

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

**А.Н. КУДИ, В.Н. ДОЛГУНИН,
П.А. ИВАНОВ, В.А. ПРОНИН**

ТЕПЛОМАССОБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия для бакалавров,
обучающихся по направлениям
260100 «Продукты питания из растительного сырья»,
240700 «Биотехнология»,
150100 «Технологические машины и оборудование» и
специальности 260601 «Машины и аппараты пищевых производств»



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2012

УДК 664(07)
ББК Л81-5я73-2
Т343

Р е ц е н з е н т ы:

Заместитель начальника конструкторско-технологического отдела
ЗАО «Завод Тамбовполимермаш»
А.В. Иванов

Кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
Г.С. Кормильцин

Т343 Тепломассообменное оборудование пищевых производств :
учебное пособие / А.Н. Куди, В.Н. Долгунин, П.А. Иванов,
В.А. Пронин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. –
100 экз. – ISBN 978-5-8265-1049-0.

Рассматривается технологическое оборудование для проведения тепло-массообменных процессов в производствах пищевых продуктов. Излагаются классификация, конструкция, принцип действия, достоинства и недостатки и основы технологического расчёта различных видов тепло-массообменного оборудования.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям 260100 «Продукты питания из растительного сырья», 240700 «Биотехнология», 150100 «Технологические машины и оборудование», а также при обучении студентов специальности 260601 «Машины и аппараты пищевых производств».

УДК 664(07)
ББК Л81-5я73-2

ISBN 978-5-8265-1049-0

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем учебном пособии излагаются классификация, особенности конструктивного исполнения, функционирования и проектного расчёта оборудования пищевых производств, предназначенных для проведения тепломассообменных процессов. В соответствии с общепринятой классификацией оборудование общего назначения по функциональному признаку представляет собой группу аппаратов и вспомогательных устройств, предназначенных для организации тепловых, массообменных и совмещенных тепломассообменных процессов.

Оборудование этой группы широко используется в технологиях пищевых производств самых различных продуктов питания из сырья растительного и животного происхождения, рыбы, комбинированных продуктов питания для тепловой и термической обработки, концентрирования, выделения очистки методами нагрева, охлаждения, упаривания, варки, ректификации, экстрагирования, сушки, выпечки, обжарки и др.

Материал излагается в традиционной для этого оборудования форме, предполагающей разделение соответствующих аппаратов и вспомогательных устройств на подгруппы, которые представляется возможным выделить в результате дальнейшего последовательного системного применения единого квалификационного признака группирования оборудования по общему квалификационному признаку:

- оборудование для проведения тепловых процессов (теплообменники, выпарные аппараты);
- оборудование для проведения массообменных процессов (экстракторы, ректификационные установки);
- оборудование для проведения тепломассообменных процессов (сушилки, печи).

Такой подход позволяет полнее систематизировать излагаемый материал, что обеспечивает условие для лучшего его усвоения.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

1.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплообменные аппараты используются во многих пищевых производствах с целью нагрева, охлаждения, испарения, конденсации технологических потоков. При этом теплообмен может выступать как основная технологическая операция, так и вспомогательная. Интенсивность теплообмена влияет на скорость протекания массообменных, биохимических и гидромеханических процессов.

Теплообменные аппараты классифицируются по следующим признакам:

- способу теплопередачи;
- технологическому назначению;
- направлению движения теплоносителя;
- конструкции.

По способу теплопередачи различают теплообменники смешительные, рекуперативные и регенеративные.

В рекуперативных аппаратах – рекуператорах – теплоносители разделены стенкой и тепло передаётся от одного теплоносителя к другому через эту разделяющую их стенку. Существенным для теплообменных аппаратов рекуперативного типа является наличие стенки из теплопроводного материала, разделяющей потоки теплоносителей. Эта стенка служит поверхностью теплообмена, через которую теплоносители обмениваются теплом.

В регенеративных аппаратах – регенераторах – одна и та же поверхность твёрдого тела омывается попеременно различными теплоносителями. При омывании твёрдого тела одним из теплоносителей оно нагревается за счёт его тепла; при омывании твёрдого тела другим теплоносителем оно охлаждается, передавая тепло последнему. Таким образом, в регенераторах, кроме теплоносителей, обменивающихся теплом, необходимо наличие твёрдых тел, которые воспринимают тепло от одного теплоносителя и аккумулируют его, а затем отдают другому.

В смешительных аппаратах передача тепла происходит при непосредственном соприкосновении и смешении теплоносителей.

По направлению движения теплоносителей различают теплообменники противоточные, прямоточные, перекрёстного движения теплоносителей и смешанного типа.

Противоточные теплообменники характеризуются наибольшей движущей силой при некоторой фиксированной площади теплопередачи, но отличаются более жёстким режимом нагрева (более ускоренным).

Прямоточные теплообменники имеют меньшую среднюю движущую силу и характеризуются относительно низким темпом нагрева технологического потока.

Теплообменники с перекрёстным током теплоносителей занимают промежуточное положение по интенсивности теплопередачи между прямоточным и противоточным.

По технологическому назначению различают теплообменники: для теплообмена между газами, газом и паром, газом и жидкостью, жидкостью и паром, жидкостью и жидкостью.

По конструктивному признаку различают теплообменники: кожухотрубчатые, труба в трубе, змеевиковые, спиральные, пластинчатые и т.д.

Выбор теплообменника. При выборе теплообменника в первую очередь учитывают экстремальные технологические требования для организации процесса. К такого рода требованиям относятся: предельные значения давления, температур, корродирующие агрессивные свойства технологических потоков, санитарно-гигиенические требования. При наличии экстремальных требований выбирают конструкцию, которая удовлетворяет этим требованиям. Например, теплоноситель, имеющий высокую температуру, загрязняющий поверхность теплопередачи отложениями (накипью) с высокими агрессивными свойствами следует подавать в пространство, которое легко поддаётся чистке, изолированно от окружающей среды и соответствующие элементы конструкции легко поддаются замене. Таким требованиям соответствует трубное пространство теплообменников (кожухотрубчатых, труба в трубе). Кроме того, необходимо учитывать интенсивность теплоотдачи со стороны каждого из теплоносителей.

При выборе теплообменника необходимо учитывать удельную поверхность теплопередачи $\text{м}^2/\text{м}^3$ объёма аппарата, поскольку металлоёмкость, удельные капитальные затраты находятся в обратно пропорциональной зависимости от удельной поверхности теплопередачи. При организации процесса теплообмена с конденсацией одного из теплоносителей конструкция теплообменника, его расположение в пространстве (наклонный, вертикальный, горизонтальный) должны обеспечивать благоприятные условия стекания плёнки конденсата.

Наиболее широко применяются в промышленности поверхностные теплообменники, конструкции которых весьма разнообразны. Изготавливаются такие теплообменники из различных металлов, главным образом из углеродистых, легированных сталей и меди. Выбор металла диктуется в основном его коррозионной стойкостью и теплопроводностью. Конструкция теплообменного аппарата должна быть простой и удобной для ремонта и монтажа, обеспечивать возможность лёгкой очистки.

1.1.2. ЗМЕЕВИКОВЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК

Теплообменник этого типа отличается простотой устройства. Теплообменный элемент – змеевик – представляет собой трубу, согнутую каким-либо образом. Змеевик погружён в жидкость, которая нагревается или охлаждается теплоносителем, движущимся по змеевику (рис. 1.1).

В цилиндрической ёмкости *I* расположен змеевик *2*. Витки змеевика закреплены на стойках *3* хомутами *4*. Теплоноситель *I* проходит по змеевику, теплоноситель *II* – через ёмкость *I*. Обычно в ёмкости *I* теплоноситель *II* движется с малыми скоростями и теплоотдача от змеевика к теплоносителю *II* осуществляется при малых значениях коэффициента теплоотдачи. Для увеличения скорости движения теплоносителя *II* и, следовательно, интенсификации теплообмена в ёмкости *I* установлен вытеснительный сосуд *5*. Движение теплоносителя *II* по кольцевому пространству между стенками ёмкости *I* и вытеснительного сосуда *5* происходит при повышенных скоростях.

Змеевики таких теплообменников имеют большое гидравлическое сопротивление, поэтому скорости теплоносителей в змеевиках выбирают меньшими, чем в теплообменниках с прямыми трубами; для жидкостей до 1 м/с, для газов до 10 кг/(м²·с). Как недостаток змеевиковых теплообменников следует отметить трудность очистки змеевиков.

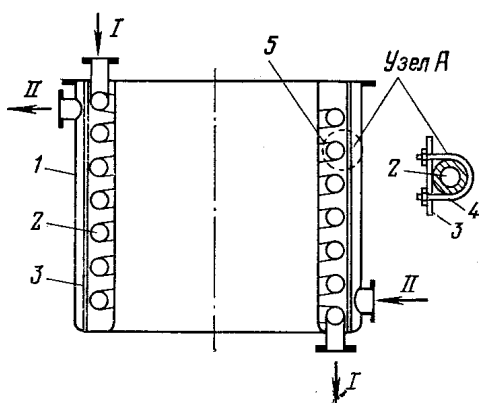


Рис. 1.1. Змеевиковый теплообменник:

I – ёмкость; *2* – змеевик; *3* – стойка; *4* – хомут; *5* – вытеснительный сосуд;
I, II – теплоносители

1.1.3. КОЖУХОТРУБЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Эти теплообменники относятся к числу наиболее часто применяемых поверхностных теплообменников. На рисунке 1.2, *a* показан кожухотрубчатый теплообменник жёсткой конструкции, который состоит из корпуса, или кожуха 1, и приваренных к нему трубных решёток 2. В трубных решётках закреплён пучок труб 3. К трубным решёткам крепятся (на прокладках и болтах) крышки 4.

В кожухотрубчатом теплообменнике одна из обменивающихся теплом сред *I* движется внутри труб (в трубном пространстве), а другая *II* – в межтрубном пространстве.

Среды обычно направляют противотоком друг к другу. При этом нагреваемую среду направляют снизу вверх, а среду, отдающую тепло, – в противоположном направлении. Такое направление движения каждой среды совпадает с направлением, в котором стремится двигаться данная среда под влиянием изменения её плотности при нагревании или охлаждении.

Кроме того, при указанных направлениях движения сред достигается более равномерное распределение скоростей и идентичные условия теплообмена по площади поперечного сечения аппарата. В противном случае, например при подаче более холодной (нагреваемой) среды сверху теплообменника, более нагретая часть жидкости, как более лёгкая, может скапливаться в верхней части аппарата, образуя «застойные» зоны. Теплообменник, изображённый на рис. 1.2, *a*, является одноходовым. При

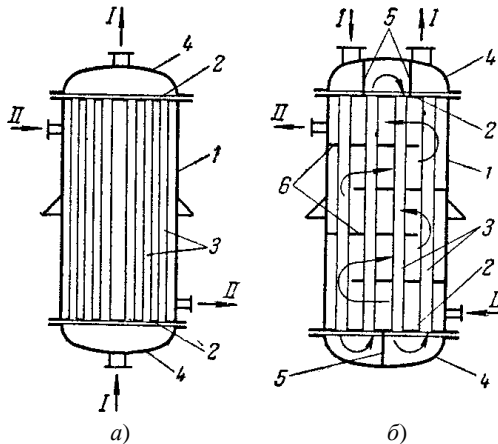


Рис. 1.2. Кожухотрубчатые теплообменники:

1 – корпус (обечайка); 2 – трубные решётки; 3 – трубы; 4 – крышки;
5 – перегородки в крышках; 6 – перегородки в межтрубном пространстве;
I, II – теплоносители

сравнительно небольших расходах жидкости скорость её движения в трубах таких теплообменников низка и, следовательно, коэффициенты теплоотдачи невелики.

Для увеличения последних при данной поверхности теплообмена можно уменьшить диаметр труб, соответственно увеличив их высоту (длину). Однако теплообменники небольшого диаметра и значительной высоты неудобны для монтажа, требуют высоких помещений и повышенного расхода металла на изготовление деталей, не участвующих непосредственно в теплообмене (кожух аппарата). Поэтому более рационально увеличивать скорость теплообмена путём применения многоходовых теплообменников (рис. 1.2, б).

Конструктивный расчёт. Выполняется после технологического и имеет своей целью определение конструктивных размеров оборудования (взаимного расположения элементов конструкции). Исходными данными являются технологические параметры, выявленные в результате технологического расчёта: поверхность теплопередачи, диаметр трубок, их длина и скорость движения теплоносителя.

1. Определяют площадь поперечного сечения трубок пучка одного хода

$$f_1 = \frac{V}{v},$$

где V – объёмный расход; v – скорость движения теплоносителя.

2. Вычисляют число трубок, приходящихся на один ход,

$$n = \frac{4f_1}{\pi d^2},$$

где d – внутренний диаметр трубок.

3. Вычисляют поверхность теплопередачи, приходящуюся на один ход,

$$F_1 = \pi d_{\text{cp}} l n,$$

где l – длина трубок; d_{cp} – средний диаметр.

4. Определяют число ходов

$$m = \frac{F}{F_1},$$

где F – общая поверхность теплопередачи (из технологического расчёта).

5. Определяют общее число труб в трубчатке

$$z = mn.$$

Принимают решение, будет ли это один теплообменник или несколько.

Далее проектируют размещение труб в решётке, размещая их по концентрическим окружностям, вершинам равносторонних треугольников и т.д. Шаг размещения трубок принимают равным $t = (1,25 \dots 1,5) d_{\text{нар}}$.

1.1.4. СПИРАЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Являются относительно универсальными, поскольку могут быть различным образом сориентированы в пространстве.

Поверхность теплообмена в спиральных теплообменниках (рис. 1.3) обычно образуется двумя согнутыми в виде спиралей металлическими листами 1 и 2. Внутренние концы спиралей присоединены к перегородке 3. Между листами образованы каналы прямоугольного сечения, по которым движутся теплоносители I и II. С торцов каналы закрыты плоскими крышками 4 и уплотнены прокладками 6. Крышки крепятся болтами к фланцам 5. Иногда расстояние между спиральми фиксируется приваренной к ним дистанционной полосой 7, которая, кроме того, придаёт спиральям жёсткость и прочность. У наружных концов спиралей и у центра крышки приварены патрубки 8 для ввода и вывода теплоносителей. Достоинством спиральных теплообменников является их компактность и возможность работы при больших скоростях теплоносителей: для жидкостей до 2 м/с, для газов до 20 кг/(м²с).

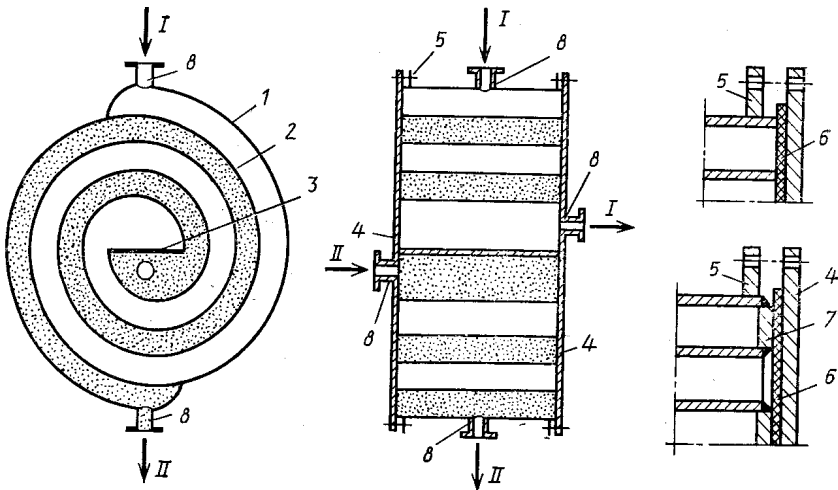


Рис. 1.3. Спиральный теплообменник:

1, 2 – металлические листы; 3 – перегородка; 4 – крышка; 5 – фланец;
6 – прокладка; 7 – дистанционная перегородка; 8 – патрубки; I, II – теплоносители

Благодаря отсутствию резких изменений скоростей теплоносителей гидравлическое сопротивление спиральных теплообменников меньше, чем кожухотрубчатых. Из недостатков спиральных теплообменников необходимо отметить сложность изготовления и практическую невозможность работы при давлениях выше 1 МПа.

1.1.5. ТЕПЛООБМЕННИК ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Используются для нагрева и охлаждения продуктов, например в стерилизаторах, пастеризаторах, охлаждения потоков после конденсации и др.

Теплообменники этой конструкции (рис. 1.4) состоят из нескольких последовательно соединённых трубчатых элементов, образованных двумя концентрически расположенными трубами. Один теплоноситель движется по внутренним трубам 1, а другой – по кольцевому зазору между внутренними 1 и наружными 2 трубами. Внутренние трубы соединяются калачами 3, а наружные трубы соединяются патрубками 4.

Благодаря небольшим поперечным сечениям трубного и межтрубного пространства в двухтрубчатых теплообменниках даже при небольших расходах достигаются довольно высокие скорости жидкости, равные обычно 1...1,5 м/с. Это позволяет получить более высокие коэффициенты теплопередачи и достигать более высоких тепловых нагрузок на единицу массы аппарата, чем в кожухотрубчатых теплообменниках. Кроме того, с увеличением скоростей теплоносителей уменьшается возможность отложения загрязнений на поверхности теплообмена.

Вместе с тем эти теплообменники более громоздки по сравнению с кожухотрубчатыми, и требуют большего расхода металла на единицу поверхности теплообмена, которая в аппаратах такого типа образуется только внутренними трубами.

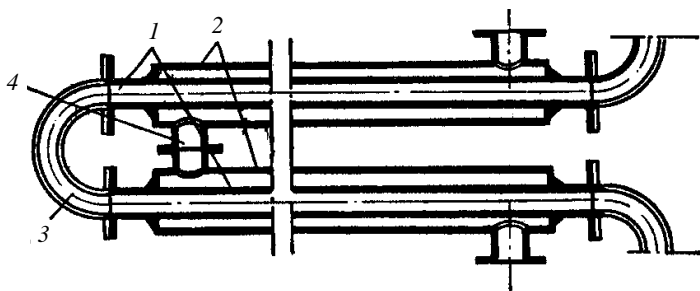


Рис. 1.4. Теплообменник типа «труба в трубе»:

1 – внутренние трубы; 2 – наружные трубы; 3 – калач; 4 – патрубок

Эти теплообменники могут эффективно работать при небольших расходах теплоносителей, а также при высоких давлениях. Если требуется большая поверхность теплообмена, то эти аппараты выполняют из нескольких параллельных секций.

Конструктивный расчёт. Исходными данными являются технологические параметры, выявленные в результате технологического расчёта: поверхность теплопередачи, диаметр трубок, их длина и скорость движения теплоносителя.

1. Определяют поверхность теплообмена прямого участка

$$F_1 = \pi d_{cp} l,$$

где l – длина участка теплопередачи.

2. Определяют число прямолинейных участков

$$n = \frac{F}{F_1},$$

где F – поверхность теплопередачи.

1.1.6. ПЛАСТИНЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

В ряде отраслей пищевой промышленности широкое распространение получила пластинчатая теплообменная аппаратура. Этому распространению способствуют приспособленность конструкции пластинчатых аппаратов к частой разборке и сборке, а также относительная простота очистки теплообменной поверхности от слоя пригара или осадка. Малые скорости потоков внутри пластинчатых теплообменных аппаратов позволяют успешно применять их для обработки жидких продуктов повышенной вязкости, а также пищевых эмульсий и суспензий.

На горизонтальных штангах 2 теплообменника (рис. 1.5) подвешен ряд теплообменных пластин 1. Концы штанг 2 укреплены в стойках 3 и 4.

В рабочем состоянии пластины сжаты с помощью плиты 5 и винта 6. Для изоляции канала для потока жидкости установлены резиновые прокладки 7. Пластины образуют параллельные каналы, по которым продвигаются подвергаемый тепловой обработке продукт и теплоноситель. Установка пластин с малым зазором позволяет компактно расположить рабочую поверхность теплообменника.

Основным и определяющим конструктивным элементом пластинчатых теплообменных аппаратов является теплообменная пластина.

При конструировании пластинчатых теплообменников обычно выбирается тип и размеры пластины, а расчётным путём определяется необходимое количество пластин и число каналов в пакете, обуславливающее рациональную компоновку проектируемого аппарата.

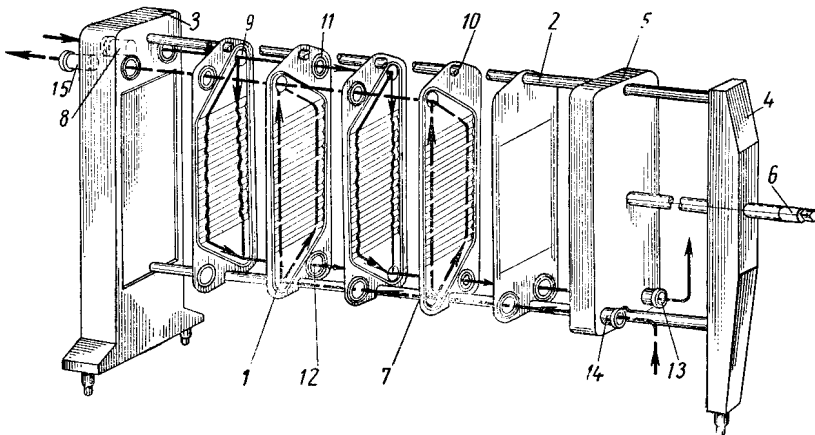


Рис. 1.5. Пластинчатый теплообменник:

- 1 – теплообменная пластина; 2 – штанга; 3 – передняя стойка; 4 – задняя стойка;
 5 – нажимная плита; 6 – винт; 7 – большая резиновая прокладка;
 8, 13 – 15 – штуцеры; 9 – верхнее угловое отверстие; 10 – граничная пластина;
 11 – кольцевая резиновая прокладка; 12 – нижнее угловое отверстие

Конструктивный расчёт. Исходные данные: поверхность теплопередачи, объёмные расходы и скорости теплоносителей (1...2 м/с – для жидкостей, 5...15 м/с – газы, воздух, 15...30 м/с – пары).

1. Определяют общую площадь поперечного сечения одного пакета пластин (пакеты набираются последовательно для обеспечения общей необходимой поверхности теплопередачи)

$$f_n = \frac{V}{\vartheta},$$

где V – объёмный расход; ϑ – скорость движения теплоносителя.

2. Определяют число параллельных каналов для прохода теплоносителя и используют это значение для вычисления числа пластин в пакете. Последнее равно числу каналов, умноженное на 2.

$$z_{\text{пак}} = \frac{2f_n}{f_1},$$

где f_1 – площадь поперечного сечения одного зигзагообразного канала.

3. Вычисляют площадь теплопередачи одного пакета

$$F_{\text{пак}} = z_{\text{пак}} F_{\text{пласт}},$$

где $F_{\text{пласт}}$ – площадь теплопередачи одной пластины.

4. Определяют число пакетов в пластине

$$n_{\text{пак}} = \frac{F}{F_{\text{пак}}}.$$

5. Вычисляют общее число пластин в теплообменнике

$$m = z_{\text{пак}} n_{\text{пак}}.$$

1.1.7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Расход пара D (кг/с) непрерывно действующего подогревателя (например, трубчатого) определяют из уравнения теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 = D(i - i_k) \quad \text{или} \quad D = (Q_1 + Q_2)/(i - i_k),$$

где Q_1 – расход теплоты на нагревание продукта, кВт; Q_2 – потери теплоты в окружающую среду, кВт; i , i_k – соответственно энтальпия греющего пара и конденсата, кДж/кг.

Расход теплоты на нагревание продукта Q_1 (кВт) находится из уравнения теплопередачи:

$$Q = Fk\Delta T,$$

где F – площадь поверхности нагрева, м^2 ; k – коэффициент теплопередачи, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; ΔT – разность температур, К.

Производительность непрерывно действующего подогревателя Π (кг/с):

$$\Pi = Fk\Delta T / c(T_2 - T_1),$$

где c – теплоёмкость продукта, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T_1 и T_2 – соответственно начальная и конечная температура продукта, К.

Мощность электродвигателя насоса N (кВт), перекачивающего продукт через трубчатый подогреватель:

$$N = V\Delta p / 10^3 \eta_n,$$

где V – объёмный расход перекачиваемого продукта, $\text{м}^3/\text{с}$; η_n – КПД насоса; Δp – давление, создаваемое насосом для преодоления суммарного гидравлического сопротивления, Па,

$$\Delta p = \left[1 + (\lambda z l / d) + \sum \xi \right] (\rho v^2 / 2) + \rho g H + \Delta p_{\text{доп}},$$

где ρ – плотность продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$; v – скорость движения продукта, $\text{м}/\text{с}$; $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; λ – коэффициент сопротивления трению; d – диаметр трубок подогревателя, м; z – число ходов; l – длина трубки, м; ξ – коэффициент

местных сопротивлений; H – высота подъема продукта, м; $\Delta p_{\text{доп}}$ – дополнительное давление, создаваемое при входе продукта в другой аппарат, Па.

Расход пара D (кг) подогревателей периодического действия определяют из уравнения теплового баланса:

$$D = Q_{\text{общ}} / (i - i_k),$$

где $Q_{\text{общ}}$ – общий расход тепла, кДж;

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

где Q_1 – расход теплоты на нагрев продукта, кДж; Q_2 – потери теплоты в окружающую среду, кДж; Q_3 – расход теплоты на испарение с поверхности зеркала продукта, кДж; Q_4 – расход теплоты на нагревание аппарата, кДж.

Производительность периодически действующего подогревателя Π (кг/с) определяют по объёму продукта, перерабатываемого за один цикл:

$$\Pi = V\rho / (\tau + \tau_1 + \tau_2),$$

где V – объём продукта в аппарате, м³; ρ – плотность продукта, кг/м³; τ , τ_1 , τ_2 – соответственно время нагревания, загрузки и разгрузки аппарата, с.

Необходимая поверхность теплопередачи определяется из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{ср}}},$$

где Q – тепловая нагрузка; K – коэффициент теплопередачи; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разность температур.

Тепловую нагрузку в соответствии с заданным технологическим условием определяют из теплового баланса для одного из теплоносителей

$$Q = G_1 c_1 (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}}) = G_2 c_2 (t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}}).$$

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи; λ и λ_3 – коэффициенты теплопроводности материала стенки и загрязнений; δ и δ_3 – толщина стенки и загрязнений.

Коэффициент теплопередачи находят из критерия Нуссельта:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где l – определяющий размер; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя.

Nu рассчитывается из критериальной зависимости для соответствующего случая теплообмена, ограниченного геометрией системы и диапазонами изменения критериев, входящих в это уравнение. В общем виде эти уравнения для теплоотдачи в трубе имеют следующий вид:

$$\text{Nu} = A \text{Re}^m \text{Pr}^n (\text{Pr}_ж / \text{Pr}_{ст})^p;$$
$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a},$$

где a – коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c\rho}$; ν – коэффициент кинематической вязкости.

Отношение $\text{Pr}_ж$ к $\text{Pr}_{ст}$ учитывает влияние направления теплового потока на величину коэффициента теплоотдачи.

Среднюю разность температур $\Delta t_{ср}$ определяют как среднелогарифмическую величину

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}.$$

В теплообменниках с перекрёстными или смешанными потоками теплоносителей $\Delta t_{см}$ определяется через среднюю логарифмическую для противотока с использованием поправочного коэффициента

$$\Delta t_{см} = \varepsilon \Delta t_{ср}.$$

Гидравлический расчёт. Данный расчёт проводится для определения сопротивления создаваемого теплообменником для перемещения жидкости и газа и мощности, которую необходимо на это затратить. Гидросопротивление теплообменника складывается из потерь напора на трение и потери напора на местное сопротивление

$$\Delta P = \Delta P_{тр} + \Delta P_{м.с}, \quad \Delta P_{тр} = \lambda_m \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2},$$

где λ_m – коэффициент гидравлического сопротивления; L – длина прямого участка трубы; d – эквивалентный диаметр.

Коэффициент гидравлического сопротивления:

– для ламинарного режима $\lambda_m = \frac{64}{\text{Re}}$;

– для турбулентного режима $\lambda_m = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}$.

Общие потери напора на преодоление местного сопротивления

$$\Delta P_{\text{м.с}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho v^2}{2} \xi_i,$$

где ξ_i – коэффициент местного сопротивления.

Мощность, необходимая на преодоление сопротивления,

$$N = \frac{V \Delta P}{1000 \eta},$$

где V – объёмный расход теплоносителя; η – КПД насоса.

Общая схема расчёта

1. Расчёт тепловых нагрузок (определение Q).
2. Расчёт теплового баланса.
3. Определение температурного режима и определение $\Delta t_{\text{ср}}$.
4. Приближённая оценка α , K , F .
5. Выбор типа конструкции и определение геометрических параметров конструкции.
6. Уточнение α , K , F .
7. Сопоставление F и $F_{\text{ор}}$. Если $F > F_{\text{ор}}$ или $F \ll F_{\text{ор}}$, то необходимо вернуться в п. 5.
8. Гидравлический расчёт.
9. Техничко-экономический расчёт.
10. Выбор оптимального варианта конструкции.

1.2. ВЫПАРНЫЕ АППАРАТЫ И УСТАНОВКИ

1.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Выпаривание – концентрирование растворов при кипении за счёт превращения в пар части растворителя. Образующийся при этом вторичный пар может быть использован как горячий теплоноситель в других аппаратах. В пищевой промышленности обычно выпаривают водные растворы: свекловичный сок, барду, молоко и др.

Выпарные аппараты предназначены для повышения концентрации вещества, находящегося в растворе, или частичного выделения его в твёрдом виде из пересыщенного раствора выпариванием растворителя.

Многокорпусные выпарные установки позволяют более экономично использовать теплоту благодаря многократному использованию пара и снижать количество выпаренной воды в последнем корпусе.

Сок сгущают в выпарных установках, которые являются потребителями отработавшего пара и одновременно генераторами пара для технологических нужд. В них пар более высокого потенциала преобразуется в пар с пониженным давлением и температурой, который затем используется для нагревания различных промежуточных продуктов.

Выпарные установки классифицируют: по давлению вторичного пара в последнем корпусе (работающие при избыточном давлении и под разрежением) и по числу корпусов (трёх-, четырёх- и пятикорпусные). При этом выпарные установки komponуют из вертикальных выпарных аппаратов с естественной циркуляцией сока, имеющих номинальную площадь поверхности теплообмена: 500, 600, 800, 1000, 1180, 1500, 1800, 2120, 2360, 3000 и 4500 м².

Вакуум-аппараты работают при давлении ниже атмосферного и предназначены для уваривания утфелей. Форма корпуса вакуум-аппарата зависит от его конструкции и бывает цилиндрической (с расширенной верхней частью), сферической или прямоугольной с полукруглой крышкой. Греющие камеры вакуум-аппаратов могут иметь различную конструкцию. Наибольшее распространение получили вакуум-аппараты с подвесными греющими камерами, верхние и нижние трубные решётки которых имеют различную конфигурацию (конические, сферические, двускатные и др.). Пар поступает в межтрубное пространство греющих камер, а увариваемый продукт перемещается внутри труб.

Диаметр греющей камеры в большинстве конструкций вакуум-аппаратов меньше диаметра корпуса аппарата, таким образом, между стенками греющей камеры и корпусом вакуум-аппарата образуется кольцевое пространство, по которому циркулирует утфель.

Сепарирующие устройства в вакуум-аппаратах, так же как и в выпарных аппаратах, предназначены для отделения от вторичного пара капель продукта. Так как в вакуум-аппаратах продукт имеет большую вязкость, то используются сепараторы только инерционного типа, которые устанавливаются над утфельным пространством в верхней части корпуса аппарата.

Утфели увариваются при температурах 70...80 °С при остаточном давлении в надутфельном пространстве аппаратов около 0,015 МПа. Перепады температуры в вакуум-аппаратах составляют 30...50 °С при обогреве паровых камер вторичным паром выпарных установок и около 80 °С при обогреве свежим паром.

1.2.2. ВАКУУМНЫЙ ВЫПАРНОЙ АППАРАТ ВАЦ-600

В сахарной промышленности применяется вакуум-аппарат ВАЦ-600 (рис. 1.6) периодического действия с поверхностью нагрева 300 м². Он имеет корпус с расширенным надутфельным пространством. В корпусе рас-

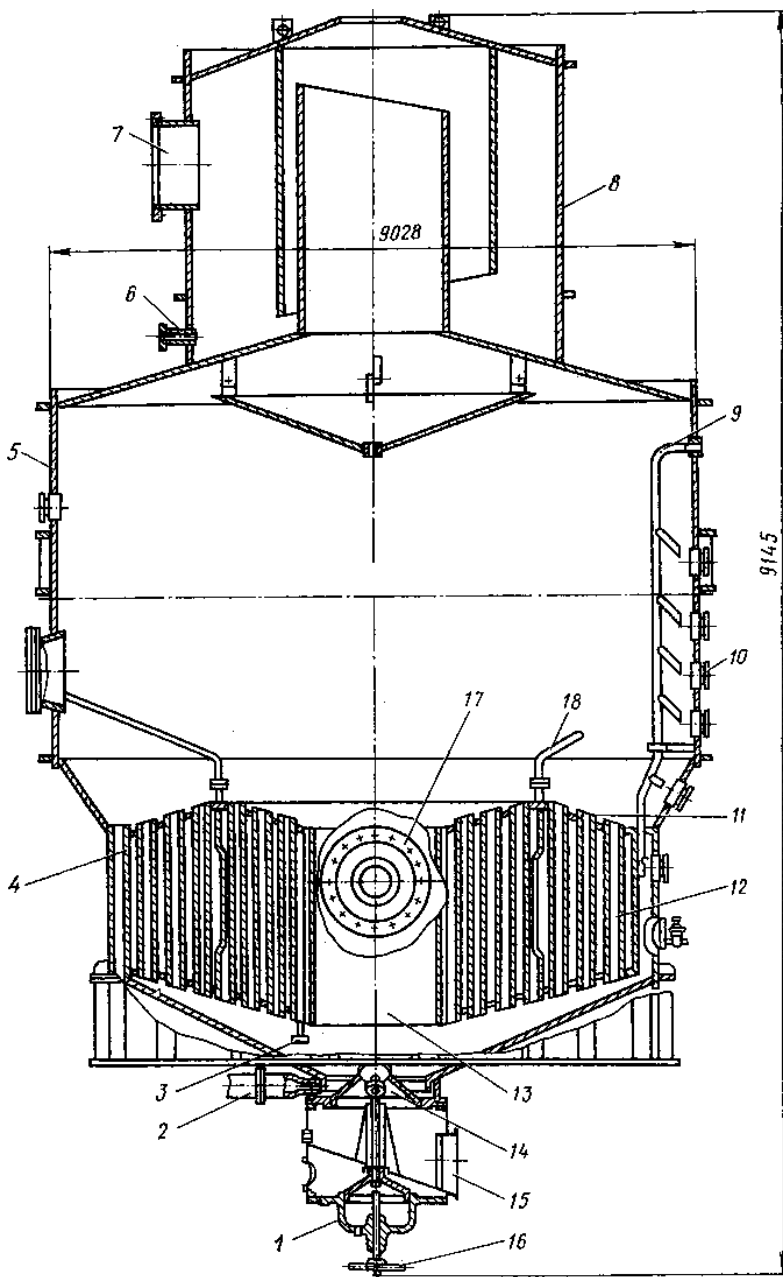


Рис. 1.6. Вакуум-аппарат ВАЦ-600

положена паровая камера 4 с циркуляционной трубой 13 и двускатными трубными решётками 11 с завальцованными в них трубками 12 диаметром 102×3,5 мм. Сироп и оттеки подаются через коллектор 2 и поступают под запорный конический клапан 14, при открывании которого штоком гидрорцилиндра 1 с ручным дублером 16 утфель через патрубок 15 отводится из аппарата.

Греющий пар подаётся в паровую камеру через патрубок 17. Утфельный пар, пройдя ловушку 8, отводится через патрубок 7 на конденсатор. Конденсат отводится из паровой камеры по патрубку 3, а неконденсирующиеся газы – по трубкам 18. Сообщение с атмосферой происходит через патрубок 6.

Аппарат снабжён пробным краном, смотровыми стёклами 10, для пропаривания которых служит трубка 9, вакуумметром и термометром.

1.2.3. УНИФИЦИРОВАННЫЙ ЗМЕЕВИКОВЫЙ ВАКУУМ-АППАРАТ 33-А

Унифицированный змеевиковый вакуум-аппарат 33-А (рис. 1.7) предназначен для непрерывного уваривания кондитерских масс. Он состоит из трёх частей: греющей I, выпарной II и сепаратора-ловушки III. Греющая и выпарная части соединены между собой трубопроводом. Ловушку устанавливают на трубопроводе, соединяющем выпарную камеру с конденсатором смешения и вакуум-насосом.

Греющая часть I представляет собой цилиндрический стальной корпус 17 с приваренным к нему штампованным стальным днищем в нижней части и съёмной крышкой 16. Внутри корпуса смонтирован медный змеевик 15, имеющий два ряда витков, соединённых между собой последовательно. Нижний конец змеевика присоединяется к трубопроводу от сиропного плунжерного насоса, питающего вакуум-аппарат, а верхний – к соединительному трубопроводу 14, идущему в выпарную часть вакуум-аппарата, которая в свою очередь соединяется трубопроводом с конденсатором смешения поршневого мокровоздушного вакуум-насоса.

В верхней части корпуса греющей части аппарата имеется штуцер для подачи греющего пара; на крышке смонтированы манометр 12, предохранительный клапан 13 и кран для выпуска воздуха. В днище аппарата имеются штуцер 9 для подачи сиропа, штуцер 10 для спуска конденсата и кран 18 для продувки аппарата.

Выпарная часть II вакуум-аппарата состоит из двух стальных обечайек – верхней 5 и нижней 7 – и нижнего стального конуса (копильника) 3, соединённых между собой фланцами и откидными болтами. Между обечайками помещена конусная медная чаша 6, горловина которой перекрывается клапаном 4. Конусная чаша, полость верхней обечайки и сферическая

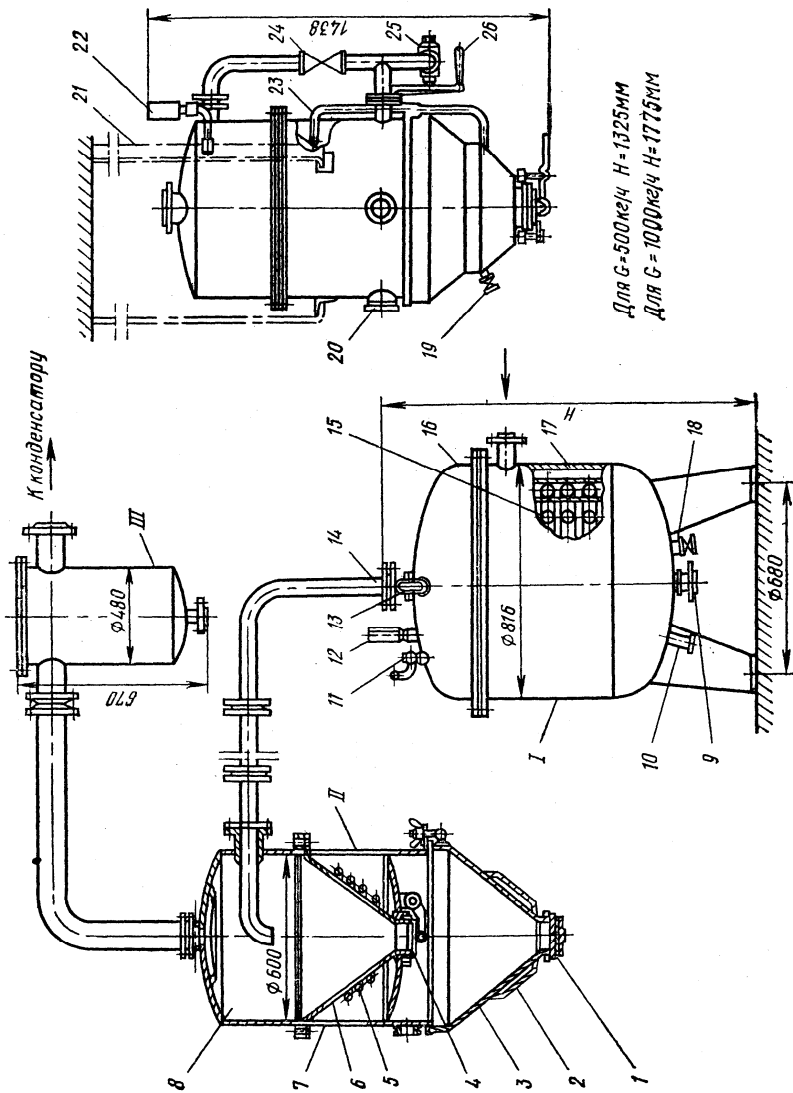


Рис. 1.7. Унифицированный эжекторный вакуум-аппарат 33-А

стальная крышка образуют верхнюю вакуум-камеру вместимостью 140 л. Объём нижнего конусного копильника 90 л. Для предотвращения застывания увариваемой массы на стенках конусной чаши 6 с наружной стороны смонтирован змеевик 5, в котором циркулирует греющий пар, подаваемый через трубку 23.

Верхний внутренний клапан 4, открываемый и закрываемый с помощью рукоятки 26, служит для обеспечения непрерывности процесса уваривания (при выгрузке готовой массы он перекрыт) и для выпуска из верхней камеры в нижний приёмный конус уваренной массы, скапливающейся во время разгрузки аппарата.

На верхней обечайке вакуум-камеры со стороны рабочего места смонтирован вакуумметр 22 для контроля за разрежением.

Нижний конус вакуум-камеры для предотвращения застывания подготовленной к выгрузке массы на 3/4 высоты омывается греющим паром, подаваемым в паровую рубашку 2 по трубке 23. Для выпуска воздуха из рубашки 2 предусмотрен воздушный кран 19, а для периодической выгрузки готовой массы – наружный клапан 1 с рукояткой. Наблюдение за выходом массы осуществляется через смотровые окна 20 в нижней приёмной части вакуум-камеры. Для сообщения верхней вакуум-камеры с нижним приёмником и нижнего приёмника с атмосферой предусмотрена соединительная трубка с кранами 24 и 25.

Выпарная часть вакуум-аппарата крепится на тросах 21 к потолку или на кронштейнах к стене.

Змеевиковые вакуум-аппараты этого типа удобны для установки в поточных линиях и не требуют сооружения специальных площадок для монтажа греющей части аппарата. Кроме того, греющая часть вакуум-аппарата вместе с плунжерным сиропным насосом и вакуум-насосом может быть установлена на некотором расстоянии от выпарной части вакуум-аппарата или в другом помещении, что обеспечивает лучшее санитарное состояние цеха.

Сепаратор-ловушка III, предназначенный для задерживания частичек уваренной массы, уносимых вторичным паром, представляет собой цилиндрический стальной сосуд с плоской крышкой и перегородкой внутри, расположенной напротив входного патрубка. Задержанные частицы отводятся через нижний патрубок ловушки для последующей переработки.

Увариваемый сироп из расходного сиропного бака плунжерным насосом непрерывно нагнетается в змеевик аппарата под давлением 0,4 МПа. Одновременно в корпус греющей части аппарата через верхний штуцер подаётся греющий пар. В паровом пространстве аппарата греющий пар омывает змеевик 15 и конденсируется. Конденсат непрерывно отводится через штуцер 10 в конденсатоотводчик.

Давление греющего пара контролируется манометром 12, в случае увеличения давления пара выше допустимого срабатывает предохранительный клапан 13.

Поступающий в двоянный змеевик сироп поднимается сначала по виткам внутреннего змеевика, затем переходит по вертикальной соединительной трубе в нижний виток наружного змеевика и движется далее вверх по его виткам; из верхнего витка наружного змеевика уваренная масса переходит по соединительному трубопроводу 14 в вакуум-камеру аппарата, в которой конденсатором смешения создаётся разрежение, поддерживаемое с помощью поршневого мокровоздушного вакуум-насоса, присоединяемого к вакуум-камере. Масса, получаемая в результате выпаривания сиропа в змеевике, непрерывно поступает в вакуум-камеру, при этом процесс уваривания массы до конечной влажности 1,5...2,5% продолжается благодаря интенсивному самоиспарению влаги в разрежённом пространстве. Расположенный у сферической крышки вакуум-камеры отбойник препятствует уносу массы в конденсатор.

По мере накопления готовой массы в вакуум-камере её периодически, через каждые 2 мин, выгружают, не нарушая непрерывности процесса уваривания.

Для выгрузки скопившейся готовой массы из нижнего конуса 3 вакуум-камеры при закрытом верхнем клапане 4 открывают нижний клапан 1 и одновременно соединяют нижний конус с атмосферой, открывая воздушный кран 25. По окончании выгрузки массы закрывают нижний клапан и воздушный кран, затем, прежде чем открыть верхний клапан 4, выравнивают давление в обеих частях вакуум-камеры, для чего при закрытом нижнем клапане открывают кран 24, соединяющий верхнюю и нижнюю части камеры. После этого закрывают кран 24, открывают верхний клапан 4 и процесс уваривания продолжают с использованием полного объёма обеих частей вакуум-камеры.

1.2.4. ПЛЁНОЧНЫЙ ПРЯМОТОЧНЫЙ ВЫПАРНОЙ АППАРАТ ВАПП-1250

Сок, подогретый до температуры кипения, поступает в приёмную камеру 7 аппарата (рис. 1.8), затем в трубки 6, где закипает, и вместе с образовавшимся паром движется вверх по греющей камере 4. Пройдя сепарирующее устройство 2 и надставку 3, где от сока отделяется пар, сок далее через распределительное устройство 13 поступает в кипятильные трубки 5 плёночной части аппарата и в виде тонкой плёнки стекает по внутренней поверхности. Образовавшийся пар вместе со сгущённым соком поступает в нижний сепаратор 9. Вторичный пар по системе труб 12 из сепараторов 1 и 9 отводится в следующий корпус. Аппарат отвечает технологическим и теплотехническим требованиям, предъявляемым к

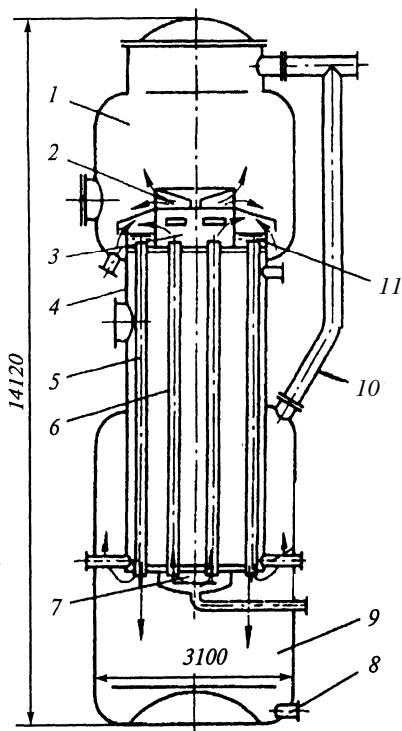


Рис. 1.8. Плёночный прямоточный выпарной аппарат ВАПП-1250:

1, 2, 9 – сепараторы; 3 – надставка; 4 – греющая камера;
 5 – кипяточные трубки; 6 – трубки; 7 – приёмная камера; 8 – штуцер;
 10 – трубы; 11 – распределительное устройство

выпарным аппаратам, и имеет лучшие показатели, чем достигаемые в типовых аппаратах с естественной циркуляцией. Время пребывания сока в тонкоплёночном аппарате значительно меньше, чем в типовых. Аппарат может эффективно работать при малой полезной разности температур. Отсутствуют потери полезной разности температур от гидростатического давления вследствие свободного стекания плёнки выпариваемого раствора.

1.2.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ МНОГОКОРПУСНОЙ ВАКУУМНОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

Конкретный вид расчётных зависимостей для определения технологических параметров выпарной установки зависит от конструктивных особенностей последней, режима работы (плёночные аппараты, с внутренней или выносной циркуляционной трубой, атмосферные, вакуумные и т.д.).

Наиболее общим является технологический расчёт многокорпусной выпарной установки.

Исходными данными для расчёта являются: количество упаренного раствора, его начальная и конечная концентрации, физико-химические свойства раствора в зависимости от концентрации и температуры (плотность, вязкость, давление насыщенных паров и т.д.).

Порядок расчёта. Вычисляют количество упаренной воды

$$W = G_p \left(1 - \frac{x_H}{x_K} \right).$$

С использованием расчётных зависимостей теории подобия вычисляют значение коэффициентов теплопередачи по корпусам: K_1, K_2, K_3 . В случае особых затруднений на первом этапе можно применить следующее соотношение:

$$K_1 : K_2 : K_3 = 1 : 0,75 : 0,5.$$

Распределяют испаряемую влагу W по корпусам, при этом могут быть использованы два принципа:

- 1) минимальной общей поверхности теплопередачи;
- 2) равенство поверхностей теплопередачи по корпусам.

С целью унификации конструкции выпарных аппаратов пользуются вторым принципом.

$$W_i = \frac{WK_i}{\sum_1^3 K_i}.$$

Вычисляют количество тепла, затрачиваемое на упаривание в каждом корпусе,

$$Q_i = W_i r_i,$$

где r – теплота парообразования.

Вычисляют общую полезную разность температур по всей установке

$$\Delta t_{\text{пол}} = t_{\text{гр.пар}}^1 - t_{\text{втор.пар}}^3 - \Delta t_{\text{пот}},$$

где $t_{\text{гр.пар}}^1$ – температура греющего пара в 1-м корпусе; $t_{\text{втор.пар}}^3$ – температура вторичного пара в 3-м корпусе; $\Delta t_{\text{пот}}$ – потери полезной разности температур.

Далее распределяют полезную разность температур по корпусам

$$\Delta t_{\text{инно}} = \frac{\Delta t_{\text{пол}} \frac{Q_i}{K_i}}{\sum_1^n \frac{Q_i}{K_i}}.$$

Затем определяют поверхность теплопередачи по каждому из корпусов

$$F_{i,p} = \frac{Q_i}{\Delta t_{\text{инно}} K_i}.$$

Затем определяют $F_{i,\phi}$ – фактическую поверхность теплопередачи из условия равенства поверхностей по корпусам. Для этого находят наибольшее $F_{i,p}$ и увеличивают поверхность на 20...30%.

На следующем этапе вычисляют фактическую производительность выпарной установки с учётом принятого запаса производительности

$$G_{\phi} = G_p \frac{n F_{i,\phi}}{\sum_1^n F_{i,p}},$$

где n – число корпусов; G_p – запас производительности.

На последнем этапе уточняют расход греющего пара в 1-м корпусе и количество образующегося вторичного пара в последнем корпусе с использованием уравнения теплового баланса.

1.3. КОНДЕНСАТОРЫ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК

В промышленности широко распространены процессы конденсации (ожижения) паров различных веществ путём отвода от них тепла. Эти процессы осуществляют в аппаратах, называемых конденсаторами.

Различают два вида конденсации:

- 1) поверхностную (или просто конденсацию), при которой конденсирующиеся пары и охлаждающий агент разделены стенкой и конденсация паров происходит на внутренней или внешней поверхности холодной стенки;
- 2) конденсацию смешением, при которой конденсирующиеся пары непосредственно соприкасаются с охлаждающим агентом.

Поверхностная конденсация осуществляется в теплообменниках – поверхностных конденсаторах. В общем случае в поверхностный конденсатор поступает перегретый пар. Очень часто охлаждающим агентом является вода.

Конденсация смешением. Если конденсации подвергаются пары жидкостей, не растворимых в воде, или пар, являющийся неиспользуемым отходом того или иного процесса, охлаждение и конденсацию этих паров можно проводить путём непосредственного смешения с водой. Этот процесс осуществляется в аппаратах, называемых конденсаторами смешения.

Эффективность работы конденсаторов смешения находится в прямой зависимости от поверхности соприкосновения охлаждающей воды и пара, поэтому поверхность соприкосновения увеличивают, распыляя охлаждающую воду при помощи различных устройств.

В зависимости от способа вывода из аппаратов потоков различают мокрые и сухие конденсаторы смешения. В мокрых конденсаторах охлаждающую воду, конденсат и неконденсирующиеся газы (воздух) отводят из нижней части аппарата совместно при помощи мокровоздушного насоса, в сухих охлаждающая вода с конденсатом отводятся из нижней части аппарата, а воздух отсасывается вакуум-насосом из верхней части.

Кроме того, различают прямоточные конденсаторы смешения, в которых охлаждающая вода и пар движутся в одном направлении (сверху вниз), и противоточные, в которых пар и охлаждающая вода движутся в противоположных направлениях (вода сверху вниз, а пар снизу вверх).

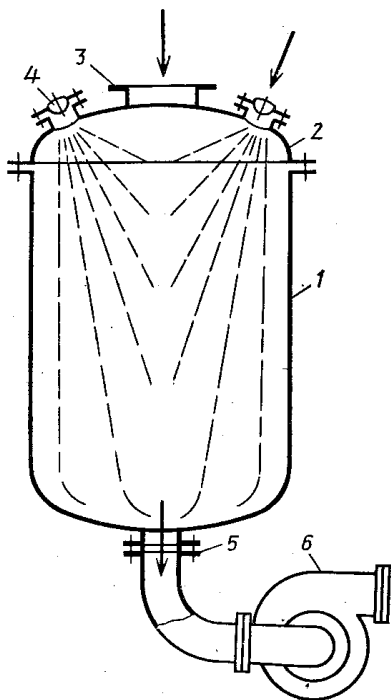


Рис. 1.9. Мокрый прямоточный конденсатор смешения:

- 1 – корпус конденсатора; 2 – крышка;
- 3 – патрубок для ввода пара;
- 4 – распыляющее сопло; 5 – патрубок для вывода воды, конденсата и воздуха;
- 6 – мокровоздушный насос

На рисунке 1.9 изображён мокрый прямоточный конденсатор смешения. В корпус 1 конденсатора через патрубок 3 на крышке 2 вводится конденсирующийся пар. Охлаждающая вода подаётся через распыляющее сопло 4. Нагретая вода вместе с конденсатом и воздухом выводится через патрубок 5 мокровоздушным насосом 6.

Расход охлаждающей воды на конденсацию пара определяют из теплового баланса конденсатора:

$$DH + Wc_B t_{BH} = (D + W)c_B t_{BK};$$

$$Wc_B = \frac{D(H - c_B t_{BK})}{c_B(t_{BK} - t_{BH})},$$

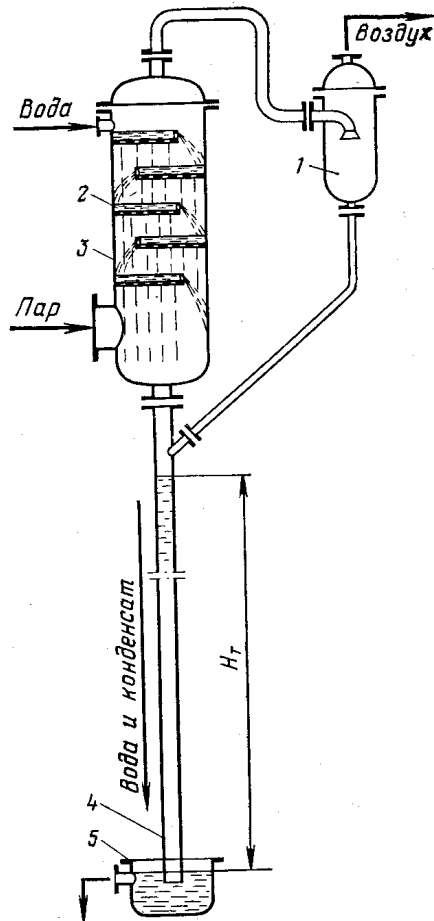


Рис. 1.10. Противоточный барометрический конденсатор:

- 1 – брызгоуловитель;
- 2 – перфорированная полка;
- 3 – конденсатор;
- 4 – барометрическая труба;
- 5 – гидравлический затвор

где W – расход охлаждающей воды, кг/ч; D – количество конденсирующегося пара, кг/ч; H – энтальпия конденсирующегося пара, кДж/кг; c_v – теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C); $t_{вк}$ и $t_{вн}$ – соответственно начальная и конечная температура воды, °C.

На рисунке 1.10 изображён противоточный барометрический конденсатор. Пар на конденсацию поступает в конденсатор 5 через штуцер в нижней части аппарата. В конденсаторе расположен ряд перфорированных полок 2. Охлаждающая вода подаётся на верхнюю полку. Затем она перетекает с полки на полку в виде тонких струй через отверстия и борта. Образовавшийся конденсат вместе с водой выводится через патрубок в нижней части аппарата. Воздух отводится через патрубок в верхней части аппарата и, пройдя брызгоуловитель 1, осушенным удаляется из системы с помощью вакуум-насоса. По способу выхода потоков этот конденсатор относится к группе сухих.

Процесс конденсации в барометрических конденсаторах протекает под вакуумом; обычно давление в них составляет $10^4 \dots 2 \cdot 10^4$ Па.

Для отвода из аппарата воды и конденсата служит барометрическая труба 4.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Массообменные процессы основаны на избирательном обмене отдельными компонентами между фазами многокомпонентных систем через поверхности контакта фаз. Переход распределяемого компонента через поверхность контакта в другую фазу определяется законами молекулярного, конвективного и турбулентного переноса.

В пищевой промышленности широко используются массообменные процессы, а именно экстракция, ректификация, перегонка и др. Экстракционные аппараты применяются в сахарном производстве и при выработке растительных масел. Брагоректификационные установки являются основным технологическим оборудованием спиртового производства.

Экстракция – процесс извлечения одного или нескольких компонентов из сложного по составу сырья с помощью жидкого растворителя, обладающего избирательной способностью. Процесс экстракции с применением растворителя обеспечивает практически полное извлечение продукта из соответствующего сырья.

Ректификация – процесс разделения жидких летучих смесей на компоненты или группы компонентов (фракции) путём многократного двустороннего тепло- и массообмена между противоточно движущимися паровыми и жидкостными потоками.

2.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ МЕТОДОМ РЕКТИФИКАЦИИ

2.1.1. БРАГОПЕРЕГОННЫЕ УСТАНОВКИ

В спиртовой промышленности применяются брагоперегонные установки двух типов – одноколонные и двухколонные.

В одноколонной установке (рис. 2.1) бражка, предварительно подогретая в дефлегматоре 4, поступает на верхнюю тарелку колонны 1. Нижняя часть колонны называется бражной, куда снизу подводится греющий пар. Из бражной колонны водно-спиртовые пары направляются в нижнюю часть спиртовой колонны 2; здесь пары укрепляются. Из колонны 2 укрепленные пары поступают в межтрубное пространство дефлегматора 4. Конденсируясь, пары отдают теплоту бражке, протекающей в трубах дефлегматора. Конденсат водно-спиртовых паров возвращается в колонну 2 в виде флегмы. Несконденсировавшиеся пары направляются в холодильник 5, где они конденсируются и образуют спирт-сырец. Спирт-сырец содержит не только воду и спирт, но и другие летучие продукты, входящие в состав бражки.

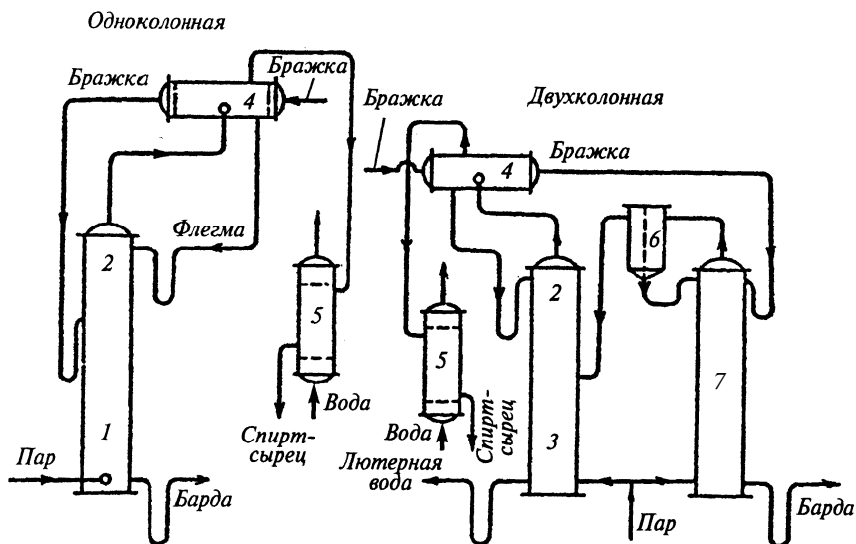


Рис. 2.1. Принципиальные схемы брагоперегонных установок

В двухколонной установке подогретая в дефлегматоре 4 бражка поступает в бражную колонну 7, где из бражки испаряется спирт. Водно-спиртовые пары через ловушку 6 попадают во вторую колонну. В ловушке отделяется жидкость, увлечённая парами; отсюда она возвращается в колонну 1. Верхняя часть колонны 2 служит для укрепления паров спиртом; нижняя часть колонны 3 предназначена для истощения (вываривания) стекающей флегмы, откуда отводится лютерная вода. Таким образом, в этой установке из бражки и флегмы спирт испаряется отдельно, вследствие чего повышается концентрация сухих веществ в барде.

Одноколонный брагоперегонный аппарат. Аппарат (рис. 2.2) состоит из колонны 2, дефлегматора 7 с горизонтальными трубами и конденсатора-холодильника 11 для спирта.

Во время работы аппарата бражка насосом прокачивается через трубы дефлегматора, где она прогревается теплом водно-спиртовых паров, конденсирующихся в межтрубном пространстве. Подогретая бражка проходит через смотровой фонарь 8 и поступает на верхнюю тарелку бражной части колонны 2, температура в которой измеряется с помощью термометра 5.

Греющий пар поступает в нижнюю часть бражной колонны 2. Количество его регулируется манометрическим паровым регулятором (на схеме не показан). Истощённая бражка отводится через бардяной поплавковый регулятор 1. Содержание спирта в отходящей барде контролируется пробным холодильником 4.

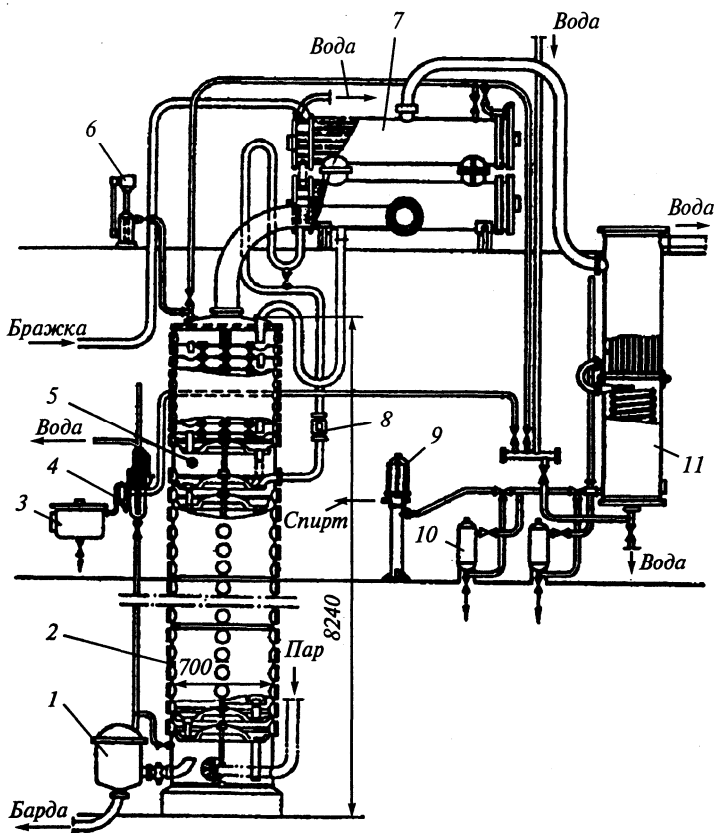


Рис. 2.2. Одноколонный брагоперегонный аппарат

Из бражной части колонны водно-спиртовые пары поступают на верхнюю часть колонны (спиртовую). На тарелках этой колонны они вступают в контакт с флегмой, стекающей из дефлегматора 7, и укрепляются. Флегма образуется в дефлегматоре 7. Несконденсировавшиеся в дефлегматоре пары поступают в межтрубное пространство верхней части холодильника. Здесь они конденсируются, образуя спирт-сырец. Конденсат стекает в змеевиковую нижнюю часть холодильника, которая служит для охлаждения спирта-сырца. Спирт-сырец проходит через фильтр 10 и направляется в фонарь 9.

Гидравлический предохранитель 6 предотвращает образование в колонне вакуума. Жидкость из пробного холодильника поступает в сборник 3.

Колонна изготавливается из меди. При приёмке она испытывается под давлением 0,1 МПа.

Горизонтальный дефлегматор (рис. 2.3) состоит из двух барабанов 1. Он имеет две трубчатые многоходовые поверхности охлаждения 2. В одной из них по трубам протекает бражка, в другой – охлаждающая вода. Бражка и вода делают в дефлегматоре несколько ходов, что обеспечивается соответствующим расположением перегородок в распределительных коробках.

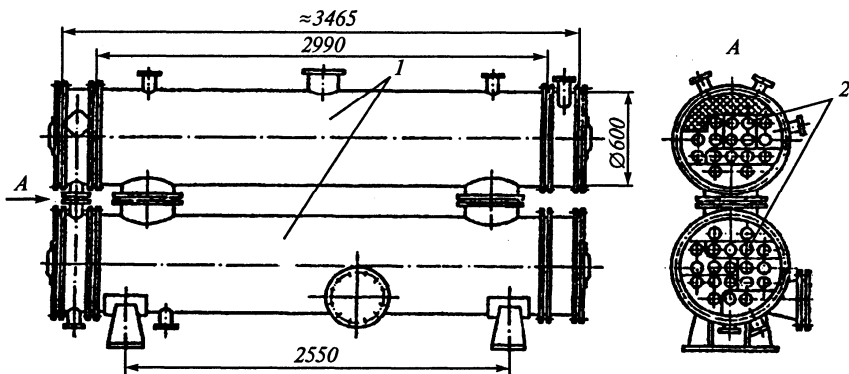


Рис. 2.3. Двухбарабанный горизонтальный дефлегматор

Для направления потока пара в межтрубном пространстве дефлегматора установлены поперечные перегородки. Бражные трубы дефлегматоров изготавливают из меди, водяные трубы – из стали. Дефлегматор испытывают гидравлическим давлением 0,4 МПа для трубного пространства и 0,15 МПа для межтрубного пространства. Корпус дефлегматора, коробки, крышки, решётки, фланцы, патрубки и трубы водяной секции изготавливаются из углеродной стали; трубы бражной секции – из меди; обечайки, фланцы, днище и решётки – из стали.

2.1.2. РЕКТИФИКАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ

В спирте-сырце содержится более 40 различных летучих веществ. По химическому характеру они весьма разнообразны, но с точки зрения ректификации могут быть разделены на три основные группы: головные, хвостовые и промежуточные. Это разделение произведено в зависимости от летучести примесей в условиях работы ректификационных установок. В непрерывно действующих установках примеси отбирают непрерывно с тех тарелок колонн, где они накапливаются в наибольшем количестве.

Выделение примесей из спирта-сырца осуществляется в ректификационных установках (непрерывных и периодических).

В непрерывно действующих ректификационных аппаратах на тарелках колонн устанавливается определённая крепость водно-спиртового

раствора, повышающаяся от нижних тарелок к верхним. Головные примеси проходят через всю колонну не задерживаясь. Промежуточные и хвостовые примеси задерживаются в зоне тех тарелок, на которых они будут иметь коэффициент ректификации, близкий к единице. Отсюда они и отводятся.

В ректификационных установках непрерывного действия из спирта-сырца получают спирт-ректификат, непрерывно отбирая побочные продукты – эфиральдегидную фракцию, сивушное масло, промежуточные продукты. Отходом ректификации является лютерная вода.

На спиртовых заводах страны широкое распространение получили установки, в которых в одной колонне из спирта-сырца сначала выделяются более летучие компоненты. Затем спирт-сырец, освобождённый от основной массы головных продуктов, поступает во вторую колонну, где происходит выделение спирта-ректификата, отбор сивушного масла и отходит лютерная вода. В этой же колонне отбирается остаток головной фракции. Таким образом, разделение сложной смеси, какой является спирт-сырец, производится в установке, состоящей из двух колонн. Первая из них называется эспирационной, вторая – ректификационной.

В двухколонной ректификационной установке (рис. 2.4) спирт-сырец из напорного резервуара 5 через регулятор 6 поступает в подогреватель 31, здесь спирт-сырец подогревается за счёт охлаждения лютерной воды, отходящей из ректификационной колонны 21. Подогретый спирт-сырец поступает в смеситель 3, где смешивается с лютерной водой, поступающей из напорного резервуара 16, закачиваемой насосами 33 из ёмкости 32. Спирт-сырец разбавляется лютерной водой для повышения коэффициента ректификации примесей. Разбавленный подогретый спирт-сырец поступает в эспирационную колонну 4, которая состоит из двух частей: нижней, расположенной ниже входа спирта-сырца, и верхней. Эспирационная колонна имеет горизонтальный трубчатый дефлегматор 7 с водяным охлаждением и вертикальный трубчатый конденсатор 8 со смотровым фонарём 9. В этой колонне выделяются головные продукты, которые поступают в фонарь 25, а оттуда в сборник. Спирт-сырец (эпюрат), освобождённый от большей части головных примесей, направляется снизу эспирационной колонны в ректификационную колонну 21. Эта колонна снабжена двухбарабанным дефлегматором 14 и конденсатором 12 со смотровым фонарём 11. В колонне 21 спирт-ректификат отбирается с одной из верхних тарелок (4-й или 5-й сверху) в жидком виде и направляется в холодильник 18 для спирта-ректификата, а оттуда в фонарь 17. Часть головных продуктов, оставшаяся в эпюрате, выделяется в ректификационной колонне и отводится из конденсатора 12 в эспирационную колонну. Этот продукт называется непастеризованным, или нестандартным, спиртом.

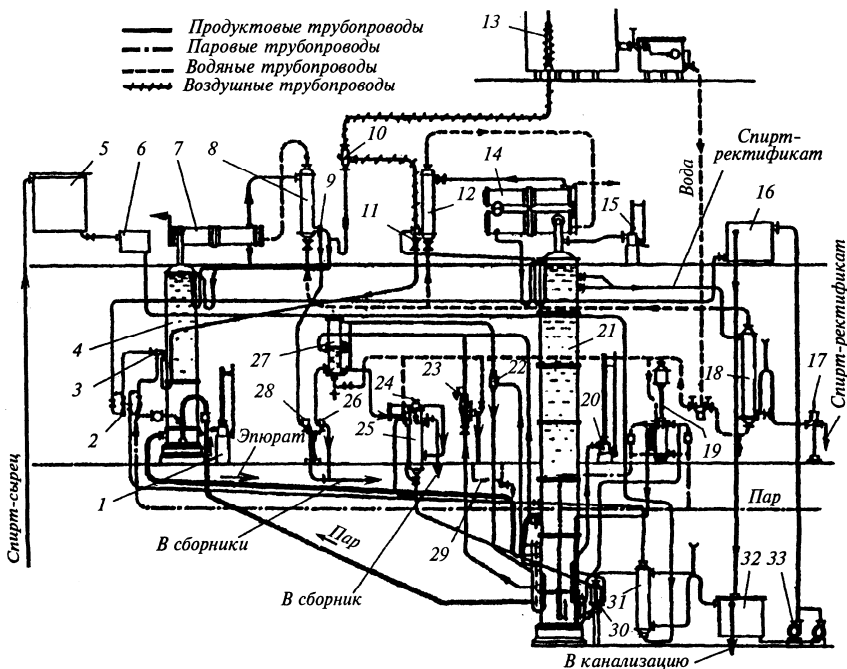


Рис. 2.4. Принципиальная схема двухколонной ректификационной установки

Пары сивушного масла через сепаратор 22 поступают в верхнюю секцию холодильника 27, где они конденсируются. Конденсат поступает в маслоотделитель 25 через смеситель 24, куда добавляется вода, необходимая для выделения масла. Выделившееся масло направляется в сборник, а водно-спиртовой раствор возвращается в колонну через подогреватель 30. В ректификационной колонне отбираются также промежуточные продукты (крепкий сивушный спирт), которые направляются через нижнюю секцию холодильника 27 в фонарь 26. Греющий пар подается в нижнюю часть ректификационной колонны. Подача его контролируется паровым манометрическим регулятором 19.

Этионационная колонна обогревается паром, поступающим из кубовой части ректификационной колонны. Неконденсирующиеся газы из конденсаторов через сепаратор 10 направляются в конденсатор 13, установленный в баке с холодной водой. В конденсаторе собирается спиртовой пар, унесённый газами, а газы удаляются в атмосферу. Для предохранения аппаратуры от сжатия установлены вакуум-прерыватели 1, 15, 20. Количество воды и спирта-сырца контролируется ротаметрами 2. Потери спирта с лютерной водой контролируются при помощи пробного холо-

дильника 23, в котором водно-спиртовые пары конденсируются и собираются в сборнике 29.

Охлаждающая вода поступает из бака 13 и распределяется по холодильникам, конденсаторам и дефлегматорам.

Кроме двухколонных ректификационных установок существуют также установки с большим числом колонн. В них устанавливают дополнительные колонны для очистки спирта-ректификата от головной и хвостовой фракций.

В трёхколонной ректификационной установке (рис. 2.5) наряду с эпорационной и ректификационной колоннами имеется также сивушная колонна. Спирт-сырец насосом 26 подаётся в напорный резервуар 7; отсюда через регулятор напора 2 он поступает в теплообменник 25, где нагревается теплом лютерной воды, отходящей из ректификационной колонны 21. Нагретый спирт-сырец поступает в эпорационную колонну 24, обогреваемую паром. В верхнюю часть эпорационной колонны предусмотрен ввод лютерной воды, которая из сборника насосом подаётся в резервуар 3 и регулятор напора 4. Эпорационная колонна имеет дефлегматор 5 и конденсатор 6. Головная фракция отбирается в конденсаторе 6 и направляется в холодильник 22, откуда поступает в фонарь 23.

Из нижней части эпорационной колонны эпорат попадает в ректификационную колонну 21. Эта колонна снабжена двухбарабанным горизонтальным дефлегматором 7 и конденсатором 8. Спирт-ректификат отбирается с нескольких верхних тарелок этой колонны в жидком виде, охлаждается в холодильнике 20 и выводится через фонарь 19. Непастеризованный спирт, как и в двухколонной установке, из конденсатора ректификационной колонны поступает в эпорационную колонну. Таким образом, в этой части установка подобна двухколонной установке.

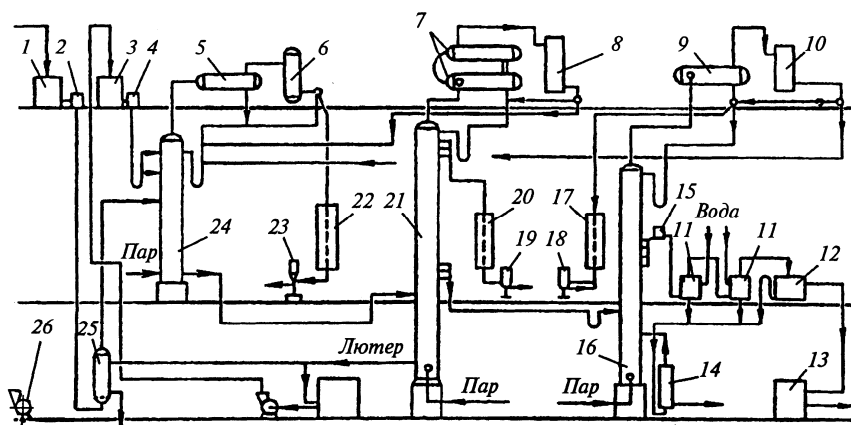


Рис. 2.5. Принципиальная схема трёхколонной ректификационной установки

Сивушная жидкость, отбираемая в ректификационной колонне, направляется в сивушную колонну 16, которая имеет дефлегматор 9 и конденсатор 10. Колонна 16 предназначена для удаления из ректификационной колонны сивушного масла, что создаёт благоприятные условия для ректификации этилового спирта, а также для выделения сивушного масла и промежуточных продуктов в более концентрированном виде.

Сивушная жидкость, отбираемая в колонне 16, поступает через смотровой фонарь 15 в сивухоотделители 11 и в декантатор сивушного масла 12. Отсюда сивушное масло поступает в сборник 13. Подсивушная жидкость (промывная вода) подогревается в теплообменнике 14 теплом лютерной воды сивушной колонны. Холодильник 17 и фонарь 18 предназначены для отбора концевой фракции (сивушного спирта).

Кроме трёхколонных ректификационных установок непрерывного действия применяются также установки, в которых имеется четвёртая колонна – колонна окончательной очистки. В эту колонну направляется спирт-ректификат из ректификационной колонны. В колонне окончательной очистки выделяются остатки примесей спирта, что обеспечивает повышение его качества. Окончательная колонна всегда обогревается паром, пропущенным через змеевики.

Кубовые ректификационные установки периодического действия в настоящее время встречаются только на заводах малой производительности ликёроводочной и спиртовой промышленности. Кубовая ректификационная установка (рис. 2.6) работает по методу непрерывных наполнений, который является наиболее прогрессивным для такого оборудования. Применение этого метода приближает кубовую установку по способу эксплуатации к непрерывно действующим установкам.

Основными элементами кубовой установки являются куб 12, ректификационная колонна 10, дефлегматор 3 и холодильник 4. При работе установки периодического действия спирт-сырец из напорного бака 15 поступает в куб 12. Для лучшего выделения головных продуктов в верхней части куба устанавливают распределительную тарелку с зубцами или конический распылитель. В начале загрузки спирта-сырца в куб он обогревается паром, поступающим через барботер. По мере наполнения куба включают подогревательные элементы-кипяильники, конденсат из которых отводят конденсационным горшком 11, а затем отбирают альдегиды и эфиры. После этого приступают к отбору I сорта спирта, который пропускают через смотровой фонарь 5. В процессе перегонки спирт химически очищают, для чего на верхнюю тарелку колонны из бачка 1 подают водно-спиртовой раствор каустической соды. Сивушные масла скапливаются в определённой зоне колонны. Их выводят во время отбора последней трети спирта I сорта в виде паров сивушного спирта. Эти пары через сепаратор 9 поступают в холодильник 6; затем после смешивания конденсата с водой в смесителе 7 сивушная жидкость поступает в маслоотделитель 8.

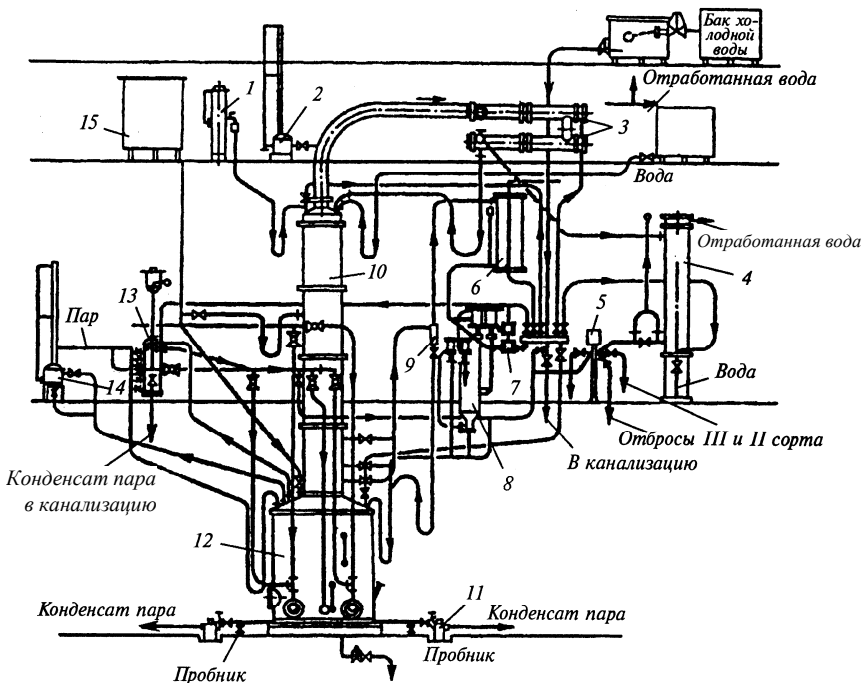


Рис. 2.6. Принципиальная схема кубовой ректификационной установки

Водно-спиртовой раствор из маслоотделителя возвращается в куб. После отбора I сорта отбирают концевые сорта, содержащие промежуточные и хвостовые продукты. Когда жидкость в кубе не будет содержать спирта, воду спускают и приступают к новому циклу работы.

В дальнейшем все операции повторяют в том же порядке. Подача пара в куб регулируется регулятором 13. Аппарат предохраняется от смятия вакуум-прерывателями 2 и 14.

Методику технологического расчёта ректификационных установок можно найти в специальной литературе [1, 11].

2.2. ЭКСТРАКТОРЫ

2.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К конструкции аппаратов, в которых проводятся процессы экстракции и растворения, предъявляются следующие основные требования:

- высокая удельная производительность, характеризуемая выходом раствора с единицы рабочего объёма аппарата;

- возможно более высокая концентрация получаемого раствора;
- низкий расход энергии на единицу объёма конечного раствора.

Аппараты для экстракции и растворения делятся на периодические и непрерывно действующие. В зависимости от взаимного направления движения фаз различают аппараты прямоточные и противоточные, а также аппараты, работающие по принципу смешанного тока.

По способу создания скорости обтекания твёрдых частиц жидкостью различают аппараты: с неподвижным слоем твёрдого материала, с механическим перемешиванием и со взвешенным или кипящим слоем.

Аппараты периодического действия вследствие низкой производительности применяются лишь в малотоннажных производствах и представляют собой обычно аппараты (реакторы) без перемешивающих устройств, снабжённые обогревом, и аппараты с мешалками. В промышленной практике всё большее распространение получают непрерывно действующие аппараты.

В этих аппаратах скорость движения жидкости при её фильтровании сквозь слой практически совпадает по величине и направлению со скоростью обтекания.

2.2.2. ЭКСТРАКТОР ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ШНЕКОВЫЙ НД-1250

Экстрактор вертикальный шнековый НД-1250 (рис. 2.7) состоит из трёх колонн: двух вертикальных (загрузочной 3 и экстракционной 12) и горизонтальной, представляющей собой передаточный шнек 2. В обеих вертикальных колоннах также размещены шнеки 4. На загрузочной колонне расположен декантатор 6 – устройство, в котором отходящая из экстрактора мисцелла очищается путём отстаивания от основного количества крупных взвешенных в ней частиц. В верхней части экстракционной колонны расположен механизм сбрасывателя 9, отходящего из экстрактора шрота. Шнеки всех трёх колонн имеют индивидуальные приводы 1, 7, 8.

Колонны экстрактора состоят из цаг с внутренним диаметром 1250 мм, которые собираются на фланцах. Наружный диаметр шнеков в загрузочной колонне составляет 1242 мм, а в экстракционной колонне и передаточном горизонтальном шнеке – 1220 мм, так как в них для предотвращения проворачивания материала вместе со шнеками на внутренней поверхности цаг имеются направляющие планки 14, 15.

На верхней цаге экстракционной колонны расположены патрубок 10 для выхода шрота, смотровые окна 11, люк-лаз 13.

Торцы всех трёх колонн экстрактора закрыты крышками, через центр которых проходят валы диаметром 120 мм (места прохода валов уплотнены). К валам приварены витки шнеков. Толщина перьев шнеков 10 мм. В загрузочной колонне число витков шнека, находящихся в зоне растворителя, составляет 9,5 шт. При этом шаг верхнего шнека 460 мм, а шаг

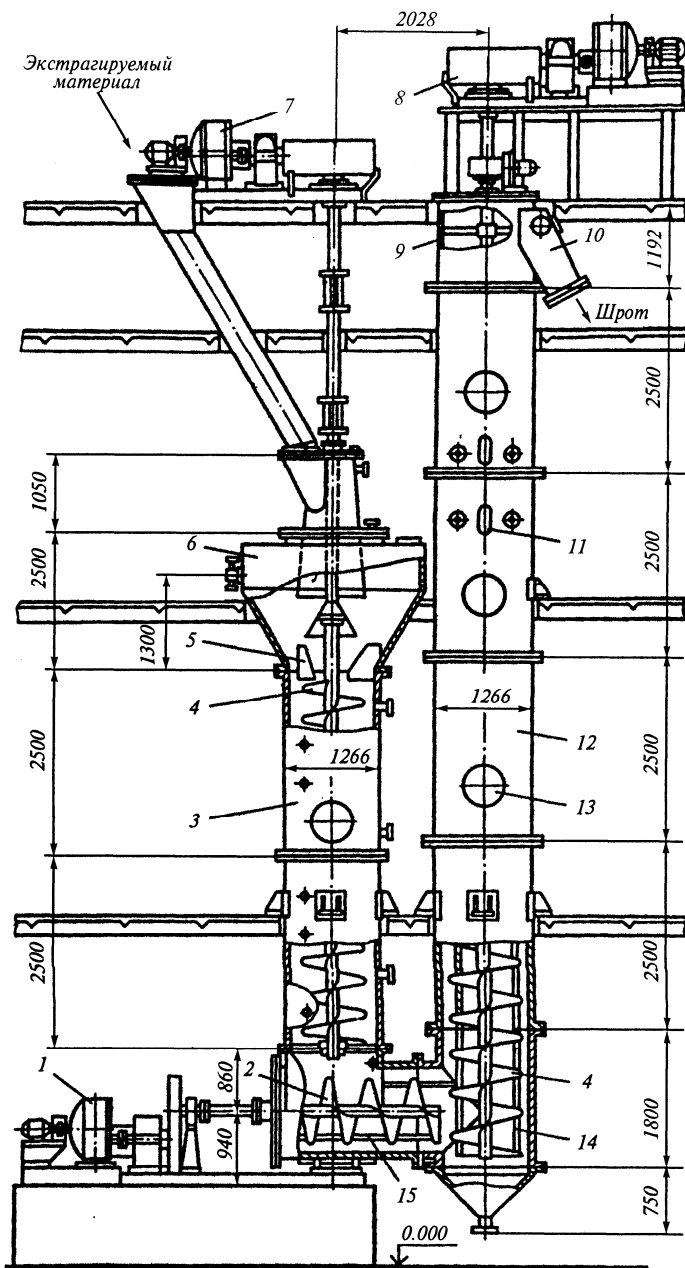


Рис. 2.7. Экстрактор вертикальный шнековый

остальных витков 560 мм. В передаточном горизонтальном шнеке – 3,5 витка, а в экстракционной колонне – 27,5 витка. В этих колоннах шаг шнековых витков постоянный и одинаковый – 450 мм. Поверхность перьев шнеков перфорирована круглыми отверстиями с раззенковкой, расположенной на той стороне пера шнека, которая не соприкасается с экстрагируемым материалом. Диаметр отверстий на перьях шнека загрузочной колонны 8 мм, а на перьях передаточного горизонтального шнека и экстракционной колонны – 10 мм.

Декантатор представляет собой цилиндр диаметром 2,2 м с конусообразным основанием, нижний диаметр которого имеет фланец для соединения с верхней царгой загрузочной колонны. Верхняя крышка декантатора имеет горловину со съёмной крышкой, по центру которой приварена центральная течка с наклонной питающей течкой, имеющей отверстие для входа экстрагируемого материала. На крышке декантатора также расположено смотровое окно, патрубки для выхода паровоздушной смеси.

Экстрагируемый материал в виде лепестка (возможна подготовка материала в виде крупки или гранул) поступает в загрузочную колонну экстрактора по наклонной и центральной питающим течкам через горловину. Материал движется по течкам и в горловине, образовав опускающийся слой, соприкасается с поверхностью мисцеллы в декантаторе. При этом частицы материала смачиваются и осаждаются, образуя фильтрующий слой в конической части декантатора. Направляющие пластины в конической части декантатора препятствуют проворачиванию слоя материала и тем самым способствуют захвату его шнеком. Шнековый вал загрузочной колонны, как и другие шнеки экстрактора, вращается по часовой стрелке и может совершать один оборот за 42...240 с (привод загрузочной колонны снабжён вариатором). Продолжительность одного оборота передаточного горизонтального шнека 61 с, а шнекового вала экстракционной колонны – 72 с. Материал, транспортируемый шнеками, вначале опускается вниз в загрузочной колонне, затем движется горизонтально в передаточном шнеке и поднимается вверх в экстракционной колонне. В верхней части экстракционной колонны проэкстрагированный материал поднимается выше уровня бензина. При этом из насыщенной массы происходит сток жидкой фазы и шрот выходит из экстрактора с содержанием бензина 20...40%.

Экстрагирование маслянистого материала в шнековом экстракторе происходит в противотоке. Растворитель (бензин) насосом подаётся в верхнюю часть экстракционной колонны через форсунки и опускается вниз сплошным потоком, заполняя весь свободный объём колонны, включая пространство между частицами экстрагируемого материала. Поток текущей жидкой фазы навстречу транспортируемому материалу заполняется свободный объём передаточного горизонтального шнека и загрузочной колонны. На всём пути по трём колоннам экстрактора жидкая фаза

последовательно насыщается извлекаемым маслом и получаемая при этом мисцелла имеет наибольшую концентрацию на выходе из экстрактора. Патрубки в декантаторе для отвода мисцеллы из экстрактора расположены ниже форсунок в экстракционной колонне, по которым подается растворитель в экстрактор. Это позволяет иметь избыточный гидростатический напор для обеспечения течения жидкой фазы по трём колоннам экстрактора от входа к выходу (реализуется принцип сообщающихся сосудов). Мисцелла, поступающая снизу в декантатор, вначале фильтруется через опускающийся слой жмыха, а затем отстаивается в расширенной части декантатора. В результате этого мисцелла, выходящая из экстрактора, имеет содержание частиц экстрагируемого материала 0,4...1,0%.

2.2.3. КОЛОННЫЙ ЭКСТРАКТОР

Аппарат предназначен для экстрагирования компонентов из продуктов с большим внутридиффузионным сопротивлением, например ферментов из солодковых ростков, сахаросодержащих веществ из свекловичной стружки и т.д.

Колонный экстрактор (рис. 2.8) представляет собой вертикальную цилиндрическую колонну, диаметр и высота которой зависит от произво-

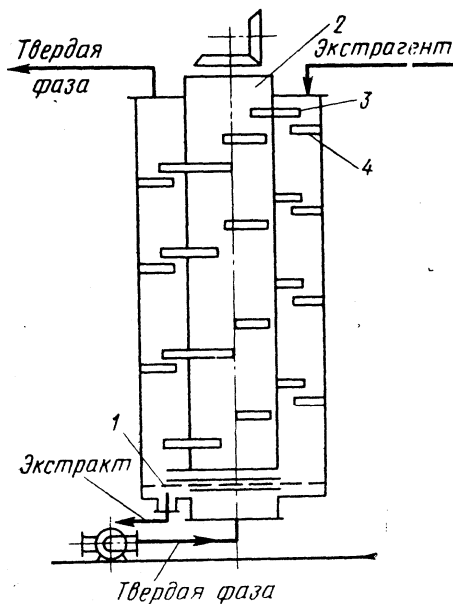


Рис. 2.8. Колонный экстрактор:

1 – разделительное сито; 2 – вал; 3 – лопасти; 4 – контролопасты

дительности и вида обрабатываемого продукта. На верхнем торце колонны смонтирована разгрузочная камера, а на нижем – загрузочная. Камеры снабжены штуцерами для ввода и вывода твёрдой фазы растворителя и экстракта. Внутри колонны установлен ротор, вращающийся со скоростью 0,5...1 об/мин. Ротор снабжён транспортирующими лопастями, которые устанавливаются с наклоном к образующей цилиндрической поверхности. Для предотвращения проскальзывания твёрдой фазы относительно поверхности колонны закреплены контроласты. Движение растворителя в колонне самотёчное. Вывод экстракта из колонны осуществляется через сетчатое днище, установленное на нижнем торце колонны. Твёрдая фаза загружается с помощью шнекового устройства в нижнюю часть колонны, и с помощью лопастей ротора и контроластей перемещается в разрыхлённом состоянии к верхнему торцу колонны. Растворитель перемещается на встречу потоку твёрдой фазы за счёт гидростатического давления. Такое перемещение обеспечивает разрыхление потока и уменьшает риск его комкования. Такие аппараты характеризуются высокой производительностью и возможностью её регулирования в широком диапазоне.

Достоинством аппарата данного типа является режим движения твёрдой фазы, который обеспечивает возможность интенсификации массопередачи за счёт разрыхления потока. Кроме того, разрыхление препятствует комкованию твёрдой фазы.

К недостаткам можно отнести высокие энергозатраты на транспортирование и перемешивание твёрдой фазы и истирание частей твёрдой фазы и транспортирующих лопастей.

2.2.4. ЭКСТРАКТОР КОНСТРУКЦИИ ВНИЭКИПРОДМАШ

Это колонный экстрактор (рис. 2.9), состоящий из ряда вертикальных колонн прямоугольного сечения 0,25×0,35 м, которые последовательно соединены между собой горизонтальными перегородками такого же сечения. Внутри колонн проходит цепной втулочно-роликовый транспортёр. Первая и последняя колонна связаны между собой вспомогательным каналом, который обеспечивает возможность использования бесконечного (замкнутого) цепного транспортёра. На горизонтальном участке дополнительного вспомогательного канала размещены узлы для загрузки исходного твёрдого вещества, выгрузки проэкстагированного материала и участок регенерации транспортирующих элементов экстрактора.

На роликово-втулочных элементах транспортёра закреплены ролики с капроновой сеткой. Транспортёр перемещается со скоростью 1,5...3 м/с, что обеспечивает производительность по твёрдой фазе до 3,5 т/сут. Кроме того, на колонах имеются штуцера для ввода-вывода экстрагента, экстракта и твёрдой фазы. Имеются ёмкости для сбора экстракта вытяжки и отжимной воды. Твёрдая фаза и экстрагент перемещаются в противоточ-

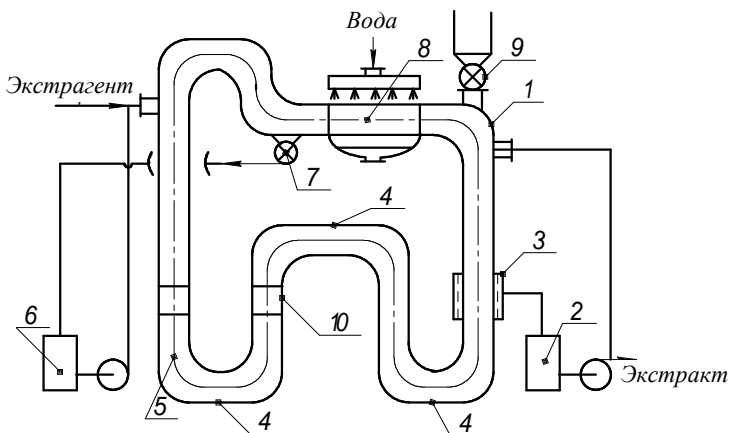


Рис. 2.9. Экстрактор ВНИКИПродмаш:

1, 5 – загрузочная (опускная) и разгрузочная (подъёмная) колонны; 2 – сборник экстракта (вытяжка); 3 – сетка фильтрующая; 4 – горизонтальные перегородки; 6 – сборник низкоконцентрированного экстракта; 7 – устройство разгрузочное с отжимным прессом твёрдой фазы; 8 – устройство регенерирующее для регенерирования транспортирующих элементов; 9 – устройство загрузочное с секторным питателем; 10 – колонны промежуточные

ном режиме. Твёрдая фаза загружается в верхнюю часть опускной колонны с помощью секторного питателя и перемещается транспортёром в пространстве между сетками. На встречу твёрдой фазе самотёком движется экстрагент (растворитель). Самотёчное перемещение достигается за счёт разности высот ввода и вывода экстрагента. Экстракт выводится из опускной колонны через сетчатую обойму, установленную на колонне. Часть экстракта из сборника направляется на предварительное смачивание подаваемого твёрдого вещества, что интенсифицирует процесс и позволяет получить более концентрированный экстракт. Твёрдая фаза поднимается вверх разгрузочной колонны, отжимается на шнековом прессе и выгружается из аппарата. Жидкая фаза после отжима смешивается с растворителем и подаётся на экстагирование. Далее сетки транспортирующего устройства регенерируются в промывном устройстве и далее следуют в зону загрузки. Колонна работает полностью в автоматическом режиме.

Достоинство – мягкий режим обработки твёрдой фазы, исключаящий её истирание.

Недостатки – ограниченные возможности для интенсификации процесса, так как отсутствует возможность активизировать гидравлический режим взаимодействия твёрдой и жидкой фазы для снятия внешнего диффузионного сопротивления, в связи с этим аппарат целесообразно использовать для зернистой твёрдой фазы, не склонной к комкованию.

2.2.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЭКСТРАКТОРОВ

Исходными данными для расчёта являются: производительность, начальная и конечная концентрации экстрагируемого вещества, вид растворителя, специальные технологические требования, нагрузки по концентрации экстракта или вытяжки.

Основной целью технологического расчёта является определение рабочего объёма аппарата

$$Va = \frac{G\tau}{\Phi_{\text{зап}}\beta_{\text{наб}}(1 - \gamma_{\text{констр}}) \rho_{\text{насып}}},$$

где $\beta_{\text{наб}}$ – коэффициент набухания; G – производительность; $\Phi_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения; $\gamma_{\text{констр}}$ – доля рабочего объёма, занятая транспортирующими элементами; τ – время экстрагирования.

С другой стороны, производительность должна обеспечиваться транспортирующей способностью соответствующих транспортирующих устройств. Например, шнековый экстрактор должен быть оборудован колоннами и шнековым транспортёром соответствующей производительности.

$$G = k \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} 60n\tau\phi,$$

где k – коэффициент проскальзывания.

Точность технологического расчёта определяется в основном точностью определения времени экстрагирования τ . Эта величина в большинстве случаев определяется на основе опытных данных, например по технологическому регламенту производства аналога. Для частиц правильной формы (пластина, сфера, цилиндр) или частиц, форма которых является некоторой совокупностью классических форм с известными массопродными свойствами, время экстрагирования может быть вычислено аналитически по критерию Фурье. Безразмерная относительная концентрация определяется как функция критериев Фурье массообменный Fo_m и Био массообменный Bi_m

$$E = \frac{C - C_p}{C_n - C_p} = f(Fo_m; Bi_m),$$

где E – безразмерная концентрация изменяется от 1 до 0; C – текущая концентрация экстрагируемого вещества; C_p – равновесное значение концентрации, зависящее от температуры и концентрации экстрагируемого

вещества в растворителе; C_n – начальная концентрация; Fo_m – критерий Фурье массообменный (безразмерное время).

$$Fo_m = \frac{k\tau}{l^2},$$

где l – характерный размер частиц твёрдой фазы, м; τ – время, с; k – коэффициент массопроводности (определяется экспериментально или как справочная величина), $m^2 \cdot c^{-1}$;

$$Bi_m = \frac{\beta l}{k},$$

β – коэффициент массоотдачи, характеризующий интенсивность конвективной массоотдачи, $m \cdot c^{-1}$.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Тепломассообменные процессы – совмещённые процессы переноса теплоты и массы в коллоидных капиллярно-пористых телах. Они протекают с изменением физического состояния распределяемого компонента и сопровождаются затратой и высвобождением значительного количества теплоты фазового перехода. К ним относятся сушка, варка, обжарка, выпечка и т.д.

3.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

3.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сушка – процесс удаления влаги из продукта, связанный с затратами теплоты на фазовое превращение воды в пар. Процесс удаления влаги сопровождается удалением её связи со «скелетом» продукта, на что затрачивается энергия. По величине энергии таких связей различают: химически связанную влагу (не удаляется из влажных тел при нагревании до 100...120 °С); физико-химически связанную влагу (удерживается на внутренней поверхности пор материала адсорбционными силами) и физико-механически связанную влагу (находится в крупных капиллярах, на наружной поверхности продукта и удерживается капиллярным давлением и силами смачивания).

Характер и энергия связи влаги с продуктом определяют общее её количество, которое способно удерживать то или иное вещество при равновесии его с окружающей средой. Величина равновесного влагосодержания тем выше, чем больше влаги содержится в окружающем воздухе и чем ниже его температура.

Существующие принципы обезвоживания обеспечивают удаление влаги без изменения агрегатного состояния (прессование, центрифугирование, сепарирование, фильтрация и др.), с изменением агрегатного состояния (выпаривание, конденсация, сублимация, тепловая сушка и др.), а также комбинированным способом (вакуум-сублимационная сушка, с использованием перегретого пара, со сбросом давления, ИК- и ВЧ-нагрев и др.), которые могут рассматриваться как системы со сложными внутренними физико-химическими связями.

По способу подвода теплоты к продукту различают: конвективную сушку (непосредственное соприкосновение продукта с сушильным агентом), кондуктивную сушку (передача теплоты от теплоносителя к продукту через разделяющую перегородку), вакуум-сублимационную сушку (испарение замороженного продукта при глубоком вакууме), диэлектрическую сушку (нагревание сырья в электромагнитном поле) и др.

Классификация оборудования. Сушильные установки, применяемые в пищевой промышленности, отличаются разнообразием конструкций и подразделяются:

- по способу организации процесса (периодические или непрерывного действия);
- по состоянию слоя (плотный, неподвижный, пересыщающийся, кипящий и др.);
- по виду используемого теплоносителя (воздух, газ, пар, топочные газы и др.);
- по способу передачи теплоты (конвективные, кондуктивные, радиационные, диэлектрические и др.);
- по давлению воздуха в сушильной камере (атмосферные, вакуумные, сублимационные и др.).

В конвективных сушильных установках (сушильный агент выполняет функции теплоносителя и влагопоглотителя) градиент температуры направлен в сторону, противоположную градиенту влагосодержания, что замедляет удаление влаги из продукта.

Кондуктивный способ обезвоживания основан на передаче теплоты продукту при соприкосновении с горячей поверхностью, при этом воздух служит только для удаления водяного пара из сушилки, являясь влагопоглотителем.

Сушка токами сверхвысокой частоты основана на том, что диэлектрические свойства воды и сухих веществ пищевых продуктов различаются, при этом влажный материал нагревается значительно быстрее, чем сухой. Возникающие здесь градиенты влагосодержания и температуры совпадают, что интенсифицирует процесс сушки.

При сублимационной сушке отсутствует контакт продукта с кислородом воздуха, основное количество влаги удаляется при сублимации льда ниже 0 °С, и только удаление остаточной влаги происходит при нагреве продукта до 40...50 °С.

Конструкция сушилки должна, прежде всего, обеспечить равномерный нагрев и сушку продукта при надёжном контроле его температуры и влажности. Сушилки должны иметь достаточно высокую производительность, но при этом должны быть экономичными по удельным расходам теплоты и электроэнергии, иметь возможно меньшую металлоёмкость.

3.1.2. БАРАБАННАЯ СУШИЛКА

Барабанная сушилка (рис. 3.1) представляет собой цилиндрический наклонный барабан 4 с двумя бандажами 3, которые при вращении барабана катятся по опорным роликам 6. Материал поступает с приподнятого конца барабана через питатель 2, захватывается винтовыми лопастями, на которых он подсушивается, после чего перемещается вдоль барабана,

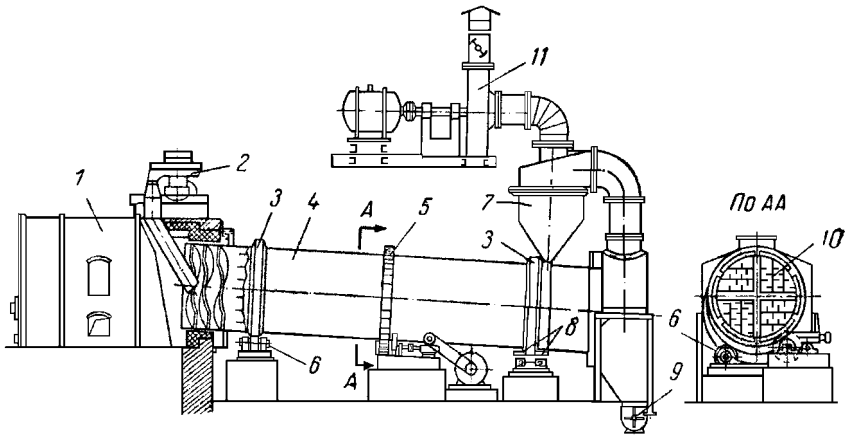


Рис. 3.1. Барабанная сушилка:

- 1 – топка; 2 – питатель; 3 – бандаж; 4 – барабан; 5 – зубчатый венец;
 6 – опорные ролики; 7 – циклон; 8 – упорные ролики; 9 – шлюзовый затвор;
 10 – внутренняя насадка барабана; 11 – дымосос

имеющего угол наклона к горизонту до 6° . Осевое смещение барабана предотвращается упорными роликами 8.

Материал перемещается в сушилке при помощи внутренней насадки 10, равномерно распределяющей его по сечению барабана. Конструкция насадки зависит от размера кусков и свойств высушиваемого материала.

Обычно в барабанных сушилках материал и сушильный агент движутся прямококом, благодаря этому предотвращается пересушивание и унос материала топочными газами в сторону, противоположную его движению. Для уменьшения уноса при прямококе скорость газов в барабане поддерживают не более 2...3 м/с. Газы поступают из топки 1, примыкающей к барабану со стороны входа материала и снабжённой смесительной камерой для охлаждения газов до нужной температуры наружным воздухом.

Высушенный материал проходит через подпорное устройство в виде сменного кольца или поворотных лопаток, посредством которого регулируется степень заполнения барабана, обычно не превышающая 20...25% его объёма. Готовый продукт приходит через шлюзовой затвор 9, препятствующий подосу наружного воздуха в барабан, и удаляется транспортером (на рисунке не показан).

Газы просасываются через барабан при помощи дымососа 11, установленного за сушилкой. Для улавливания из газов пыли между барабаном и дымососом включён циклон 7. При такой схеме установки барабан работает при разрежении (газы не проникают в помещение через неплот-

ности сушилки), при этом значительно уменьшается износ вентилятора частями пыли.

Барабан приводится во вращение посредством зубчатого венца 5, который находится в зацеплении с ведущей шестернёй, соединённой через редуктор с электродвигателем. Скорость вращения барабана зависит от угла наклона и продолжительности сушки; обычно барабан делает 1...8 об/мин.

Барабанные сушилки широко применяются для сушки сыпучих и мелкокусковых материалов (колчедан, уголь, фосфориты, минеральные соли и т.д.).

Достоинства барабанных сушилок: 1) интенсивная и равномерная сушка вследствие тесного контакта материала и сушильного агента; 2) большое напряжение материала по влаге, достигающее $100 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$ и более; 3) компактность установки.

Помимо барабанных конвективных сушилок (прямого действия) с непосредственным соприкосновением материала и сушильного агента, применяются контактные барабанные сушилки с передачей тепла от газов через стенку.

3.1.3. ВАЛЬЦОВЫЕ СУШИЛКИ

Одновальцовая атмосферная сушилка (рис. 3.2) представляет собой вращающийся барабан 1, обогреваемый внутри паром и частично погружённый в высушиваемый раствор, который заполняет корыто 2, снабжённое снизу паровой рубашкой. В корыте раствор перемешивается мешалкой 3 и наносится на барабан слоем толщиной до 2 мм. Тонкий слой материала успевает высохнуть в течение одного оборота барабана и снимается с его поверхности ножом 6. Высушенный материал падает в шнек 5 и удаляется из сушилки. Пар поступает через полу цапфу барабана, паровой конденсат отводится изнутри барабана через ту же цапфу по сифонной трубке 4.

В одновальцовых сушилках некоторых конструкций материал наносится на барабан при помощи валика, распыливающего жидкость, или нескольких валиков, намазывающих слой пасты на барабан.

Для сушки пастообразных материалов используются одновальцовые формирующие сушилки, в которых материал подсушивается в отформованном виде.

Достоинства вальцовых сушилок: 1) непрерывная сушка при довольно высоком напряжении поверхности нагрева (до $70 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$); 2) возможность сушки материалов, чувствительных к действию высоких температур, в том числе пастообразных материалов; 3) экономичность сушки, обусловленная малыми потерями тепла с отработанным воздухом.

Недостатки: 1) сравнительно высокая влажность высушенного продукта; 2) возможность перегрева материала.

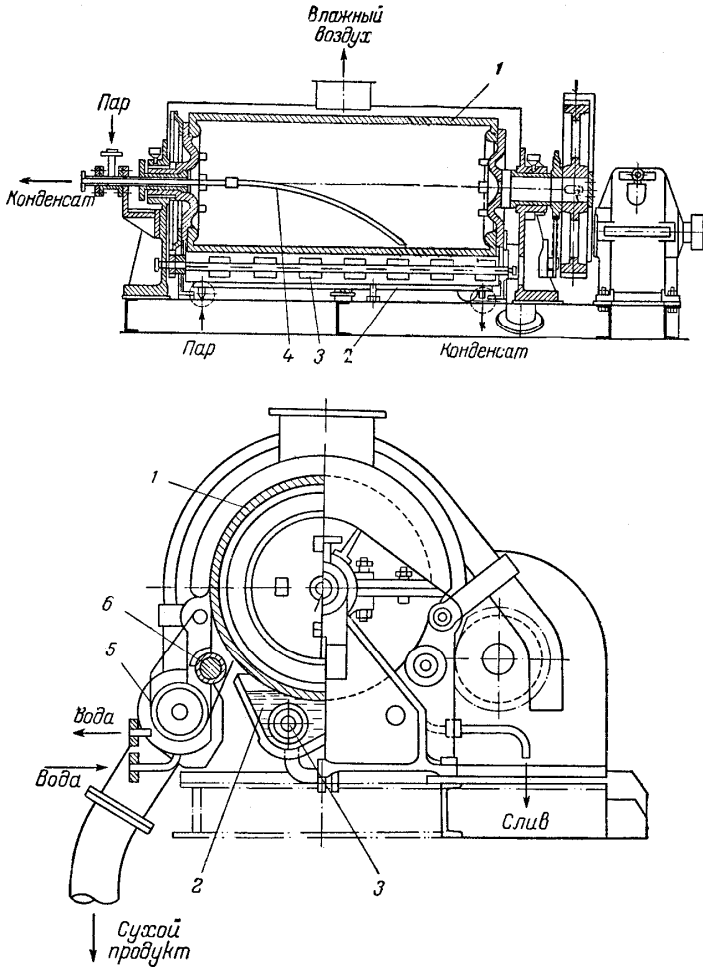


Рис. 3.2. Вальцовая сушилка:

1 – барабан; 2 – корыто; 3 – мешалка; 4 – сифонная трубка; 5 – шнек; 6 – нож

3.1.4. ЛЕНТОЧНАЯ СУШИЛКА

Основной частью ленточной сушилки (рис. 3.3) является горизонтальная бесконечная лента 1, которая движется в камере 2. Материал поступает с одного конца ленты и сбрасывается в высушенном виде с другого её конца. Лента натянута между ведущей звёздочкой 4 и ведомой звёздочкой 5, служащей для натяжения ленты.

Ленты изготавливают сплошными (из ткани) или сетчатыми (из металлической сетки).

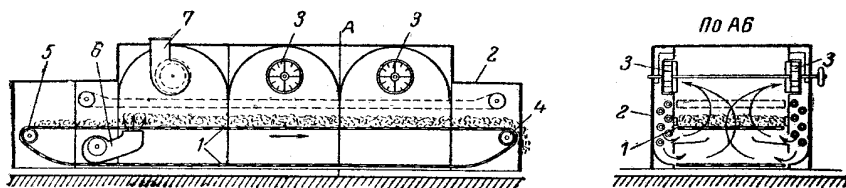


Рис. 3.3. Ленточная сушилка:

1 – лента; 2 – камера; 3 – циркуляционный вентилятор;
4 – ведущая звёздочка; 5 – ведомая звёздочка; 6, 7 – вентиляторы

Сушилка обычно разделяется на несколько зон (в данной сушилке их три), в каждой из которых установлен вентилятор для создания циркуляции воздуха. В сушилках со сплошной лентой нагретый воздух движется над слоем материала, противотоком его движению. В сушилках с сетчатой лентой воздух проходит перпендикулярно плоскости ленты – вверх или вниз. При такой поперечной продувке слой материала лучше разрыхляется, что ускоряет его сушку.

В одноленточных сушилках слой материала на ленте высыхает неравномерно: часть материала, обращённая к ленте (при движении сушильного агента вдоль слоя материала), остаётся более влажной. Поэтому часто применяют многоленточные сушилки, в которых материал пересыпается с одной ленты на другую. Благодаря многократному пересыпанию материала он лучше омывается воздухом, при этом ускоряется процесс сушки и уменьшается расход тепла по сравнению с его расходом в одноленточных сушилках.

3.1.5. ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ СУШИЛКА

В пневматических сушилках (рис. 3.4) материал сушится во взвешенном состоянии. Зернистый или кристаллический материал подаётся через питатель 1 в вертикальную трубу 6 длиной 10...20 м, в которую вентилятором 3 снизу нагнетается воздух, нагретый в подогревателе 2. Материал увлекается потоком воздуха, движущимся со скоростью 40 м/с, и выбрасывается уже высушенным в сборник-амортизатор 8. В циклоне 5 высушенный материал отделяется от воздуха и удаляется через разгрузочное устройство 4. Воздух проходит фильтр 7 и выводится в атмосферу. Продолжительность пребывания материала в сушилке составляет всего несколько секунд; процесс протекает непрерывно.

Достоинства пневматических сушилок: 1) весьма развитая поверхность соприкосновения материала и сушильного агента и, следовательно, быстрая интенсивная сушка; 2) возможность сушки материала при высоких температурах вследствие кратковременности пребывания его в сушилке; 3) простота и компактность установки.

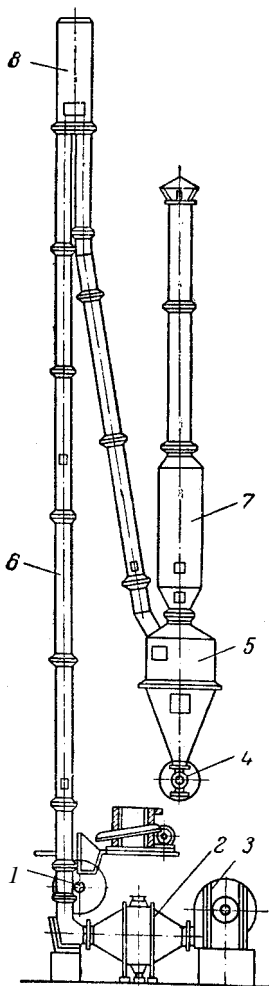


Рис. 3.4. Пневматическая сушилка:
 1 – питатель; 2 – подогреватель воздуха;
 3 – вентилятор; 4 – разгрузочное устройство;
 5 – циклон; 6 – вертикальная труба;
 7 – воздушный фильтр;
 8 – сборник-амортизатор

Недостатки: 1) трудность регулирования процесса; 2) опасность взрыва при сушке горючих пылящих материалов; 3) большой расход энергии.

3.1.6. РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШИЛКА

Весьма значительное ускорение процесса сушки достигается при увеличении поверхности испарения влаги в сушилках, работающих по принципу распыливания жидких растворов (рис. 3.5).

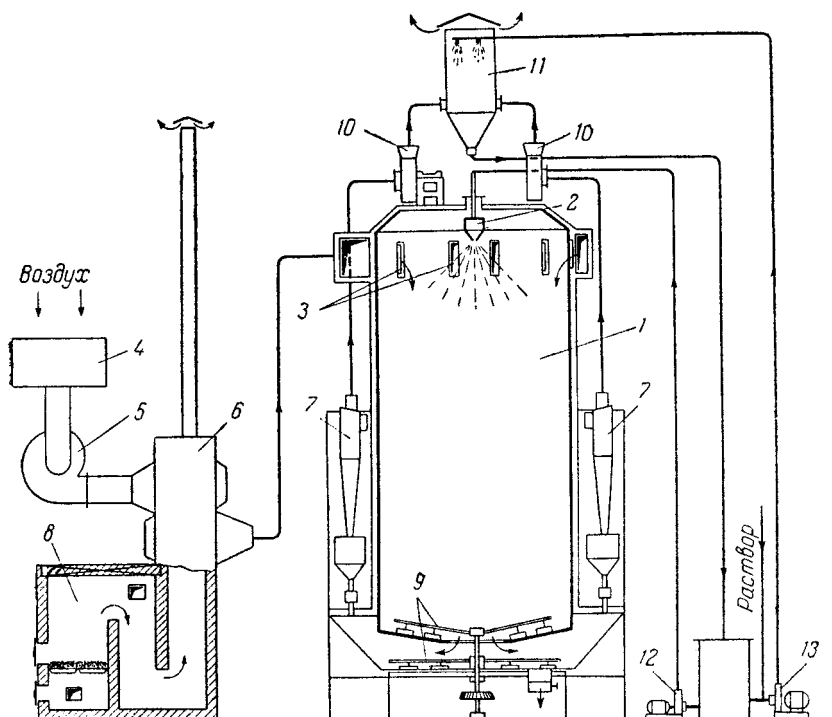


Рис. 3.5. Распылительная сушилка:

- 1 – сушильная камера; 2 – механическая форсунка; 3 – щели;
 4 – воздушный фильтр; 5, 10 – вентиляторы; 6 – газовый подогреватель;
 7 – циклон; 8 – топка; 9 – скребки; 11 – скруббер; 12 – насос для подачи раствора
 на распыление; 13 – насос для подачи раствора на орошение скруббера

Исходный раствор (высушиваемый материал) распыляется в сушильной камере 1 посредством механической форсунки 2. Сушильный агент – воздух засасывается через фильтр 4 вентилятором 5 в газовый подогреватель 6, где нагревается топочными газами, поступающими из топки 8. Через регулируемые щели 3 нагретый воздух входит в сушильную камеру и движется в ней параллельным током с распыляемым материалом.

Капли жидкости, омываемые со всех сторон воздухом, в течение одной или нескольких секунд теряют влагу и осаждаются в виде порошкообразных частиц на дне камеры. Сухой порошок удаляется из сушилки при помощи скребков 9. Отработанный воздух, проходя через циклоны 7, очищается от пыли и затем подаётся вентилятором 10 в скруббер 11, орошаемый исходным раствором. В скруббере воздух окончательно очищается от остатков пыли и удаляется в атмосферу.

Жидкость в распылительных сушилках диспергируется механическими или пневматическими форсунками или быстровращающимися горизонтальными дисками (центробежные распылители).

Основные достоинства распылительных сушилок: 1) быстрота сушки; 2) низкая температура сушки; 3) возможность получения конечного продукта в виде тонкого порошка, не требующего дальнейшего измельчения и обладающего хорошей растворимостью.

Благодаря исключительно быстрой сушке температура высушиваемого вещества в течение всего процесса остаётся близкой к температуре испаряющейся влаги (50...70°), несмотря на значительно более высокую температуру сушильного агента. Это особенно ценно при сушке материалов, чувствительных к действию высоких температур.

Хорошая растворимость образующегося при сушке мелкодисперсного порошка в ряде случаев имеет большое значение (например, разведение водой сухого молока и некоторых других порошкообразных продуктов).

Недостатки распылительных сушилок: 1) большие размеры сушильной камеры вследствие малой скорости сушильного агента и соответственно низкого напряжения камеры по влаге (2...25 кг/м³·ч); 2) значительный расход энергии и тепла; 3) сложное оборудование сушильной установки (распыляющие и пылеулавливающиеся устройства).

3.1.7. СУБЛИМАЦИОННАЯ СУШИЛКА

Влагу можно удалять из твёрдых материалов путём возгонки (сублимации), т.е. перевести влагу непосредственно из твёрдой фазы в паровую, минуя жидкое состояние.

Для сушки материалов этим способом необходимо создать достаточно большую разность температур между высушиваемым материалом и внешним источником тепла. Такую разность температур создают, высушивая материал в замороженном состоянии при глубоком вакууме.

В таких условиях влага испаряется из материала, находящегося в замороженном состоянии. Тепло, необходимое для испарения влаги, передаётся из окружающей среды через стенки сушильной камеры или подводится от специальных подогревателей. Схема установки для сушки сублимацией аналогична схеме работы обычной вакуум-сушилки и отличается от последней лишь тем, что конденсаторы сублимационных сушилок охлаждаются не водой, а холодильным рассолом, имеющим температуру от -10 до -40 °С.

Принципиальная схема сублимационной сушилки с компрессионной холодильной установкой показана на рис. 3.6. Камера 1 сушилки сообщается с конденсатором 2, к которому присоединён вакуум-насос 3 и холодильная установка 4 с насосом 5 для циркуляции рассола. Для непрерывного удаления из конденсатора образующегося в нём льда потребова-

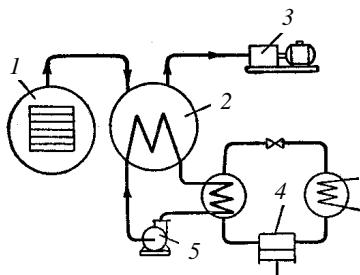


Рис. 3.6. Сублимационная сушилка:

1 – сушильная камера; 2 – конденсатор; 3 – вакуум-насос;
4 – компрессорная холодильная установка; 5 – циркуляционный насос

лось бы значительное усложнение конструкции этого аппарата, поэтому обычно устанавливают два конденсатора, которые попеременно работают и размораживаются. Компрессорную холодильную установку в некоторых схемах сушки заменяют более компактной трёхступенчатой парожеркорной холодильной установкой.

Высушенные продукты, получаемые при сушке возгонкой, полностью сохраняют свои качества (цвет, запах, растворимость, питательные свойства и др.) и могут храниться длительное время.

В настоящее время этим сравнительно дорогим и сложным способом высушиваются медицинские препараты, чувствительные к нагреванию и резко ухудшающие свои качества при тепловой сушке (пеницилин, плазма крови и др.), а также некоторые высококачественные пищевые продукты.

3.1.8. КАМЕРНЫЕ И ТУННЕЛЬНЫЕ СУШИЛКИ

Камерные сушилки являются простейшими сушилками периодического действия с газовым теплоносителем. Высушиваемый материал располагается в камерной сушилке (рис. 3.7) на полках 2, смонтированных

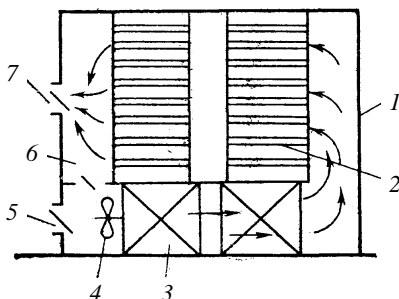


Рис. 3.7. Камерная сушилка:

1 – камера; 2 – полки;
3 – калориферы; 4 – вентилятор;
5 – окно для забора свежего воздуха;
6 – окно для регулирования рециркуляции воздуха;
7 – окно для выброса отработанного воздуха

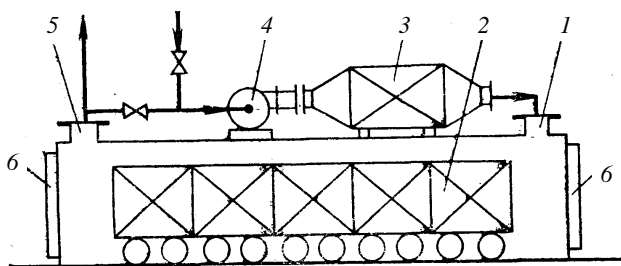


Рис. 3.8. Туннельная сушилка:

1 – камера; 2 – тележка с полками; 3 – калорифер; 4 – вентилятор;
5 – газоход отработанного воздуха; 6 – двери

внутри камеры 1. Сушильный агент (горячий воздух) перемещается между полками над слоем высушиваемого материала. Свежий воздух засасывается вентилятором 4 через окно 5 и подогревается в калориферах 3; через окно 7 отработанный воздух выбрасывается в атмосферу. В сушилке можно осуществлять рециркуляцию воздуха через окно 6. Окна 5–7 снабжены шиберами.

Камерные сушилки применяют главным образом при высушивании материалов, требующих длительной сушки или сложного индивидуального режима, а также для высушивания небольших партий материалов.

Туннельные сушилки (рис. 3.8) относятся к сушилкам непрерывного действия. Камеры 1 этих сушилок выполняются удлиненными, в форме туннеля. Высушиваемый материал размещается на полках тележек 2. Тележки с материалом периодически перемещаются вдоль рабочей зоны туннельной камеры. Высушивание достигается за один проход материала. Воздух засасывается вентилятором и направляется через калориферы 3 в сушильную камеру. Отработанный воздух выбрасывается через газоход 5. В сушилке возможна рециркуляция воздуха. Сушильный агент можно направлять как прямотоком, так и противотоком по отношению к высушиваемому материалу.

Если сушка какого-либо материала недопустима при высоких температурах, необходимо осуществлять промежуточный подогрев воздуха. При этом воздух направляется перекрестным током по отношению к направлению движения материала; калориферы и вентиляторы устанавливаются сбоку, сверху или под туннелем.

3.1.9. ШАХТНЫЕ СУШИЛКИ

Шахтные сушилки, так же как и пневматические, применяют для высушивания сыпучих материалов, обладающих небольшой начальной влажностью и большим внутридиффузионным сопротивлением (рис. 3.9).

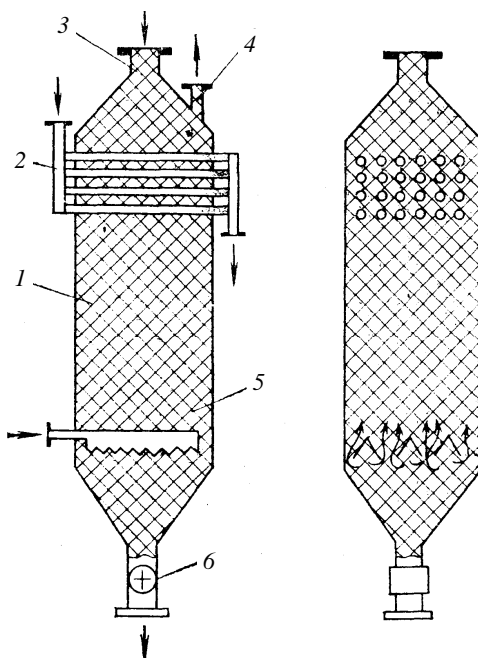


Рис. 3.9. Шахтная сушилка:

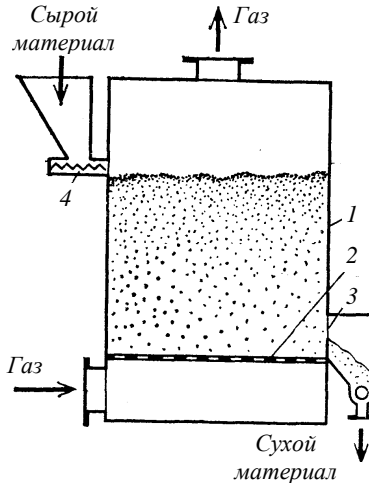
1 – сушильная камера; *2* – трубчатка; *3* – патрубок для подачи влажного материала; *4* – патрубок для отвода отработанного газа; *5* – распределяющие желоба; *6* – разгрузочный затвор

Шахтная сушилка работает следующим образом. Высушиваемый материал поступает в аппарат через патрубок *3* и «стержнеобразно» движется вниз, заполняя весь объём сушильной камеры *1*.

Вначале материал нагревается паром, проходящим в трубчатке *2*, а затем горячими газами, которые вводятся через распределяющие желоба *5*. Сухой материал удаляется через разгрузочный затвор *6*, производительность которого определяет скорость перемещения высушиваемого материала и время пребывания его в аппарате. Способ высушивания в шахтных сушилках допускает большое количество вариантов с промежуточным подогревом и рециркуляцией высушивания газов в различных зонах сушки.

3.1.10. СУШИЛКИ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

Сушилки с псевдооживленным слоем применяют для высушивания зернистых материалов. Сушилка (рис. 3.10) представляет собой цилиндрическую или прямоугольную сушильную камеру *1*, в нижней части кото-



**Рис. 3.10. Сушилка с псевдоожиженным слоем
высушиваемого зернистого материала:**

1 – сушильная камера; 2 – газораспределительная решётка;
3 – окно для вывода материала; 4 – питатель

рой размещена газораспределительная решётка 2. Заполняющий сушильную камеру высушиваемый зернистый материал подается через питатель 4, расположенный в верхней части аппарата. Сушильный агент (топочные газы или нагретый воздух) вводится под распределительную решётку. Проходя через слой зернистого материала, газы поддерживают его в псевдоожиженном состоянии. Высушенный материал выгружают через окно 3, находящееся в нижней части аппарата над распределительной решёткой в стороне, противоположной вводу сырого материала. В сушильной камере происходит интенсивное перемешивание зернистого материала, в результате чего влажность его в различных местах практически одинакова.

В сушилках с псевдоожиженным слоем осуществляется равномерное высушивание зернистых материалов при высоких значениях коэффициентов массоотдачи и поэтому целесообразно использовать для сушки материалов с малым внутримолекулярным сопротивлением.

3.1.11. МЕТОДИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЁТА КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛОК

При проектировании сушильных установок должны быть заданы:

- характеристики материала, подвергаемого сушке (вид материала, начальная и конечная влажность материала, начальная и максимально допустимая температура материала);

- производительность сушильной установки по сырью;
- характеристики сушильного агента (параметры сушильного агента на входе и на выходе из сушилки);
- максимально допустимая температура сушильного агента;
- ориентировочная продолжительность сушки.

В процессе расчёта необходимо определить:

1. Тип сушильной установки (конструкция сушильной камеры, способы подвода сушильного агента).
2. Производительность сушильной установки по испаряемому материалу, количество испаряемой влаги.
3. Основные физические параметры сушильного агента.
4. Удельный и общий расход сушильного агента, теплоты на сушку.
5. Основные размеры сушилки и её конструктивные элементы (габариты).
6. Продолжительность сушки.

Кроме этого, требуется выполнить расчёт и выбор вспомогательного оборудования (калорифера, вентилятора, пылеуловителя и др.).

Выбор типа сушильной установки сушильного аппарата определяется из следующего:

1. Масштаб производства (малотоннажное, среднетоннажное, крупнотоннажное).
2. Агрегатное состояние материала (жидкость, суспензия, пастообразное).
3. Технологические характеристики материала (допустимая температура нагрева материала, склонность к адгезии, пылению, пожаро- и взрывоопасность).
4. Требуемое время сушки.
5. Основные параметры сушильного агента.

В качестве сушильных агентов могут применяться воздух, а также топочные газы (в основном для сушки зерна). Необходимо знать физические параметры, которые оказывают влияние на интенсивность сушки:

– *воздух*: влажный воздух представляет собой смесь воздуха и водяных паров. Он характеризуется плотностью, удельным объёмом, относительной влажностью, теплосодержанием как на выходе, так и на входе. Температура и влажность обычно задаются как среднее значение различных регионов России;

– *топочные газы*: обычно образуются при сжигании твёрдого, жидкого или газообразного топлива в топках. Сушилки, работающие на топочных газах, более экономичны по расходу топлива. К недостаткам следует отнести засорение продукта золой сажи. При расчёте сушилки необходимо знать состав топлива, так как он определяет количество и качество топочных газов, а также количество воздуха, необходимое для сжигания топлива. Данные по составу топлива имеются в справочнике.

Материальный баланс сушилки:

$$G_1 = G_2 + W,$$

где G_1 – производительность по влажному материалу, кг/ч; G_2 – производительность по сухому материалу, кг/ч; W – количество испарённой воды.

Тепловой баланс сушилки:

В процессе сушки влага, поступившая в сушилку из материала, испаряется и уносится сушильным агентом воздуха, при этом влагосодержание воздуха увеличивается от x_0 ($x_0 = x_1$) до x_2 .

В соответствии с этим материальный баланс влаги можно выразить следующим равенством:

$$Lx_2 = Lx_0 + W,$$

где L – расход сушильного агента.

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}.$$

Удельный расход сушильного агента, т.е. количество воздуха, затрачиваемое на испарение 1 кг влаги,

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}.$$

Для упрощения записи теплового баланса представим высушиваемый материал на входе в сушилку, состоящий из сухой части G_2 и удалённой влаги W .

Тогда тепловой баланс конвективной сушилки без рециркуляции воздуха может быть выражен следующим образом.

Приход

- 1) приход тепла с сушильным агентом $Q_1 = LI_0$;
- 2) с сухой части высушиваемого материала $Q_2 = G_2 c_2 t_1$;
- 3) с влагой, испарённой с материала, $Q_3 = W c_w t_1$;
- 4) с транспортными устройствами $Q_4 = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} t_{\text{тр}1}$;
- 5) теплота, сообщённая воздуху в калорифере, $Q_{\text{кал}} = L(I_1 - I_0)$.

Расход

- 1) теплота, теряемая с отработанным сушильным агентом, $Q_5 = LI_2$;
- 2) с высушиваемым материалом $Q_6 = G_2 c_2 t_2$;
- 3) с нагретыми транспортными устройствами $Q_7 = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} t_{\text{тр}2}$;
- 4) с испарённой влагой $Q_8 = W i_{\text{п}}$, где $i_{\text{п}}$ – теплота парообразования;
- 5) потери в окружающую среду $Q_{\text{пот}}$.

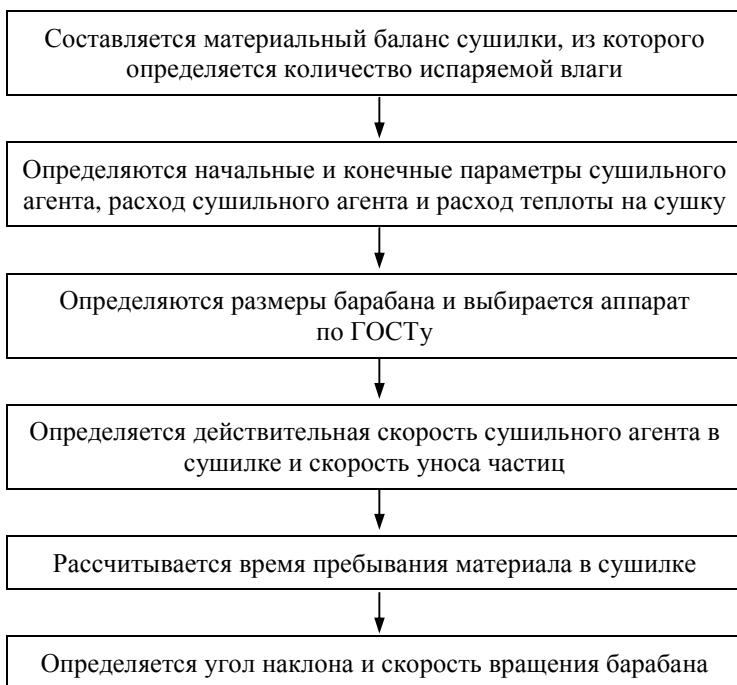
Составим тепловой баланс процесса сушки

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{\text{кал}} = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_{\text{пот}}.$$

Решив полученное уравнение относительно теплоты сообщенного воздуха в калорифере $Q_{\text{кал}}$, разделив все члены уравнения на W , после преобразования получим удельный расход тепла в калорифере

$$q_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{кал}}}{W} = l(I_1 - I_0).$$

Схему определения основных размеров сушилки рассмотрим на примере барабанной сушилки, обогреваемой воздухом.



3.2. ПЕЧИ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

3.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Технологический признак определяет специализацию печи и ассортимент вырабатываемой продукции. По специализации современные печи и печные агрегаты разделяются на хлебопекарные, кондитерские, бара-

ночные, пряничные, для выработки национальных и специальных сортов мучных изделий. По ассортименту вырабатываемой продукции печные агрегаты можно разделить на:

- универсальные печи (могут вырабатывать хлебобулочные, кондитерские, бараночные изделия различных сортов и массы в широком диапазоне);

- специализированные печи и агрегаты (вырабатывают ограниченный ассортимент баранок, печенья, пряников, формовых сортов хлеба или определённые подовые сорта хлебобулочных изделий).

Кроме того, печи классифицируются:

- по производительности (малой производительности с площадью пода до 8 м, средней производительности – до 25 м², большой производительности – свыше 25 м²);

- по способу обогрева пекарной камеры (жаровые, с канальным обогревом, с пароводяным обогревом, с газовым обогревом, с электрообогревом, со смешанным обогревом);

- по типу пекарной камеры (тупиковые, сквозные);

- по степени механизации (со стационарным подом, с выдвижным подом, с конвейером подачи и электроприводом).

По способу обогрева пекарной камеры все печи разделяются на следующие виды:

- печи с регенеративным обогревом (жаровые печи, в которых рабочая камера одновременно является и топочной камерой, в которых периодически сжигается определённая порция топлива);

- печи с канальным обогревом (теплоносителем являются продукты сгорания, проходящие по системе каналов, через поверхность теплообмена которых теплота передаётся в пекарную камеру к тесту-хлебу);

- печи с пароводяным обогревом (теплоносителем является пароводяная смесь высокого давления, циркулирующая в толстостенных нагревательных трубах);

- печи с газовым обогревом (этот способ обеспечивает сжигание газа в пекарной камере);

- электрические печи (используют трубчатые электронагреватели, светлые излучатели, токи высокой частоты, а также контактный способ прогрева);

- печи с комбинированным (смешанным) обогревом (используется комбинация каналов и пароводяных трубок, а также другие варианты способов обогрева).

Пекарные камеры современных печей бывают двух типов:

- 1) тупиковые (посадка тестовых заготовок на под и выгрузка готовой продукции производится через одно и то же посадочное отверстие);

- 2) проходные (посадка и выгрузка продукции осуществляется через отверстия, расположенные с противоположных сторон печи, и при двух-

ниточном конвейере образуется наибольшая холостая ветвь, примерно равная половине всей его длины).

В печах с пластинчатым, ленточным или сетчатым конвейером проходная пекарная камера имеет форму длинного туннеля высотой 300...400 мм. Такие печи называются туннельными.

3.2.2. ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПЕЧЕЙ

Для передачи тепла от теплоносителя или теплогенератора к тесту-хлебу служат теплопередающие устройства, устанавливаемые в пекарной камере печи. В качестве теплопередающих устройств промышленных печей наибольшее распространение получили каналы, пароводяные трубки и электронагреватели.

Каналами называются газоходы, через стенки которых тепло поступает в пекарную камеру. Каналы могут иметь большое термическое сопротивление (их стенки выложены из огнеупорного кирпича, выдерживающего температуру газов свыше 800 °С) и малое (их стенки выполнены из листовой стали или чугунных и стальных труб, рассчитанных на температуру газов ниже 500 °С).

Работа каналов заключается в передаче тепла от продуктов сгорания через рабочую стенку (рабочей стенкой канала называется стенка, обращённая к пекарной камере) в пекарную камеру путём излучения, а также конвекцией.

Форма каналов, их конструкция и расположение в пекарной камере в зависимости от вида выпекаемых изделий могут быть различны.

Пароводяные трубки (трубки Перкинса), изготавливаемые из малоуглеродистой стали, предназначены для обогрева пекарной камеры путём передачи тепла из топочного пространства печи. Они представляют собой толстостенные трубки, наполненные водой на 32...33% их внутреннего объёма и заваренные с двух концов. Для заполнения нагревательных трубок используется дистиллированная вода, освобождённая от кислорода и углекислоты. Нагревательные трубки должны быть рассчитаны на рабочее давление до 18 МПа при температуре до 355,4 °С. Их размеры и конфигурация различны.

Работа нагревательных трубок заключается в следующем. Концы трубок, находящиеся в топке, нагреваются, внутри трубок образуется пар давлением 6...11 МПа, который отдаёт тепло через стенку трубки в пекарную камеру и конденсируется, конденсат стекает обратно к топочному концу, где снова превращается в пар.

Трубчатые электронагреватели (ТЭН) предназначены для преобразования электрической энергии в тепловую. Для обогрева пекарной камеры применяются прямоугольные и U-образные электронагреватели закрытого типа (рис. 3.11).

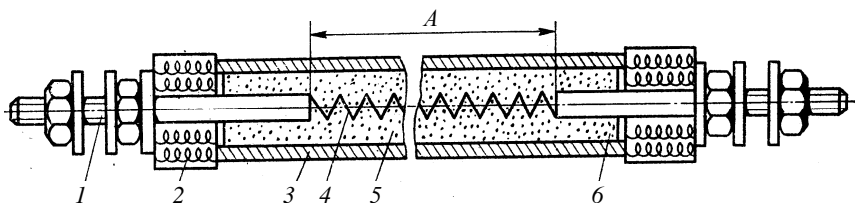


Рис. 3.11. Трубчатый прямоугольный электронагреватель:

1 – контактный стержень; 2 – изолятор; 3 – трубка; 4 – спираль (сопротивление);
5 – наполнитель; 6 – герметик; A – активная длина нагревателя

Электронагреватель состоит из нагревательного элемента (сопротивления) 4, выполненного в виде цилиндрической спирали из нихромовой проволоки, электроизолирующего слоя 2 из магнезита, наружного защитного корпуса, клеммы для присоединения к сети питания, а также приспособления для крепления нагревателя.

В некоторых конструкциях хлебопекарных и кондитерских печей (ПИК-8 и др.) применяются инфракрасные электронагреватели.

Электронагревательные элементы распределяются в пекарной камере по зонам выпечки.

3.2.3. ПЕЧЬ ФТЛ-2

Для выпечки широкого ассортимента хлебобулочных и кондитерских изделий предназначена печь ФТЛ-2 (рис. 3.12), имеющая тупиковую пекарную камеру, в которой размещён люлечно-подиковый двухниточный печной конвейер. Винтовое натяжное приспособление конвейера смонтировано на заднем валу; натяжение осуществляется с топочного фронта.

Для выпечки подовых сортов изделий на конвейере шарнирно подвешиваются 24 люльки шириной 350 мм с металлическими подиками с шагом подвеса 420 мм. Для выпечки формовых сортов хлеба на конвейере подвешивается 36 рамочных люлек шириной 220 мм с шагом подвеса 280 мм.

Движение конвейера печи равномерное, прерывистое. Продолжительность выпечки регулируется в пределах 10...100 мин с помощью реле времени типа РВМ-5, ВС-9. Конвейер печи приводится в движение от электродвигателя. Предусмотрен ручной привод с дополнительно включаемой ремённой передачей в случае необходимости аварийного проверки конвейера печи

Пекарная камера ограничена сверху металлическим сварным перекрытием, в задней стенке печи имеется лаз.

Увлажнение пекарной камеры – паровое с применением гребенчатого устройства. В первой по ходу конвейера зоне печи размещены четыре паровые гребёнки, введённые с обеих сторон печи. Топка печи может быть оборудована колосниковой решёткой для сжигания твёрдого топли-

ва, горелкой для сжигания газа или форсункой для сжигания жидкого топлива.

Для очистки газоходов с двух боковых сторон и с топочного фронта печи имеются люки. Для очистки верхних каналов водогрейных котелков и газоходов над верхним перекрытием со стороны посадочного фронта печи предусмотрены окна с ложной, легко разбираемой кладкой.

Стены печи выложены из красного строительного кирпича с изоляционной засыпкой и обвязаны каркасом из угловой и полосовой стали.

Топочная камера и каналы для прохода газов высокой температуры обмурованы огнеупорным шамотным кирпичом.

Продукты горения проходят по нижнему каналу и попадают в два вертикальных перепускных газохода, по которым направляются в средний канал-радиатор через средние входные окна. Средний канал соединяется с верхними перепускными газоходами через передний и задний газоходы, в которых расположены регулировочные шиберы. По этим перепускным

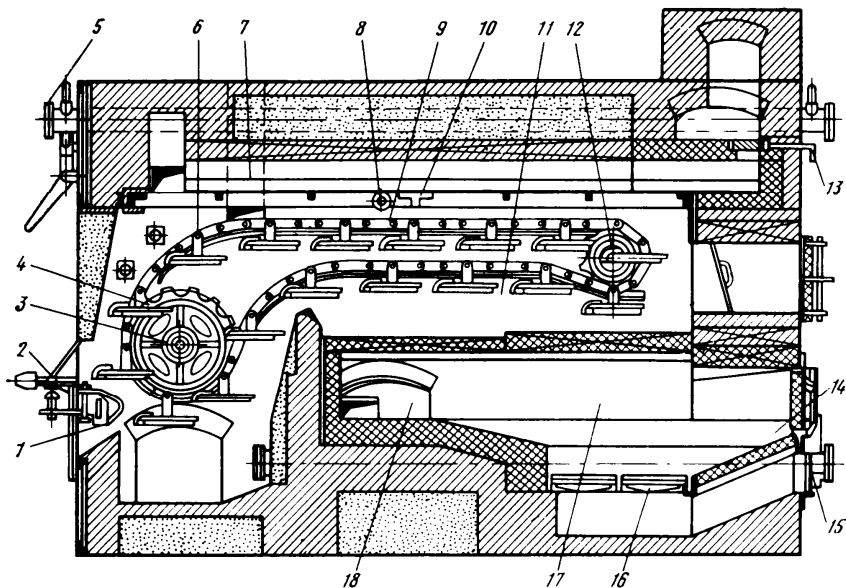


Рис. 3.12. Печь ФТЛ-2:

- 1 – посадочная камера; 2 – механизм для выгрузки подовых изделий; 3 – ведущий вал конвейера; 4 – печной конвейер; 5 – система пароувлажнения; 6 – ведомый блок конвейера; 7 – передний щит; 8 – шибер; 9 – каркас печи; 10 – радиатор; 11 – водогрейный котелок; 12 – перекрытие пекарной камеры; 13 – натяжной блок конвейера; 14 – лаз; 15 – топочная гарнитура; 16 – порог; 17 – люлька; 18 – транспортёр готовой продукции; 19 – выстилка шамотом

газоходам продукты сгорания направляются в верхний канал с плоской поверхностью теплообмена из стального листа.

При помощи шиберов можно регулировать величины потоков дымовых газов, проходящих через средний и верхний каналы. После обогрева верхнего канала поток продуктов сгорания направляется в газоходы трёх водогрейных котелков – теплоутилизаторов 7.

Для обогрева парогенераторов 8 отбираются горячие продукты сгорания в конце нижнего канала. Величина этого потока регулируется шиберами, устанавливаемыми в перепускных газоходах, расположенных в топочной стенке печи.

При выпечке подовых изделий возможна автоматическая разгрузка печи, для чего необходимо включить механизм разгрузки 2, что обеспечит при подходе люлек к посадочному окну печи их поворот на угол 40...42°, и выпеченные изделия соскользнут на транспортёр готовой продукции.

3.2.4. ХЛЕБОПЕКАРНАЯ ПЕЧЬ ХПА-40

Для выпечки формового хлеба крупного развеса предназначена печь ХПА-40, имеющая тупиковую пекарную камеру (рис. 3.13), в которой размещён четырёхниточный цепной конвейер со 100 шарнирно подвешенными рамочными люлками.

Печной конвейер приводится в движение от электродвигателя через вариатор скорости, позволяющий регулировать длительность выпечки от 40 до 65 мин. Для аварийных случаев предусматривается ручной привод.

Стенки печи выполнены из кирпича с прослойками из изоляционных материалов.

Для осмотра пекарной камеры печи и проведения в ней работ имеются лазы и смотровые лючки с осветительными лампами.

В печи применяется водяное увлажнение – поверхность готовых изделий перед выходом из пекарной камеры увлажняется распылённой водой.

Топка печи может быть оборудована для сжигания твёрдого и газообразного топлива. Топочная камера и нижние каналы обмурованы огнеупорным шамотным кирпичом.

Обогрев пекарной камеры смешанный. В средней части она обогревается нагревательными трубками в виде четырёхрядного нагревательного пучка длиной 5300 мм с шагом по вертикали 85 мм и по горизонтали 70 мм, с уклоном 40 мм на 1 м, в нижней – двумя кирпичными каналами и в верхней – девятью дымогарными трубами диаметром 150 мм.

Дымовые газы из топки 9 направляются по боковым каналам в нижние газоходы 10, отдавая часть тепла концам нагревательных трубок 8, затем по вертикальным каналам 14 поступают в металлическую сборную камеру 2, откуда, проходя по дымогарным трубам 4, направляются под водогрейные котелки 6, собираются в боры 5 и отводятся в дымовую трубу.

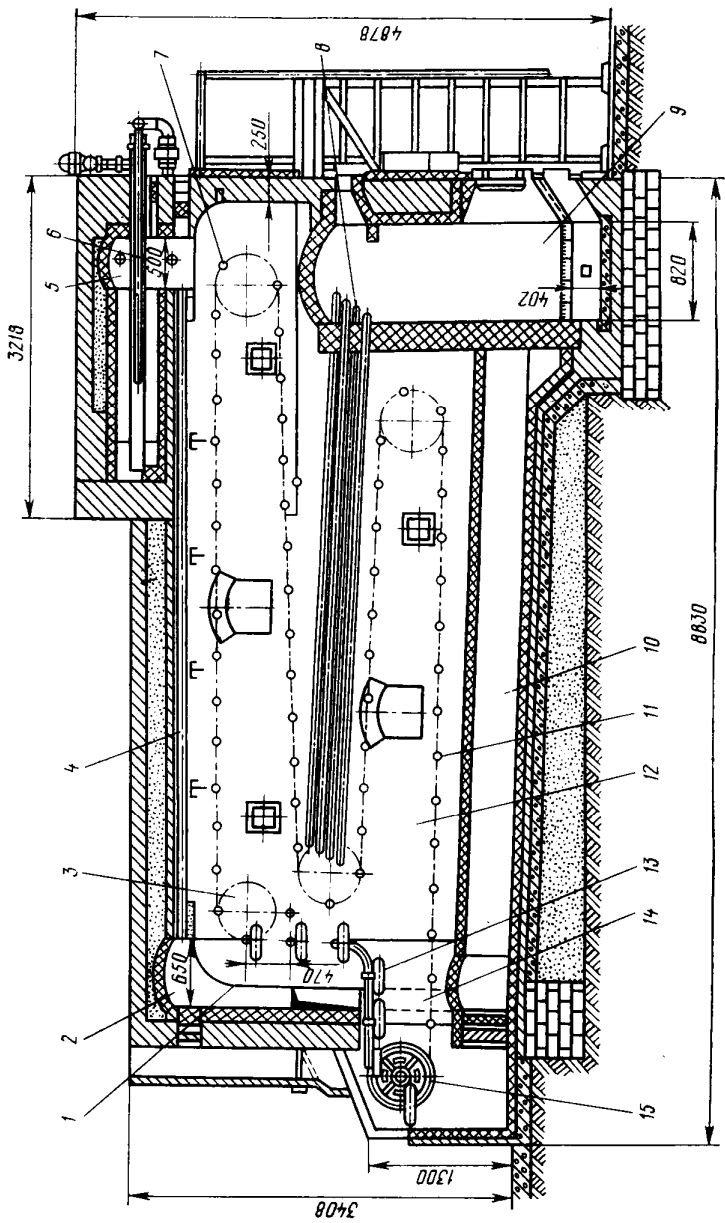


Рис. 3.13. Печь ХПА-40:

- 1 – металлическая сетка; 2 – сборная металлическая камера; 3 – ведомые блоки; 4 – дымогарные трубы; 5 – бороз;
- 6 – водогрейные котелки; 7 – верхний блок; 8 – нагревательные трубки; 9 – толка; 10 – кирпичный канал;
- 11 – четырёхниточный конвейер; 12 – пекарная камера; 13 – люлька; 14 – вертикальные каналы; 15 – ведущий блок

На переднем фронте печи установлен щит с измерительными приборами и пусковой аппаратурой.

3.2.5. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПЕЧНЫХ АГРЕГАТОВ

Вспомогательными устройствами печного агрегата являются дутьевое и тяговое устройства, устройство для вентиляции и увлажнения среды пекарной камеры, теплоиспользующие устройства – теплоутилизаторы (водогрейные и паровые котлы), посадочные и разгрузочные механизмы.

Среда пекарной камеры увлажняется насыщенным паром низкого давления, поступающим от парогенератора печи или из котельной предприятия.

На рисунке 3.14 показана типовая схема увлажнения среды пекарной камеры. Насыщенный пар для увлажнения поступает из парогенератора 2 низкого давления, который обогревается от топки печи. Уровень воды в котелке постоянный (на 130...140 мм выше центра котелка). В котелок поступает вода из бачка 4, где шаровым краном 5 поддерживается постоянный уровень. Количество воды, поступающей в паробразовательный котелок, регулируется вентилем 3. Из котелка пар по трубе 1 отводится в зону увлажнения. Труба 6 имеет ряд мелких отверстий для выхода пара.

Посадка тестовых заготовок на под печей туннельного типа осуществляется обычно без специальных посадочных механизмов – путём опрокидывания над вынесенным подом печи люлек конвейера расстойки при выпечке подовых изделий или путём пересадки кассет с формами, загруженными тестом, при движении вниз вильчатых люлек конвейера расстойки.

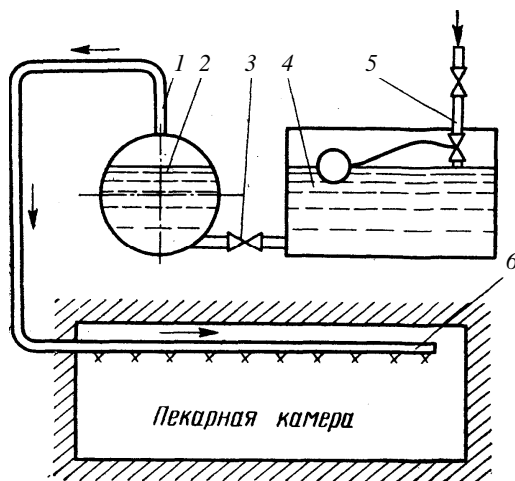


Рис. 3.14. Схема устройства для увлажнения воздуха

Посадка изделий из люльки конвейера тупиковых печей производится с помощью специальных посадочных механизмов. Наиболее широкое распространение в хлебопекарной промышленности получил посадчик тестовых заготовок ХКШ-1, показанный на рис. 3.15. Тестовые заготовки укладываются на посадочную лопату, включается электродвигатель, кривошип с помощью рычага подачи и коленчатых рычагов перемещает посадочную лопату к устью печи и останавливается над люлькой на расстоянии 15...20 мм от её поверхности. Одновременно рычаг подачи нажимает на ролик отталкивателя и сжимает его пружину. Продолжая вращаться, кривошип освобождает рычаг подачи и пружина отталкивателя отбрасывает посадочную лопату в первоначальное положение, а тестовые заготовки перемещаются на подик люльки. Для смягчения удара каретки лопаты при обратном движении предусмотрен пружинный тормоз, а для ограничения обратного хода коленчатых рычагов – упоры. Одновременно с

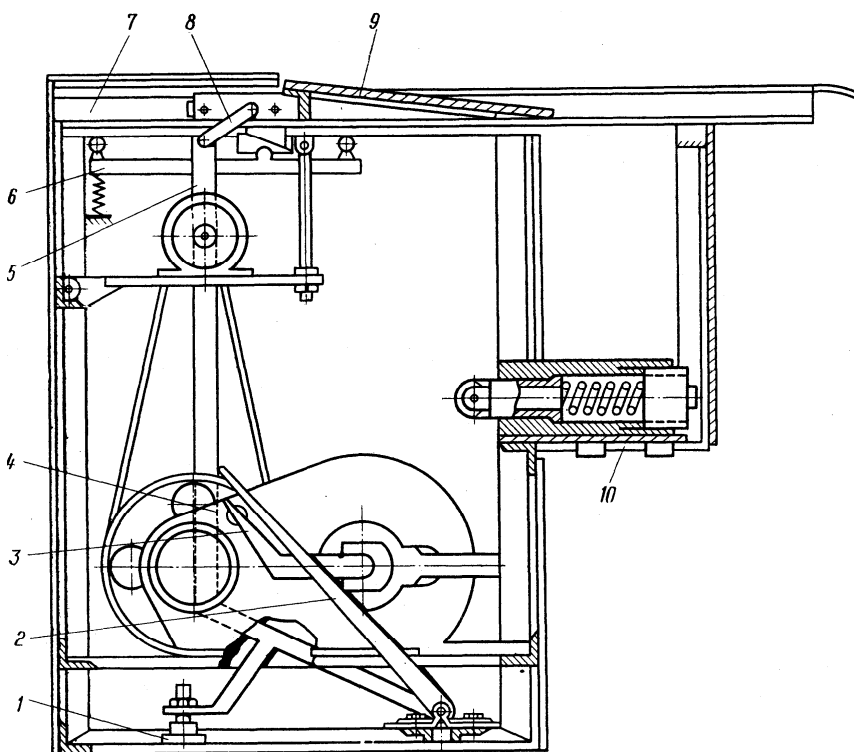


Рис. 3.15. Посадчик тестовых заготовок ХКШ-1:

1 – упор; 2, 5 – рычаги; 3 – кривошип; 4 – редуктор; 6 – тормозное устройство;
7 – направляющая; 8 – серва; 9 – посадочная лопата; 10 – пружина

выключением электродвигателя посадчика включается электродвигатель привода печи.

Для выгрузки готовых изделий из конвейерных печей применяются механизмы разных конструкций. В люлечно-тупиковых печах при выгрузке подовых изделий люльки печного конвейера поворачиваются с помощью копира у места разгрузки на угол $40...45^\circ$; в печах туннельного типа готовые изделия сходят по наклонному лотку у выгрузочного фронта печи при повороте сетчатого или пластинчатого пода.

3.2.6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПЕЧЕЙ

Тепловой баланс пекарной камеры составляют на 1 кг горячего хлеба (в момент его выхода из пекарной камеры), поэтому уравнение теплового баланса пекарной камеры имеет вид

$$q_{п.к} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8,$$

где $q_{п.к}$ – количество теплоты, переданное в пекарную камеру на выпечку 1 кг готовой продукции, кДж/кг; q_1 – теоретический расход теплоты на выпечку 1 кг продукции, кДж/кг; q_2 – расход теплоты на испарение воды и перегрев пара, поступающих в пекарную камеру на увлажнение тестовых заготовок и среды, кДж/кг; q_3 – расход теплоты на нагрев вентиляционного воздуха, кДж/кг; q_4 – расход теплоты на нагрев транспортных устройств, кДж/кг; q_5 – отвод теплоты наружными поверхностями стенок пекарной камеры, кДж/кг; q_6 – расход теплоты через нижнюю стенку пекарной камеры, кДж/кг; q_7 – расход теплоты излучением через посадочные и разгрузочные отверстия, кДж/кг; q_8 – расход теплоты на аккумуляцию элементами печного агрегата, кДж/кг.

$$q_1 = W_{исп} (i_{п.п} - i_{в}) + g_{к} c_{к} (t_{к} - t_{т}) + (g_{с.м} c_{х} + W_{х} c_{в}) (t_{м} - t_{т}),$$

где $W_{исп}$ – количество испарённой влаги из тестовой заготовки во время выпечки – упёк, отнесённой к массе горячего хлеба, кг/кг;

$$W_{исп} = (g_{т} - g_{х}) / g_{х},$$

где $g_{т}$ – масса тестовой заготовки, кг; $g_{х}$ – масса горячего изделия (хлеба), кг; $i_{п.п}$ – энтальпия перегретого пара, кДж/кг; $i_{в}$ – энтальпия воды при температуре теста, кДж/кг; $g_{к}$ – содержание корки в 1 кг горячего хлеба, кг/кг; $c_{к}$ и $c_{х}$ – удельная теплоёмкость сухого вещества соответственно корки и хлеба, кДж/(кг·К); $t_{к}$ и $t_{т}$ – соответственно средняя температура массы корки горячего хлеба и теста, °С; $g_{с.м}$ – содержание сухого вещества в мякише горячего хлеба, кг/кг; $W_{х}$ – содержание влаги в 1 кг горячего хлеба в момент его выхода из пекарной камеры, кг/кг; $c_{в}$ – удельная теплоёмкость воды при температуре теста, кДж/(кг·К); $t_{м}$ – средняя температура мякиша горячего хлеба, °С;

$$q_2 = D_{\text{п}}(i_{\text{п.п}} - i_{\text{н}}) + D_{\text{в}}(i_{\text{п.п}} - i_{\text{в}}),$$

где $D_{\text{п}}$ – массовая доля насыщенного пара, поступившего в пекарную камеру на увлажнение, кг/кг; $D_{\text{в}}$ – массовая доля воды, поступившей в пекарную камеру на увлажнение, кг/кг; $i_{\text{н}}$ – энтальпия насыщенного пара перед пароувлажнительным устройством, кДж/кг;

$$q_3 = (W_{\text{исп}} + D_{\text{п}} + D_{\text{в}})c_p(t_{\text{п.к}} - t_{\text{в}})/(d_{\text{п.к}} - d_{\text{в}}),$$

где c_p – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/кг; $d_{\text{п.к}}$ – влагосодержание горячего влажного воздуха в сечении посадочного окна на выходе из пекарной камеры, кг/кг; $d_{\text{в}}$ – влагосодержание воздуха, кг/кг;

$$q_4 = g_{\text{м.ф}}c_{\text{м}}(t_{\text{ф}}'' - t_{\text{ф}}'),$$

где $g_{\text{м.ф}}$ – масса металла форм, приходящаяся на 1 кг хлеба, кг/кг; $c_{\text{м}}$ – удельная теплоёмкость стали, кДж/(кг·К); $t_{\text{ф}}'$ – температура формы при выходе из печи, °С; $t_{\text{ф}}''$ – температура формы при входе в пекарную камеру, °С;

$$q_5 = 3,6Q_{\text{о.с}} / \Pi,$$

где $Q_{\text{о.с}}$ – потеря теплоты в окружающую среду, кВт; Π – производительность печи, кг/ч;

$$Q_{\text{о.с}} = \alpha_{\text{к}}f_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) + c_0\varepsilon_{\text{п}}f_{\text{п}} \left[(0,01t_{\text{п}})^4 - (0,01t_{\text{в}})^4 \right],$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к воздуху кВт/(м²·К); $f_{\text{п}}$ – площадь поверхности наружных стенок пекарной камеры, м²; $t_{\text{п}}$ – температура наружной поверхности стенки, К; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха в цехе, К; c_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, кВт/(м²·К⁴); $\varepsilon_{\text{п}}$ – коэффициент теплового излучения наружных поверхностей стен ($\varepsilon_{\text{п}} = 0,9$);

$$\alpha_{\text{к}} = \text{Nu} \lambda_{\text{в}} / h,$$

где Nu – число Нуссельта; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); h – высота боковой стенки пекарной камеры, м;

$$\Pi = 60n_{\text{п}}n_{\text{ф}}g_{\text{х}} / \tau,$$

где $n_{л}$ – количество рабочих люлек конвейера; $n_{ф}$ – количество форм с хлебом на люлке; g_x – масса одной буханки хлеба, кг; τ – продолжительность выпечки, мин;

$$q_6 = 3,6Q_{н.с} / \Pi,$$

где $Q_{н.с}$ – потеря теплоты пекарной камеры через нижнюю стенку печи, кВт;

$$Q_{н.с} = (\lambda_{и} / \delta) f_{н.с} (t_{ст} - t_{пол}),$$

где $\lambda_{и}$ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, кВт/(м·К); δ – толщина стенки, м; $f_{н.с}$ – площадь поверхности нижней стенки, м²; $t_{ст}$ – температура стенки со стороны передней камеры, К; $t_{пол}$ – температура пола, К;

$$q_7 = c_0 \varepsilon_0 f_o \Phi \left[(0,01t_{п.к})^4 - (0,01t_{ст})^4 \right] / \Pi,$$

где $\varepsilon_0 = 1$ – коэффициент теплового излучения отверстия; f_o – площадь посадочного или выгрузочного отверстия, м²; Φ – угловой коэффициент; $t_{п.к}$ – температура пекарной камеры (излучающей среды), К; $t_{ст}$ – температура стен в печном зале (равна температуре воздуха), К; τ – время, в течение которого открыты посадочные и выгрузочные отверстия, с;

$$q_8 = 0,$$

поскольку печь рассчитывается для непрерывной работы при установившемся тепловом режиме.

Тепловой поток от системы обогрева в пекарную камеру $Q_{п.к}$ (кВт) будет равен

$$Q_{п.к} = q_{п.к} \Pi / 3,6.$$

КПД пекарной камеры $\eta_{п.к}$ (%) определяется в виде

$$\eta_{п.к} = (q_1 / q_{п.к}) \cdot 100.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии излагаются теоретические основы, классификация, особенности конструктивного исполнения, функционирования и проектного расчета, достоинства и недостатки оборудования пищевых производств, предназначенных для проведения тепломассообменных процессов. В соответствии с общепринятой классификацией оборудование общего назначения по функциональному признаку такое оборудование представляет собой группу аппаратов и вспомогательных устройств, предназначенных для организации тепловых, массообменных и совмещенных тепломассообменных процессов.

Оборудование этой группы широко используется в технологиях пищевых производств самых различных продуктов питания из сырья растительного, животного происхождения, рыбы, комбинированных продуктов питания для тепловой, термической обработки, концентрирования, выделения очистки методами нагрева, охлаждения, упаривания, варки, ректификации, экстрагирования, сушки, выпечки, обжарки и др.

Полученные знания необходимы для профессиональной подготовки бакалавров направления 260100 «Технология продовольственных продуктов», 260100.62 «Продукты питания из растительного сырья», 240700.62 «Биотехнология» при решении практических задач, связанных с эксплуатацией и ремонтом основного тепломассообменного технологического оборудования, а также с интенсификацией технологических процессов.

Создание и внедрение в производство принципиально новой техники, современных технологий и материалов, способствующих повышению производительности оборудования, улучшению качества выпускаемой продукции, экономии материальных ресурсов и активной охране окружающей среды – главная задача технического прогресса, которую предстоит решать молодым специалистам в настоящее время и в перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, Б.М. Технологическое оборудование пищевых производств : учебник / под ред. Б.М. Азарова. – М. : Агропромиздат, 1988. – 463 с.
2. Гребенюк, С.М. Технологическое оборудование сахарных заводов : учебник / С.М. Гребенюк. – М. : Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 342 с.
3. Технологическое оборудование хлебопекарных и макаронных предприятий : учебник / Б.М. Азаров, А.Т. Лисовенко, С.А. Мачихин и др. – М. : Агропромиздат, 1986. – 263 с.
4. Маршалкин, Г.А. Технологическое оборудование кондитерских фабрик : учебник / Г.А. Маршалкин. – М. : Лёгкая и пищевая промышленность, 1984. – 448 с.
5. Зайчик, Ц.Р. Оборудование предприятий винодельческой промышленности : учебник / Ц.Р. Зайчик. – М. : Лёгкая и пищевая промышленность, 1977. – 235 с.
6. Драгилев, А.И. Оборудование для производства мучных кондитерских изделий : учебник / А.И. Драгилев. – М. : Агропромиздат, 1989. – 220 с.
7. Процессы пищевых и кормовых производств : учебник / А.Я. Соколов, М.Н. Караваев, Д.М. Руб, Ц.Р. Зайчик. – М. : Машиностроение, 1973. – 288 с.
8. Зайчик, Ц.Р. Сборник задач по расчётам оборудования винодельческого производства : учебник / Ц.Р. Зайчик. – М. : Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 200 с.
9. Колесник, Б.Г. Справочник механика сахарного производства : учебник / Б.Г. Колесник, В.П. Лысенко, А.П. Пароходько. – М. : Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 264 с.
10. Сигал, М.Н. Оборудование предприятий хлебопекарной промышленности : учебник / М.Н. Сигал. – М. : Агропромиздат, 1985. – 296 с.
11. Технологическое оборудование предприятий броидильной промышленности : учебник / Л.И. Попов, И.Т. Кретов, В.Н. Сабельников и др. – М. : Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 591 с.
12. Чернов, М.Е. Оборудование предприятий макаронной промышленности : учебник / М.Е. Чернов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 264 с.

ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Теплофизические свойства характеризуют индивидуальное термодинамическое состояние продукции. К ним относятся температура, теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность.

Теплофизические свойства продуктов широко используют в пищевой промышленности и общественном питании для расчёта изменения температуры внутри сырья, продолжительности его термической обработки (нагревания, охлаждения) и др. В практике торговли теплофизические характеристики применяют для определения необходимого количества тепловой энергии с целью создания оптимальной температуры продуктов в процессе их хранения и транспортирования.

Температура – основная физическая величина, которая характеризует термодинамическое состояние пищевых продуктов и зависит от температуры окружающей среды. При изменении температуры окружающей среды как в сторону понижения, так и в сторону повышения, изменяется и температура продуктов. Нагревание является одним из основных технологических процессов производства пищевых продуктов, при котором сырьё претерпевает комплекс сложных физико-химических, структурных и других изменений и превращается в готовый продукт. На охлаждении и замораживании основаны лучшие методы длительного хранения скоропортящихся продуктов с минимальными изменениями их химического состава.

Температура плавления и застывания – температура, при которой отдельные компоненты пищевых продуктов переходят из твёрдого состояния в жидкое (плавление) или из жидкого в твёрдое. На эти изменения в зависимости от температуры влияют в основном жиры, жироподобные вещества (воск, кутин). При высоких температурах плавлению подвергаются и сахара.

Температура плавления и застывания влияет на консистенцию пищевых продуктов. Так, жирнообразные продукты имеют жидкую консистенцию, если входящие в их состав жиры плавятся и застывают при низких температурах (подсолнечное масло плавится при температуре $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$), и твёрдую консистенцию при высоких температурах плавления и застывания этих жиров (бараний жир плавится при температуре $44\text{...}55\text{ }^{\circ}\text{C}$ и застывает при температуре $34\text{...}35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Температура плавления и застывания имеет важное значение при определении свойств и качества жиров.

Температура заморозания – температура, при которой вода переходит из жидкого состояния в твёрдое. Заморозание по-разному влияет на качество пищевых продуктов. При образовании кристаллов льда объём продукта увеличивается, что приводит к разрушению стеклянной тары и вздутию металлической или полимерной тары. Кроме того, часто нарушается свойственная продукту структура, например, гомогенизированные продукты могут расслаиваться (молоко, пюре, соки и т.п.). Вместе с тем замораживание ряда пищевых продуктов (хлеба, плодов, овощей, мяса, рыбы) позволяет улучшить их сохраняемость и удлинить сроки хранения.

Температура заморозания большинства продуктов колеблется в пределах от 0 до -5 °С и зависит от содержания воды и сухих веществ, в том числе соли, сахаров и спирта. Чем выше содержание воды, тем ближе к 0 °С температура заморозания.

Теоретически температура пищевых продуктов и окружающей среды должны совпадать, однако практически этого не всегда удаётся достигнуть, что обусловлено разной теплоёмкостью и теплопроводностью пищевых продуктов и воздушной окружающей среды, влияющих на скорость выравнивания температуры указанных объектов.

Теплоёмкость характеризует количество тепла, необходимое для повышения температуры объекта определённой массы в определённом интервале температур. Показателем теплоёмкости служит **удельная массовая теплоёмкость**, которая определяется количеством тепла, необходимого для повышения температуры 1 кг продукта на 1 °С. Удельная массовая теплоёмкость воды равна 4,19, углеводов – 1,42, жиров – 1,76, белков – 1,55 кДж/кг·К.

Теплоёмкость товаров зависит от их химического состава и температуры. С увеличением влажности и температуры теплоёмкость, как правило, увеличивается. Для продуктов с большой влажностью (овощей, мяса и др.) характерна высокая теплоёмкость, близкая по значению к теплоёмкости воды. Содержание жира снижает теплоёмкость продукта.

Удельная теплоёмкость рассчитывается для определения количества тепла, которое нужно передать продукту для его нагревания или отнять для его охлаждения.

Теплопроводность – свойство материала проводить тепло. Показателем этого свойства является **коэффициент теплопроводности**, который характеризуется количеством тепла, проходящего через слой продукта толщиной 1 м на площади 1 м² за 1 с при разности температур на противоположных поверхностях в один градус.

Коэффициент теплопроводности воздуха при 20 °С равен 0,0259 Вт/м·К. Очень высокую теплопроводность имеет вода – 0,60 Вт/м·К. Чем ниже влажность продуктов, тем меньше их теплопроводность. Следовательно, сухие продукты пропускают тепло хуже, чем продукты с высокой влажностью.

Очень важно учитывать теплопроводность пищевых продуктов, которые хранятся при пониженной температуре (мясо, рыба, плоды и овощи, молочные товары), а также продуктов, выделяющих физиологическое тепло (мука, крупа, зерно). Низкая теплопроводность последних может вызвать разогрев продукта при его длительном хранении и усиление ферментативных процессов в его внутренних слоях, что приводит к порче.

Температуропроводность характеризует скорость изменения (выравнивания) температуры продуктов. **Коэффициент температуропроводности** ($\text{м}^2/\text{с}$) зависит от теплоёмкости, теплопроводности и плотности продукта и определяется опытным путём или рассчитывается исходя из коэффициента теплопроводности, теплоёмкости и плотности материала.

Коэффициент температуропроводности обуславливает скорость их прогрева или охлаждения продуктов. На температуропроводность влияют влажность, температура, плотность, пористость, жирность и другие свойства продукта. Это влияние строго индивидуально для каждого пищевого продукта.

Электрофизические свойства – способность пищевых продуктов изменяться под влиянием внешнего электрического поля. Показателями этих свойств являются электропроводность и диэлектрическая проницаемость. На электрофизические характеристики пищевых продуктов влияют температура, влажность, плотность и другие факторы.

Электропроводность – способность объектов проводить электрический ток. По электропроводности некоторых пищевых продуктов можно косвенно судить об их качестве и сохраняемости. Так, повышение электропроводности молока может быть следствием его низкой жирности, разбавления или прокисания. Электропроводность тесно связана с влажностью продукта и с увеличением последней возрастает. На измерении электропроводности основано определение влажности многих пищевых продуктов – муки, сахара-песка, зерна и др., а также титруемой кислотности темноокрашенных продуктов.

Диэлектрическая проницаемость – величина, влияющая на количество энергии, которая может быть аккумулирована в форме электрического поля. Диэлектрические свойства присущи потребительским товарам, которые представляют собой гетерогенные смеси, содержащие воду, водные растворы солей, а также белки, жиры и углеводы, относящиеся к разряду диэлектриков с потерями. Этот показатель зависит от температуры и химического состава объекта. Так, диэлектрические характеристики мышечной ткани мяса тем выше, чем ниже его жирность. Диэлектрическую проницаемость учитывают при обработке пищевых продуктов токами ВЧ и СВЧ, ИК-излучением.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	4
1.1. Теплообменные аппараты	4
1.1.1. Общие сведения	4
1.1.2. Змеевиковый теплообменник	6
1.1.3. Кожухотрубчатые теплообменники	7
1.1.4. Спиральные теплообменники	9
1.1.5. Теплообменник типа «труба в трубе»	10
1.1.6. Пластинчатые теплообменники	11
1.1.7. Технологический расчёт теплообменников	13
1.2. Выпарные аппараты и установки	16
1.2.1. Общие сведения	16
1.2.2. Вакуумный выпарной аппарат ВАЦ-600	17
1.2.3. Унифицированный змеевиковый вакуум-аппарат 33-А	19
1.2.4. Плёночный прямоточный выпарной аппарат ВАПП-1250 ...	22
1.2.5. Технологический расчёт многокорпусной вакуумной выпарной установки	23
1.3. Конденсаторы выпарных установок	25
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	29
2.1. Оборудование для разделения жидких смесей методом ректификации	29
2.1.1. Брагоперегонные установки	29
2.1.2. Ректификационные установки	32
2.2. Экстракторы	37
2.2.1. Общие сведения	37
2.2.2. Экстрактор вертикальный шнековый НД-1250	38
2.2.3. Колонный экстрактор	41
2.2.4. Экстрактор конструкции ВНИЭКИпродмаш	42
2.2.5. Технологический расчёт экстракторов	44

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	46
3.1. Оборудование для сушки пищевых продуктов	46
3.1.1. Общие сведения	46
3.1.2. Барабанная сушилка	47
3.1.3. Вальцовые сушилки	49
3.1.4. Ленточная сушилка	50
3.1.5. Пневматическая сушилка	51
3.1.6. Распылительная сушилка	52
3.1.7. Сублимационная сушилка	54
3.1.8. Камерные и туннельные сушилки	55
3.1.9. Шахтные сушилки	56
3.1.10. Сушилки с псевдооживленным слоем	57
3.1.11. Методика технологического расчёта конвективных сушилок	58
3.2. Печи пищевой промышленности	61
3.2.1. Общие сведения	61
3.2.2. Теплопередающие устройства печей	63
3.2.3. Печь ФТЛ-2	64
3.2.4. Хлебопекарная печь ХПА-40	66
3.2.5. Вспомогательные устройства печных агрегатов	68
3.2.6. Технологический расчёт печей	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	74
ГЛОССАРИЙ	75

Учебное издание

КУДИ Андрей Николаевич,
ДОЛГУНИН Виктор Николаевич,
ИВАНОВ Павел Александрович,
ПРОНИН Василий Александрович

ТЕПЛОМАССООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

Редактор Л.В. Комбарова
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 25.01.2012.
Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 22

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14