основании результатов расчетов для различного количества корпусов и составления графической зависимости.

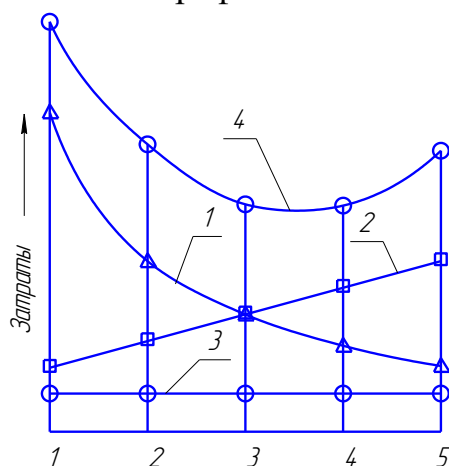


Рис. 4 Суммарные затраты

- 1 – энергозатраты (по производству пара);
- 2 – капитальные и амортизационные расходы;
- 3 – затраты на эксплуатацию;
- 4 – суммарные затраты;

Можно увидеть, что минимальные суммарные затраты, соответствующие минимуму кривой 1 определяют рациональным количеством корпусов 3 или 4.

*Многокорпусные установки* делятся по взаимному направлению движения греющего пара и выпариваемого раствора на *прямоточные* и *противоточные*.

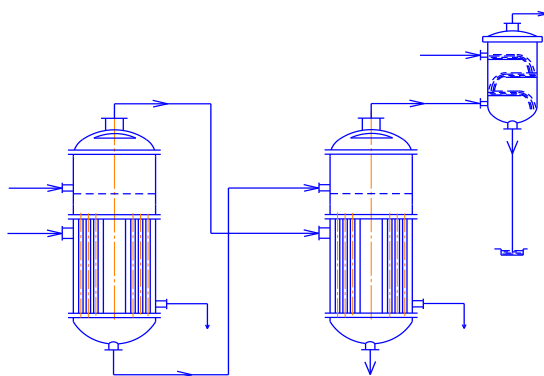


Рис. 5 Схема прямоточной многокорпусной установки.

Исходный раствор поступает из хранилища в количестве  $G_n$ , кг/ч с концентрацией  $x_n$ , % в теплообменник, где подогревается до температуры кипения и поступает в первый корпус выпарной установки. В нем он концентрируется до заданной концентрации  $x_1$ , %. При этом из аппарата удаляется  $W_1$ , кг/ч вторичного пара. Далее раствор поступает во второй корпус выпарной установки, где концентрируется до концентрации  $x_2$ , % (если корпусов больше, то до  $x_3$  и  $x_4$ , %). Соответственно из корпусов удаляется вторичного пара в количестве  $W_2$ ,  $W_3$  и  $W_4$ .

Преимущества прямоточной схемы в том, что раствор самотеком перетекает из корпуса с более высоким давлением в корпус с меньшим давлением. Недостаток - более низкий средний коэффициент теплопередачи, чем в противоточной установке. В первом корпусе слабый раствор получает теплоту от греющего пара с высокими теплофизическими характеристиками, а в последующий наиболее концентрированный раствор выпаривается вторичным паром наиболее низкого давления.

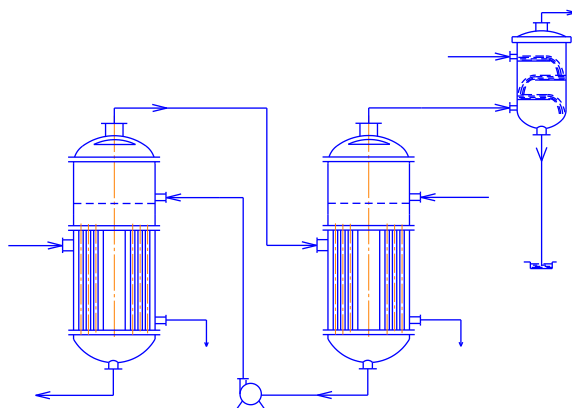


Рис. 6 Схема противоточной выпарной установки

Из схемы противоточной выпарной установки видно, что пар вводится в первый корпус, как и в первом случае, а вторичный пар обогревает все последующие корпуса. Выпариваемый раствор вводится в последний корпус и перемещается противотоком вторичному пару к первому корпусу т.е.

слабый раствор получает теплоту от вторичного пара, а концентрированный раствор от пара с наибольшими рабочими параметрами.

Достоинство – более высокий коэффициент теплоотдачи.

Недостаток – вследствие того, что давление от  $n$ -го корпуса к первому возрастает, для перекачки раствора устанавливают центробежные насосы, что повышает энергозатраты.

По технологическим причинам использование многокорпусных выпарных аппаратов иногда может оказаться неприемлемым. Так, например, приходится отказываться от многократного выпаривания тех чувствительных к высоким температурам растворов, для которых температуры кипения в первых корпусах многокорпусных установок слишком высоки и могут вызвать порчу продукта. В подобных и некоторых других случаях возможно и экономически целесообразно использовать для выпаривания однокорпусные выпарные аппараты с тепловым насосом.

С помощью теплового насоса, представляющего собой трансформатор тепла, повышают экономичность работы однокорпусного аппарата, сжимая вторичный пар на выходе аппарата до давления свежего (первичного) пара и направляя его в качестве греющего в нагревательную камеру того же аппарата. Сжатие (вторичного пара производят главным образом в турбокомпрессорах с приводом от электродвигателя или турбины или же в струйных компрессорах (инжекторах). Вследствие компактности, простоты устройства и надежности эксплуатации в качестве тепловых насосов наиболее широко применяют струйные компрессоры, несмотря на их невысокий к.п.д.

Выпарной аппарат с турбокомпрессором.

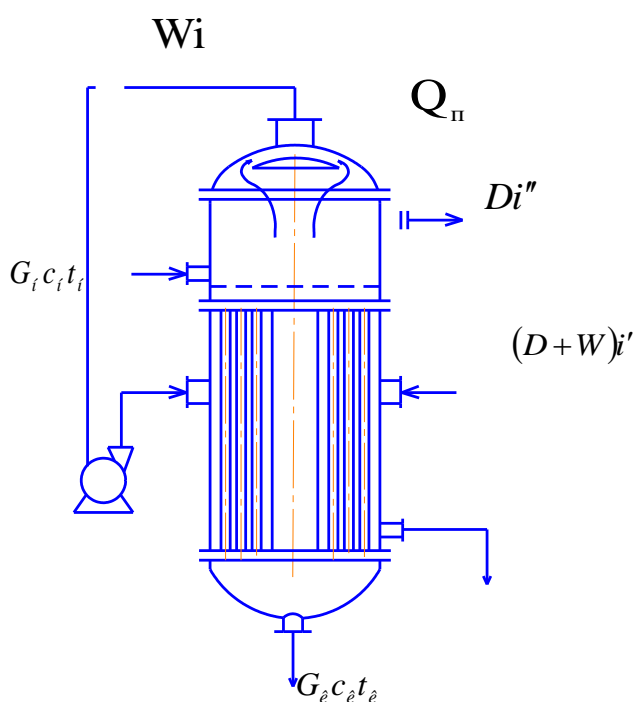


Рис. 7 Выпарной аппарат с турбокомпрессором.

Вторичный пар с давлением  $p_{вт}$  и энтальпией  $i$ , выходящий из выпарного аппарата, засасывается в турбокомпрессор, в котором сжимается до давления  $p_1$ . Энтальпия при этом возрастает до  $i_{сж}$ . Таким образом, за счет сжатия пар приобретает теплоту  $\Delta i = i_{сж} - i$ . Сжатый пар поступает из турбокомпрессора в греющую камеру выпарного аппарата.

Запишем уравнение теплового баланса процесса.

$$G_n c_n t_n + D i'' + W i_{сж} = G_k c_k t_k + W i + (D + W) i' + Q_n \quad (1)$$

Откуда расход греющего пара

$$D = G_k \frac{c_k t_k - c_n t_n}{i'' - i'} + W \frac{i - c_n t_n - i_{сж}}{i'' - i'} + \frac{Q_n}{i'' - i'} \quad (2)$$

где  $i_{сж}$  - энтальпия вторичного пара после сжатия в турбокомпрессоре, кДж/кг.

Из сравнения уравнений (1) и (2) видно, что при выпаривании с тепловым насосом расход греющего пара снижается за счет повышения энтальпии вторичного пара на величину  $i_{сж}$ .

Однако следует учитывать, что здесь необходимы затраты электроэнергии на приведение в действие турбокомпрессора. А также установка удорожается на стоимость турбокомпрессора.

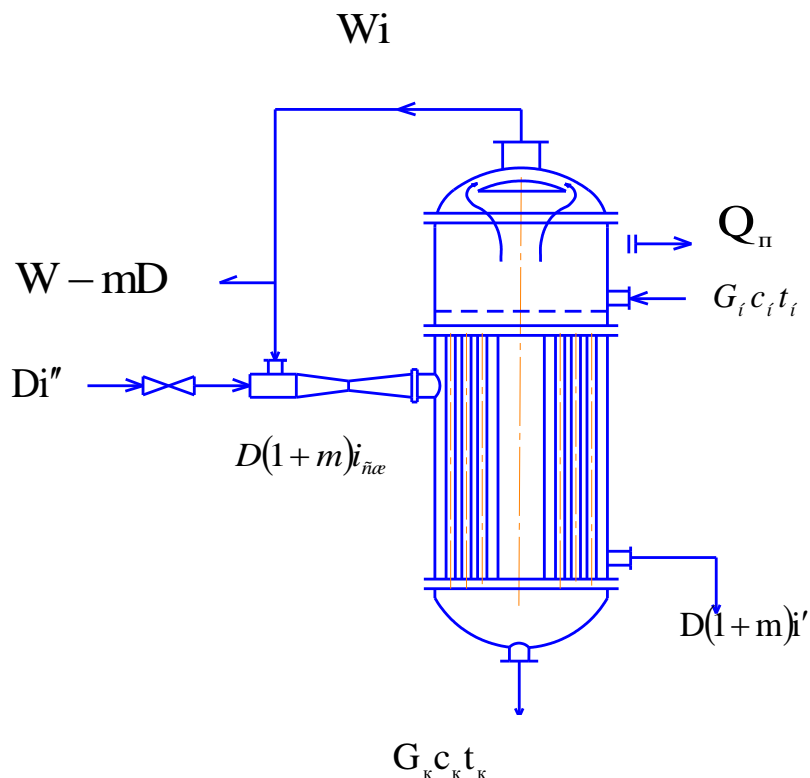


Рис. 8 Выпарная установка с паровым инжектором

В установках с паровым инжектором греющий пара из котельной поступает в паровой инжектор. За счет создания вакуума в инжектор засасывается вторичный пар давлением  $p_{вт}$  и энтальпией  $i$ , выходящий из выпарного аппарата. Каждая массовая единица греющего пара засасывает  $m$

массовых единиц вторичного пара. В результате получают греющий пар в количестве  $D(1+m)$  с давлением меньшим, чем давление греющего пара, но большим, чем вторичного пара. Часть пара, равная  $W - mD$ , сбрасывается в атмосферу либо на побочные нужды.

Составим тепловой баланс процесса

$$G_n c_n t_n + D(1+m)i_{сж} = G_k c_k t_k + Wi + D(1+m)i' + Q_{п} \quad (3)$$

Откуда расход греющего пара

$$D = G_k \frac{c_k t_k - c_n t_n}{(1+m)(i_{сж} - i')} + W \frac{i - c_n t_n}{(1+m)(i_{сж} - i')} + \frac{Q_{п}}{(1+m)(i_{сж} - i')} \quad (4)$$

Сопоставив равенства расходов греющего пара можно увидеть, что при применении инжектора расход греющего пара уменьшается в  $(1+m)$  раз.

Обычно коэффициент инжекции  $m$  составляет  $0,5 - 1,0$ .

Экономичность процесса может быть повышена при использовании вторичного пара. Наиболее целесообразно использовать *многокорпусные* выпарные установки, состоящие из нескольких выпарных аппаратов, или корпусов, в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса направляется в качестве греющего в последующий корпус. При этом давление в последовательно соединенных (по ходу выпариваемого раствора) корпусах снижается таким образом, чтобы обеспечить разность температур между вторичным паром из предыдущего корпуса и раствором, кипящим в данном корпусе, т.е. создать, необходимую движущую силу процесса выпаривания. В этих установках первичным паром обогревается только первый корпус. Следовательно, в многокорпусных выпарных установках достигается значительная экономия первичного пара по сравнению с однокорпусными установками той же производительности. Т.е. удельный расход пара составляет

- для 2-х корпусной установки 0,55 кг на 1 кг выпаренной воды;
- для 3-х корпусной – 0,4 кг;
- для 4-х корпусной – 0,3 кг.

На практике количество корпусов определяется технико-экономическим расчетом, т.е. суммарными затратами на проведение процесса. Суммарные затраты включают капитальные, амортизационные расходы, затраты на ремонт, энергозатраты, затраты на эксплуатацию. Увеличение количества корпусов ведет к увеличению металлоемкости, но понижается ее энергоемкость. Затраты на обслуживание с введением автоматического управления почти не зависят от количества корпусов. Капитальные и амортизационные затраты пропорциональны количеству корпусов.

## РАСЧЕТ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

### 1. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

1.1. Определение количества выпаренной воды во всей установке:

$$W = S \times \left(1 - \frac{B_0}{B_k}\right), \text{ кг/с}; \quad (1)$$

1.2. Распределение количества выпаренной воды по корпусам. Для трехкорпусной прямоточной установки можно принять следующее соотношение:

$$W_1 : W_2 : W_3 = 1 : 1,1 : 1,24, \quad (2)$$

тогда  $W_1 = \frac{W}{3,34}$ ;  $W_2 = 1,1 \cdot W_1$ ;  $W_3 = 1,24 \cdot W_1$

1.3. Определение концентрации раствора в корпусах:

$$B_1 = \frac{S \times B_0}{S - W_1}, \text{ \%};$$
$$B_2 = \frac{S \times B_0}{S - W_1 - W_2}, \text{ \%}; \quad (3)$$
$$B_3 = \frac{S \times B_0}{S - W_1 - W_2 - W_3}, \text{ \%};$$

1.4. Предварительный расчет давления и температуры вторичного пара в корпусах. По заданному давлению в конденсаторе из таблицы насыщенного пара находится температура  $T_k$ , тогда температура вторичного пара в третьем корпусе:

$$\theta_3 = T_k + 1, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (4)$$

По этой температуре из таблицы насыщенного пара находится давление вторичного пара в третьем корпусе  $P_3$ .

Средний перепад давления в одном корпусе:

$$\Delta P = \frac{|P_n - P_3|}{3}, \text{ МПа}; \quad (5)$$

Давление вторичного пара во втором и первом корпусах:

$$P_2 = P_3 + \Delta P, \text{ МПа};$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \text{ МПа};$$

По этим давлениям находятся температура вторичного пара  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (по таблице насыщенного пара).

1.5. Определение температурных потерь.

1.5.1. Температурные потери от физико-химической депрессии зависят от концентрации раствора в корпусах и могут быть рассчитаны для целого ряда пищевых жидкостей по формуле:

$$\Delta_{\phi-x} = 0,38 \times e^{(0,05 + 0,045 \times B)}, \quad (6)$$

где  $B$  – концентрация сухих веществ раствора в корпусах, %.

$e$  – постоянное число,  $e = 2,718$ .

Сумма физико-химических температурных депрессий по корпусам:

$$\Sigma \Delta_{\phi-x} = \Delta_{\phi-x}^1 + \Delta_{\phi-x}^2 + \Delta_{\phi-x}^3, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (7)$$

1.5.2. Температурные потери от гидростатической депрессии можно принять равным  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  на каждый корпус. Тогда по трем корпусам температурные

потери составят:

$$\Sigma_{\Delta r_c} = \Delta_{r_c}^1 + \Delta_{r_c}^2 + \Delta_{r_c}^3, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (8)$$

1.5.3. Температурные потери от гидравлической депрессии можно принять равным 1  $^\circ\text{C}$ . Тогда по 3 корпусам температурные потери составят:

$$\Sigma_{\Delta r} = \Delta_r^1 + \Delta_r^2 + \Delta_r^3, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (9)$$

Сумма всех температурных потерь в установке будет равна:

$$\Sigma_{\Delta} = \Sigma_{\Delta\phi-x} + \Sigma_{\Delta r_c} + \Sigma_{\Delta r}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (10)$$

1.6. Определение полезной разности температур в установке и её распределение по корпусам.

1.6.1. Полная разность температур в установке:

$$\Sigma_{\Delta t_{\text{полн.}}} = T_1 - \theta_3, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (11)$$

1.6.2. Полезная разность температур в установке:

$$\Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}} = \Sigma_{\Delta t_{\text{полн.}}} - \Sigma_{\Delta}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (12)$$

1.6.3. Тепловые нагрузки по отдельным корпусам:

$$\begin{aligned} Q_1 &= D_1 \times r_1, \text{ МВт}; \\ Q_2 &= D_2 \times r_2, \text{ МВт}; \\ Q_3 &= D_3 \times r_3, \text{ МВт}; \end{aligned} \quad (13)$$

где  $r_1, r_2, r_3$  – теплота конденсации греющего пара по корпусам, Дж/кг (определяется из таблиц насыщенного пара по давлению в корпусах).

Для предварительных расчетов можно принять, кг/с:

$$D_1 = W_1; D_2 = W_1; D_3 = W_2.$$

1.6.4. Распределение полезной разности температур по корпусам при равенстве поверхностей нагрева:

$$\begin{aligned} \Delta_{t1} &= \frac{Q_1 \times \Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}}}{k_1 \times \Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \Delta_{t2} &= \frac{Q_2 \times \Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}}}{k_2 \times \Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \Delta_{t3} &= \frac{Q_3 \times \Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}}}{k_3 \times \Sigma_{\Delta t_{\text{полезн.}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (14)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты теплопередачи в корпусах, Вт/( $\text{м}^2 \times \text{K}$ )

При вычислении полезной разности температур используем соотношение коэффициентов теплопередач для предварительных расчетов:

$$k_1 : k_2 : k_3 = 1 : (0,9 - 0,8) : (0,8 - 0,6).$$

В дальнейших расчетах это соотношение уточняется.

1.6.5. Расчет температурного режима выпарной установки. Для определения температурного режима установки вычисляются температуры кипения раствора, вторичного и греющего пара:

$$\begin{aligned} t_1 &= T_1 - \Delta t_1, \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \theta_1 &= t_1 - \Delta_{\phi-x}^1 - \Delta_{r_c}^1, \text{ } ^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$T_2 = \theta_1 - \Delta_r^1, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_2 = T_2 - \Delta t_2, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta_2 = t_2 - \Delta_{\phi-x}^2 - \Delta_{rc}^2, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_3 = \theta_2 - \Delta_r^2, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_3 = T_3 - \Delta t_3, \text{ } ^\circ\text{C};$$

Температурный режим установки сводится в таблицу.

Таблица 1-Температурный режим установки.

Наименование величины	Корпус			Конденсатор
	1	2	3	
Гидравлическая депрессия		$\Delta_r$	$\Delta_r$	
Температура греющего пара	$T_1$	$T_2$	$T_3$	
Полезная разность температур	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	
Температура кипения раствора	$t_1$	$t_2$	$t_3$	
Физико-химическая депрессия	$\Delta_{\phi-x}^1$	$\Delta_{\phi-x}^2$	$\Delta_{\phi-x}^3$	
Гидростатическая депрессия	$\Delta_{rc}^1$	$\Delta_{rc}^2$	$\Delta_{rc}^3$	
Температура вторичного пара	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	

Расчет температур ведется с точностью 0,1  $^\circ\text{C}$ .

1.7. Расчет коэффициентов теплопередачи.

Коэффициент теплопередачи определяется по уравнению, Вт/( $\text{м}^2 \times \text{K}$ );

$$K = 1/[(\alpha_1)^{-1} + (\alpha_2)^{-1} + R_{ст}], \quad (16)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от пара к стенке, Вт/( $\text{м}^2 \times \text{K}$ );

$R_{ст}$  -термическое сопротивление загрязненной стенки, Вт/( $\text{м}^2 \times \text{K}$ );

$$R_{ст} = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{ } ^\circ\text{C}); \quad (17)$$

где  $\delta_{загр}$  – можно принять равной 0,5 – 1,5 мм, где  $\lambda_{загр} = 1,314 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ,

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему раствору, Вт/( $\text{м}^2 \times \text{K}$ ).

Таблица 2 – размеры труб греющих камер выпарных аппаратов.

Конструкция	Тип	Длина трубок, м	Диаметр и шаг трубок, мм	
С центральной циркуляционной трубой	ВВ	2 – 3	38/34 t = 48	57/52 t = 70
С подвесной греющей камерой	ВП	1,5 – 2,0	57/52 t = 70	57/52 t = 70
С наружной циркуляционной трубой	ВЦ	3 – 4	38/34 t = 48	57/52 t = 70
С выносной греющей камерой	ВН	3 – 4	38/34 t = 48	57/52 t = 70



С принудительной циркуляцией	ВПЦ	2 – 3	25/21 t = 32	38/34 t = 48
------------------------------	-----	-------	-----------------	-----------------

1.7.1. Для аппаратов с естественной циркуляцией коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  определяется по критериальному уравнению для конденсации пара на вертикальной стенке:

$$Nu = 1,15 (Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{1/4}; \quad (18)$$

Для случая конденсации насыщенного водяного пара на вертикальных трубах это уравнение приводится к виду:

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{(g \times l)^{1/3}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{°C}), \quad (19)$$

где  $g$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>,

$l$  – длина кипятильной трубы, м,

$A_1$  – расчетный коэффициент, определяемый по температуре греющего пара из графика, рисунок 9.

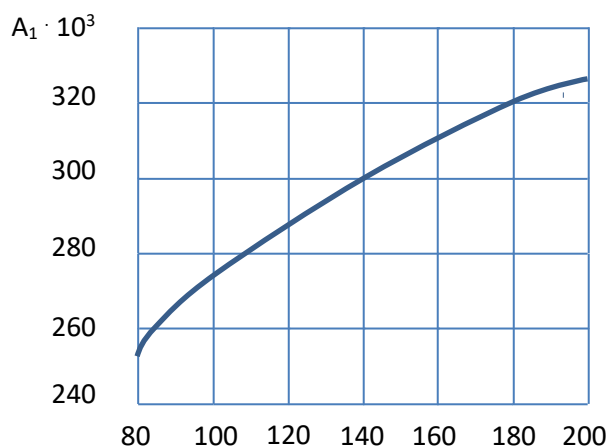


Рис. 9 Определение расчетного коэффициента  $A_1$ .

1.7.2 Коэффициент теплопередачи определяется по критериальному уравнению Кичинга и Тобилевича, которое после преобразования имеет вид:

$$\alpha_2 = A_2 \times g^{0.6}, \quad (20)$$

где  $A_2$  – расчетный коэффициент, зависящий от температуры кипения и концентрации раствора, определяется из графика, рисунок 2.

Ввиду того, что плотность теплового потока неизвестна, задаются для каждого корпуса несколькими значениями (не менее трех). Можно принять 10000, 20000, 30000. Вычисляют  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $k$  и определяют температурный напор (полезная разность температур) в °C по формуле:

$$\Delta t = g/k \quad (21)$$

Строится нагрузочная характеристика, представляющая зависимость:

$$g = f(\Delta t)$$

Затем по известной величине полезной разности температур для данного корпуса находится значение тепловых потоков, рисунок 3 и определяются коэффициенты теплопередачи:

$$k_1 = \frac{g_1}{\Delta t_1}; k_2 = \frac{g_2}{\Delta t_2}; k_3 = \frac{g_3}{\Delta t_3}. \quad (22)$$

1.7.3 Проверка принятого соотношения коэффициентов теплопередачи.

После определения численных значений коэффициентов теплопередачи проверяется ранее принятое соотношение  $k_1 : k_2 : k_3$ .

Если отдельные члены полученного в результате расчета к соотношения отличаются от соответствующих членов ранее принятого соотношения более, чем на 3% расчет производится заново, начиная с вычисления полезных разностей температур.

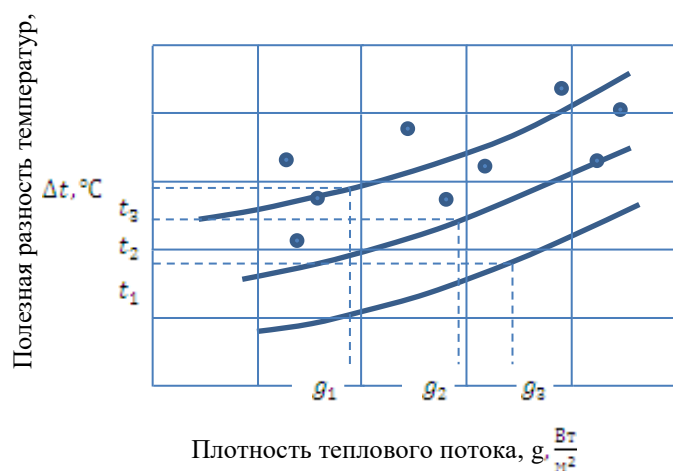


Рисунок 10.- Нагрузочные характеристики корпусов выпарной установки

1.8.Определение расхода греющего пара.

По температурам греющего и вторичного пара из таблицы насыщенного пара находят энтальпии пара и конденсата

Таблица 3. - Параметры теплоносителей по корпусам

Наименование величин	Ед. изм.	1 корпус	2 корпус	3 корпус
1.Температура	°C	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
2.Энтальпия греющего пара	Дж/кг	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>
3.Энтальпия конденсата	Дж/кг	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	τ <sub>3</sub>
4.Температура вторичного пара	°C	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	θ <sub>3</sub>
5.Энтальпия вторичного пара	Дж/кг	i <sub>1</sub>	i <sub>2</sub>	i <sub>3</sub>

Расход греющего пара в первом корпусе:

$$D_1 = \frac{W - S \cdot c \cdot y}{x}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad (23)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость растворителя ( $c = 4120$  Дж/(кг·К),  
 $x, y$  – коэффициенты;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коэффициенты самоиспарения, (кг·К)/Дж;  
 $x = 3 - 2c_B \beta_2 - 2c_B \beta_3$ ;  
 $y = 3\beta_1 + 2\beta_2 + \beta_3$ .

$$\beta_1 = \frac{t_1 - t_0}{i_1 - c_B \cdot t_1}, \beta_2 = \frac{t_1 - t_2}{i_2 - c_B \cdot t_2}; \beta_3 = \frac{t_2 - t_3}{i_3 - c_B \cdot t_3} \quad (24)$$

где  $c_B$  – теплоемкость воды, равная 4187 Дж/(кг·К).

1.9. Уточненный расчет количества выпаренной воды по корпусам, кг/с

$$\begin{aligned} W_1 &= \alpha'_1 \cdot D_1 + S \cdot c_B \cdot \beta_1 \\ W_2 &= \alpha'_2 \cdot D_2 + (S \cdot c - c_B \cdot W) \cdot \beta_2 \\ W_3 &= \alpha'_3 \cdot D_3 + (S \cdot c - c_B \cdot W_2 - c_B W_1) \cdot \beta_3 \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$  - коэффициенты испарения.

$$\alpha'_1 = \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - c_B \cdot t_1}, \alpha'_2 = \frac{\lambda_2 - \tau_2}{i_2 - c_B \cdot t_2}, \alpha'_3 = \frac{\lambda_3 - \tau_3}{i_3 - c_B \cdot t_3} \quad (26)$$

$D_2, D_3$  – расходы греющего пара соответственно во втором и третьем корпусах, кг/с;  $D_2 = W_1, D_3 = W_2$

Суммарное количество воды  $W_1 + W_2 + W_3$  и общее количество выпаренной воды по всей установке, вычисленной по формуле (1), не должны отличаться друг от друга более, чем на 2 – 3 %.

1.10. Определение поверхности нагрева корпусов.

Поверхность нагрева каждого корпуса выпарной установки:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{Q_1}{k_1 \cdot \Delta t_1}, \text{ м}^2; \\ F_2 &= \frac{Q_2}{k_2 \cdot \Delta t_2}, \text{ м}^2; \\ F_3 &= \frac{Q_3}{k_3 \cdot \Delta t_3}, \text{ м}^2; \end{aligned} \quad (27)$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3$  - тепловые нагрузки корпусов вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} Q_1 &= D_1(\lambda_1 - \tau_1), \text{ Вт}; \\ Q_2 &= D_2(\lambda_2 - \tau_2), \text{ Вт}; \\ Q_3 &= D_3(\lambda_3 - \tau_3), \text{ Вт}; \end{aligned} \quad (28)$$

Численные значения поверхностей нагрева корпусов не должны отличаться друг от друга более чем на 5 %.

1.11. Расчет тепловой изоляции.

Толщина изоляционного слоя:

$$\delta_{\text{из}} = \lambda_{\text{из}} \times \left( \frac{1}{k_{\text{п}}} - \frac{1}{\alpha_B} \right), \text{ м}; \quad (29)$$

где  $\lambda_{\text{из}}$  – теплопроводность изоляционного материала, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

для изоляции выпарных аппаратов применяются материалы:

асбест = 1,147  
асбозурит = 0,178  
севелит = 0,10

$\kappa_{\text{п}}$  – коэффициент теплопередачи в окружающую среду,

$$\kappa_{\text{п}} = \alpha_{\text{в}} \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{вз}}}{t_{\text{а}} - t_{\text{вз}}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}), \quad (30)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\alpha_{\text{в}} = 9,3 + 0,058t_{\text{из}}$ ,

$t_{\text{из}}$  – температура поверхности изоляции, для выпарных аппаратов может быть принята  $40 - 45 ^\circ\text{С}$

$t_{\text{вз}}$  – температура окружающего воздуха, принять  $20 ^\circ\text{С}$

$t_{\text{а}}$  – температура среды в аппарате,  $^\circ\text{С}$ . Расчет ведется по температурам греющего пара в данном корпусе.

1.12. Определение тепловых потерь в окружающую среду.

Потери тепла в окружающую среду,  $\text{Вт}$  :

$$Q_{\text{п}} = \kappa_{\text{п}} \cdot F_{\text{а}} \cdot (t_{\text{а}} - t_{\text{вз}}), \quad (31)$$

где  $F_{\text{а}}$  – наружная поверхность аппарата,  $\text{м}^2$  (определяется после конструктивного расчета)

$$Q_{\text{п1}} = \kappa_{\text{п}} \cdot F_1 \cdot (t_{\text{а}} - t_{\text{вз}})$$

$$Q_{\text{п2}} = \kappa_{\text{п}} \times F_2 \times (t_{\text{а}} - t_{\text{вз}}) \quad (32)$$

$$Q_{\text{п3}} = \kappa_{\text{п}} \times F_3 \times (t_{\text{а}} - t_{\text{вз}})$$

Коэффициенты тепловых потерь,  $\text{кг}/\text{с}$ :

$$l_1 = \frac{Q_{\text{п1}}}{i_1 - c_{\text{в}} t_1}; \quad l_2 = \frac{Q_{\text{п2}}}{i_2 - c_{\text{в}} t_2}; \quad l_3 = \frac{Q_{\text{п3}}}{i_3 - c_{\text{в}} t_3}. \quad (33)$$

Уточнение расхода греющего пара в первом корпусе:

$$D_{1\text{п}} = D_1 + l_1 + \frac{2}{3} l_2 + \frac{1}{3} l_3, \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (34)$$

Удельный расход пара:

$$d = \frac{D_{1\text{п}}}{W}. \quad (35)$$

## 2. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ АППАРАТА.

2.1. Греющая камера.

Число труб греющей камеры:

$$n = \frac{F}{\pi d_p l}, \quad (36)$$

где  $l$  – длина кипяtilьных труб,  $\text{м}$  (принимается по заданию).

$d_p$  – расчетный диаметр кипяtilьной трубы,  $\text{м}$  (принимается по заданию).

В качестве расчетного диаметра принимают:

$$d_p = d_{\text{в}} \text{ при } \alpha_1 > \alpha_2;$$

$$d_p = d_{\text{н}} \text{ при } \alpha_1 < \alpha_2;$$

$$d_p = 0,5(d_{\text{в}} + d_{\text{н}}) \text{ при } \alpha_1 \approx \alpha_2,$$

где  $d_{\text{в}}$  и  $d_{\text{н}}$  – соответственно внутренний и наружный диаметры труб,  $\text{м}$ .

Располагая трубы по сторонам правильного шестиугольника, выбирают из таблиц ближайшее число труб в пучке  $n$  и уточняют длину труб.

В аппаратах с центральной циркуляционной трубой сечение циркуляционной трубы составляет  $\beta_{ц} = 30 - 40 \%$  суммарного сечения всех кипяtilьных труб, тогда диаметр циркуляционной трубы можно определить из уравнения: Диаметр циркуляционной трубы:

$$d_{ц} = 0,1d_{в}\sqrt{\beta_{ц}n}, \text{ м...} \quad (37)$$

При уточнении длины трубы учитывается, что часть кипяtilьных труб, расположенных в центре камеры, заменяется центральной циркуляционной трубой.

В аппаратах с подвесной греющей камерой из центра пучка удаляется часть труб, обычно 19 шт.

Диаметр греющей камеры определяется из уравнения:

$$D_k = t(b - 1) + 4d_{н}, \text{ м,} \quad (38)$$

где  $t$  – расстояние между центрами соседних труб (шаг), м

$$t = (1,3 \div 1,5)d_{н}, \quad (39)$$

$b$  – число труб по большей диагонали шестиугольника.

Диаметр корпуса аппарата определяется по формуле:

$$D = 1,12D_k, \text{ м.} \quad (40)$$

## 2.2 Определение объема парового пространства.

Часть корпуса, находящаяся над греющей камерой, служит паровым пространством, в котором происходит отделение от пара капель раствора. Высота парового пространства должна быть такой, чтобы на выходе был получен практически сухой пар.

Необходимый объем парового пространства

$$V = \frac{W_i}{d} \text{ м}^3, \quad (41)$$

где  $W_i$  – количество выпаренной воды в аппарате, кг/ч.

$d$  – допустимое напряжение, кг/(м<sup>3</sup>ч).

$$d = f_1 \cdot f_2 \cdot d_0, \quad (42)$$

где  $d_0 = 750 - 1500$  кг/(м<sup>3</sup>ч).

$f_1$  – коэффициент, зависящий от давления вторичного пара. Выбирают из таблицы 4.

Абсолютное давление, бар	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
Коэффициент $f_1$	0,85	0,87	0,92	1,01	1,37	1,73	2,08	2,44	3,15

$f_2$  – коэффициент, зависящий от уровня раствора над точкой ввода парожидкостной смеси в паровое пространство. Определяется по таблице 5.

$H_w$ , м	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5
$f_2$	1,0	0,83	0,69	0,59	0,51	0,4	0,32	0,27

Для аппаратов с центральной циркуляционной трубой и с подвесной греющей камерой  $H_W = 50 - 100$  мм. Для аппаратов с выносной греющей камерой с наружной циркуляционной трубой и с принудительной циркуляцией  $H_W = 0$ .

Высота парового пространства:

$$H_c = \frac{V}{F_c}, \text{ м}, \quad (43)$$

где  $F_c$  – площадь парового пространства,  $\text{м}^2$ ,  $F_c = \frac{\pi D_k^2}{4}$ .

Обычно высоту парового пространства берут:

$$H_c \geq 0,8 \div 1,0 \text{ м}. \quad (44)$$

### 2.3. Определение диаметров патрубков.

Диаметры патрубков для подвода и отвода пара и жидкости:

$$d_{\text{пат}} = 1,13 \times \sqrt{\frac{G}{\rho \cdot w}}, \text{ м}, \quad (45)$$

где  $G$  – расход,  $\text{кг/с}$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $w$  – скорость,  $\text{м/с}$ .

Диаметры патрубков для подвода и отвода раствора рассчитывается по первому корпусу, скорость раствора принимается  $0,4 - 0,8$   $\text{м/с}$ .

Диаметры патрубков для отвода конденсата рассчитываются также по первому корпусу, скорость конденсата принимается  $0,3 - 0,7$   $\text{м/с}$ .

Диаметры паровых патрубков определяются для каждого корпуса в отдельности.

Оптимальная скорость пара может быть определена из соотношения:

$$w^2 \rho = 250,$$

где  $\rho$  – плотность пара (по таблице водяного пара) и раствора (зависит от температуры кипения и концентрации),  $\text{кг/м}^3$ ;

### 3. Механический расчет.

Определение толщины стенки греющей камеры и надсокового пространства:

$$\delta = \frac{P \cdot D_{\text{в}}}{2 \cdot [\delta_z] \cdot \varphi} + C, \text{ см}, \quad (46)$$

где  $[\delta_z]$  – допускаемое напряжение на разрыв,  $\text{кг/см}^2$ ,

$$\delta_z = \frac{\delta_{\text{в}}}{n_{\text{в}}},$$

где  $\delta_{\text{в}}$  – предел прочности металла на растяжение, принять  $3800 - 4700$   $\text{кг/см}^2$ ;

$n_{\text{в}}$  – коэффициент запаса прочности, равен  $4 - 5$ ;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва, принять  $0,7$ ;

$D_{\text{в}}$  – внутренний диаметр греющей камеры,  $\text{см}$ ;

$P$  – расчетное давление,  $\text{бар}$ ;

$C$  – прибавка на коррозию, принять  $0,3$   $\text{см}$ .

Толщина трубной решетки:

$$\delta = \sqrt{\frac{k_p \cdot (D_z^2 - n \cdot d_n^2)}{100 \cdot [\delta_{из}] \cdot \varphi}} + C, \text{ см,} \quad (47)$$

где  $k_p$  – коэффициент, принять 0,16;

$d_n$  – наружный диаметр, увеличенный на 0,05 – 0,1 см для развальцовки;

$\varphi$  – коэффициент ослабления трубами,  $\varphi = \frac{t - d_n}{t}$ ;

$t$  – шаг трубок,  $t = (1,3 \div 1,5)d_n$ ;

$n$  – число трубок;

$\delta_{из}$  – допускаемое контактное напряжение на изгиб, кг/см<sup>2</sup>, принять  $\delta_{из} = \delta_z$ .

## Приложение 1

		Наружные диаметры греющих труб, мм									
		38					57				
Номинальная поверхность нагрева, м		Наружный диаметр корпуса, мм		Диаметр циркуляционной трубы, мм		Длина труб, мм		Количество труб, шт		Действительная поверхность нагрева, м	
25	600	194	3000	75	27	600	194	3500	29	21	
	800	275	2000	146	35	800	273	2500	64	28	
	800	273	3500	146	61	1000	351	3500	102	85	
50	1000	351	2000	240	57	1200	426	200	152	55	
	1000	351	3500	240	95	1200	426	3500	152	95	
	1400	450	2000	512	123	1400	450	2500	226	100	
100	1200	426	3500	386	162	1400	450	3500	226	140	
	1400	450	2500	512	152	1600	500	2500	318	145	
	1400	450	4000	512	242	1800	600	3500	392	245	
250	1600	500	3000	734	264	2000	650	2500	518	232	
	1600	500	4000	734	350	2000	650	3500	518	325	
350	1800	550	3000	944	340	-	-	-	-	-	



## ЗАДАНИЕ

### Выпарная установка

Задание выбирается по двум последним цифрам шифра

Наименование	Обозн.	Размерность	Предпоследнее число шифры зачетки									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Производительность	S	кг/с	4	5	6	7	4,5	5,5	6,7	7,5	8	9
Начальная концентрация раствора	$B_0$	%	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Конечная концентрация раствора	$B_k$	%	40	48	50	58	60	68	70	42	52	62
Последнее число шифры зачетки												
Абсолютное давление греющего пара	$P_{гр}$	бар.	4	3	2	1	1,9	5	4,5	3,5	2,5	1,5
Вакуум в барометрическом конденсаторе	$P_k$	бар.	0,4	0,3	0,2	0,1	0,19	0,5	0,45	0,35	0,25	0,5

### Список использованной литературы

1. Вобликова, Т. В. Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие / Т. В. Вобликова, С. Н. Шлыков, А. В. Пермьяков. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 204 с. — ISBN 978-5-8114-4163-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/115658>
2. Вобликова, Т.В. Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т.В. Вобликова, С.Н. Шлыков, А.В. Пермьяков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 204 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/90162> Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
3. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9
5. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8
6. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8