

Кочнева С.В.

Курс лекций

Основы криогенной техники



Бишкек 2009

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И.РАЗЗАКОВА**

Основы криогенной техники

**Курс лекций
по дисциплине «Основы криогенной техники»**

*Допущено Министерством образования Кыргызской Республики
в качестве учебного пособия для студентов специальности
«Машины и аппараты пищевых производств»*

Бишкек 2009

УДК 664.84.037.1

ББК 37.2

К44

*Рекомендовано
к печати решением
Ученого Совета КГТУ им.И.Раззакова*

Составитель к.т.н., проф. Кочнева С.В.

К44 Основы криогенной техники: Курс лекций по дисциплине «Основы криогенной техники»/ КГТУ им. И. Раззакова; сост. С.В.Кочнева. - Б.: ИЦ «Техник», 2009. – 64 с.

ISBN 978-9967-436-22-0

Приводятся сведения о циклах глубокого охлаждения, об оборудовании, осуществляющем сжижение газов, технологическом оборудовании пищевых производств, использующем глубокий холод, основах расчета циклов и оборудования.

Предназначен для студентов очной и заочной форм обучения специальности 551802.01 «Машины и аппараты пищевых производств»

Рецензенты: д.т.н., проф. Кулмырзаев А.А.
д.т.н., проф. Мусульманова М.М.
к.т.н., проф. Джурупова Б.К.

К 3003000000-09
ISBN 978-9967-436-22-0

УДК 664.84.037.1
ББК 37.2
© Кочнева С.В., 2009

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы криогенной техники» является прикладной из цикла дисциплин направления 551802 «Пищевая инженерия» специальности 551802.01 «Машины и аппараты пищевых производств».

В результате изучения данной дисциплины студенты приобретают необходимые знания в области получения и использования глубокого холода; знакомятся с устройством детандеров и других машин, сжижающих газ и процессами, происходящими в них; устройством и принципом работы вспомогательного оборудования, его обслуживанием и ремонтом; с технологическим оборудованием пищевых производств, использующих глубокий холод, и основами его расчета.

ЛЕКЦИЯ 1. Глубокое охлаждение

План лекции

- 1.1. Основные понятия. Дроссельный эффект
- 1.2. Термодинамическое выражение дроссельного эффекта
- 1.3. Физическая сущность дроссельного эффекта
- 1.4. T-S диаграмма для воздуха

1.1. Основные понятия. Дроссельный эффект

Сжижение газа происходит при охлаждении его до критической или более низкой температуры.

Сжижение таких газов, как O_2 , N_2 , H_2 , He, критические температуры которых значительно ниже -100°C , возможно лишь при помощи методов глубокого охлаждения.

Эти методы основаны полностью или частично на использовании свойств реальных газов. Для идеальных газов уравнение состояния может быть выражено:

$$\frac{PV}{RT} = 1$$

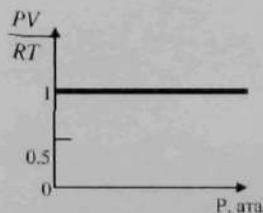


Рис. 1.1. Зависимость $\frac{PV}{RT}(P)$ для идеальных газов

На диаграмме прямая параллельна оси абсцисс.

Исследования показали, что поведение реальных газов отличается от поведения идеальных и их состояние выражается уравнением Ван-дер-Ваальса

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

где a, b - опытные коэффициенты;

отношение $\frac{a}{V^2}$ - влияние молекулярных сил сцепления, возрастающих

с уменьшением удельного объема газа;

b - учитывает несжимаемый объем, т.е. объем самих молекул.

Дифференцирование уравнения Ван-дер-Ваальса приводит к следующим зависимостям между критическими параметрами газа и значениями a и b .

$$V_{кр} = 3b; \quad T_{кр} = \frac{8a}{27Rb}; \quad P_{кр} = \frac{a}{27b^2}$$

Из уравнения состояния реальных газов следует, что для них (в отличие от идеальных газов, в зависимости от температуры и давления значения $PV \geq RT$). В технике глубокого охлаждения используются свойства реальных газов для получения дроссельного эффекта (эффект Джоуля - Томсона).

Дроссельный эффект заключается в том, что при расширении сжатых газов до более низкого давления без совершения внешней работы и без обмена теплом с окружающей средой их температура изменяется.

Различают:

- дифференциальный дроссельный эффект;
- интегральный дроссельный эффект.

Дифференциальный эффект - это изменение температуры, происходящее под действием бесконечно малого изменения давления.

$$i = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{i=const},$$

где индекс $i = const$ - указывает на то, что процесс идет при постоянном теплосодержании газа, т.е. без отвода и подвода тепла или механической энергии извне.

Практически происходит не бесконечно малое изменение давления, а некоторый конечный перепад давления газа.

Поэтому на практике считается: дифференциальный дроссельный эффект - это изменение температуры газа при падении давления на 1 ат.

Для воздуха дифференциальный эффект:

$$i \approx \frac{1}{4} ^\circ\text{C}$$

Интегральный эффект соответствует изменению давления газа от P_1 до P_2 и может быть выражен уравнением:

$$i_H = \sum i_{cp} \cdot \Delta P,$$

где i_{cp} - среднее значение падения температуры на 1 ат в интервале давления ΔP .

Для идеального газа дроссельный эффект = 0.

1.2. Термодинамическое выражение дроссельного эффекта

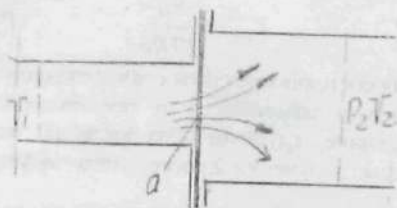


Рис. 1.2. Схема для выражения дроссельного эффекта

Рассмотрим цилиндр, разделенный на 2 части перегородкой с дроссельным отверстием «а» (рис.2).

Дросселируемый газ протекает из левой части цилиндра в правую. Запас энергии этого газа может быть определен из выражения

$$E_1 = P_1 V_1 + \frac{U_1}{A} + \frac{\omega_1^2}{2g}$$

где $P_1 V_1$ - работа перемещения газа в левой части цилиндра;

U_1 - внутренняя энергия газа;

A - тепловой эквивалент работы;

$\frac{\omega_1^2}{2g}$ - энергия движения газа.

Запас энергии после дросселирования:

$$E_2 = P_2 V_2 + \frac{U_2}{A} + \frac{\omega_2^2}{2g}$$

Так как процесс дросселирования протекает без отвода или подвода тепла и механической энергии извне, то $E_1 = E_2$, и, следовательно

$$P_1 V_1 + \frac{U_1}{A} + \frac{\omega_1^2}{2g} = P_2 V_2 + \frac{U_2}{A} + \frac{\omega_2^2}{2g} \text{ или}$$

$$AP_1 V_1 + U_1 + A \frac{\omega_1^2}{2g} = AP_2 V_2 + U_2 + A \frac{\omega_2^2}{2g}$$

Пренебрегая бесконечно малой величиной $\ll A \frac{\omega_2^2}{2g}$, можно записать, что $U_1 + AP_1 V_1 = U_2 + AP_2 V_2$ - это выражение равенства теплосодержаний (энтальпий), т.е.

$$i_1 = i_2 \text{ или } d_i = 0$$

и дросселирование происходит при $i_1 = const$ *изэнэнтальпически*.

Для идеального газа при постоянной температуре $P_1 V_1 = P_2 V_2$ и, следовательно, $U_1 = U_2$ или $dU = 0$.

Так как $dU = C_v dT$, а теплоемкость при постоянном объеме $C > 0$, то $dT = 0$, что подтверждает неизменность температуры при дросселировании идеального газа.

Для реального газа $P_1 V_1 \neq P_2 V_2$, значит $U_1 \neq U_2$, т.е. дросселирование реального газа происходит с изменением PV и внутренней энергии газа.

Проявлением этого является дроссельный эффект, заключающийся в изменении T_{stat} при его дросселировании, т.е. при расширении газа без производства внешней работы и без теплообмена с окружающей средой.

1.3. Физическая сущность дроссельного эффекта

При изотермическом сжатии реального газа из компрессора отводится с охлаждающей водой как тепло, эквивалентное внешней работе сжатия, так и добавочное количество тепла, возникающее в результате работы молекулярных сил притяжения.

При дросселировании реального газа часть его внутренней энергии расходуется на внутреннюю работу, направленную против сил притяжения между молекулами.

Кроме того, если при дросселировании, в результате повышенной сжимаемости реального газа, окажется, что $P_2 V_2 > P_1 V_1$, то избыток внешней работы производится также за счет внутренней энергии газа. Общий результат проявляется в понижении температуры газа на некоторую величину $t_1 - t_2$ (положительное значение дроссельного эффекта).

Для возвращения воздуха в первоначальное состояние к нему следует подвести тепло в количестве $C_p(t_1 - t_2)$, равном тому добавочному количеству тепла, которое было отведено в компрессоре охлаждающей водой вместе с теплом, эквивалентным изотермической работе сжатия.

Величина $C_p(t_1 - t_2)$ - это *холодопроизводительность цикла*.

Если, вследствие пониженной сжимаемости реального газа, при дросселировании $P_2 V_2 < P_1 V_1$, то избыток затраченной в компрессоре работы сжатия расходуется на повышение температуры газа с соответствующим понижением холодопроизводительности цикла.

Инверсионная температура

Дроссельный эффект может быть положительным, отрицательным или равным нулю.

Знак эффекта дросселирования есть функция от температуры $f(t)$, т.е. для одного и того же газа при различных температурах можно получить как положительное, так и отрицательное значение эффекта.

Температура, при которой дроссельный эффект равен нулю, называется *инверсионной*.

Инверсионная температура характеризуется равенством:

$$T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = V,$$

т.е. дроссельный эффект охлаждения при дросселировании имеет положительное значение при условии

$$T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p > V \text{ и отрицательное - при } T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p < V.$$

Все распространенные газы имеют высокую инверсионную температуру, поэтому дроссельный эффект для них положительный.

Водород H_2 при обычных условиях имеет отрицательный дроссельный эффект (инверсионная температура – 73 °С). Будучи охлажденным ниже – 73 °С, водород при дросселировании охлаждается.

Расширение газа с отдачей внешней работы

В установках глубокого охлаждения применяется также метод охлаждения газов, основанный на их расширении с отдачей внешней работы.

Расширение газов производят в расширительной машине (детандере), представляющем собой двигатель, работающий на сжатом газе.

Детандер выполнен в виде одноступенчатой поршневой машины, а для расширения большого количества газа до 6 ата – в виде одноколесной турбины.

Работа, развиваемая детандером, может быть использована для производства энергии или сжатия части газа.

Процесс расширения в детандере происходит без теплообмена с окружающей средой, т.е. является *адиабатическим*.

Как при дросселировании, так и при его адиабатическом расширении происходит изменение температуры вследствие изменения объемной энергии газа PV и влияния молекулярных сил притяжения.

Особое значение имеет отдача внешней работы, которая вследствие отсутствия подвода тепла извне, осуществляется за счет внутренней энергии газа при значительном понижении температуры последнего.

Предельное понижение температуры газа может быть определено по уравнению для адиабатического процесса:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

где k - показатель адиабаты.

В действительности же процесс является политропическим и достигаемое понижение температуры всегда меньше подсчитанного по этому уравнению.

1.4. T-S диаграмма для воздуха

Для рассмотрения процесса сжижения газов, в частности воздуха, пользуются T-S диаграммой (рис. 1.3).

По оси абсцисс – откладывается энтропия 1 кгс воздуха, по оси ординат – абсолютная температура.

Кривые на диаграмме, идущие слева вверх и направо, – изобары, построенные для различных давлений с 1 ата до 200 ата.

Кривые, направленные вверх налево, – изоэнтальпы ($i = const$).

Пунктирная линия (-.-), параллельная оси абсцисс и проходящая через критическую точку $M_{кр}$, – критическая изотерма ($t = 132,6$ °К).

Область, ограниченная кривой, – это область *сосуществования жидкой и парообразной фаз*.

Правый нижний угол диаграммы, ограниченный правой ветвью пограничной кривой и критической изотермой, – *область перегретого пара*.

Левый угол диаграммы, ограниченный левой ветвью пограничной кривой и критической изотермой – *область жидкой фазы*.

Вся верхняя часть диаграммы от критической изотермы и выше соответствует *состоянию постоянных газов*.

$T-S$ диаграмма для воздуха.
 Параметр α при $1 \text{ атм} \cdot \text{кг} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$
 $1 \text{ атм} \cdot \text{см}^3 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

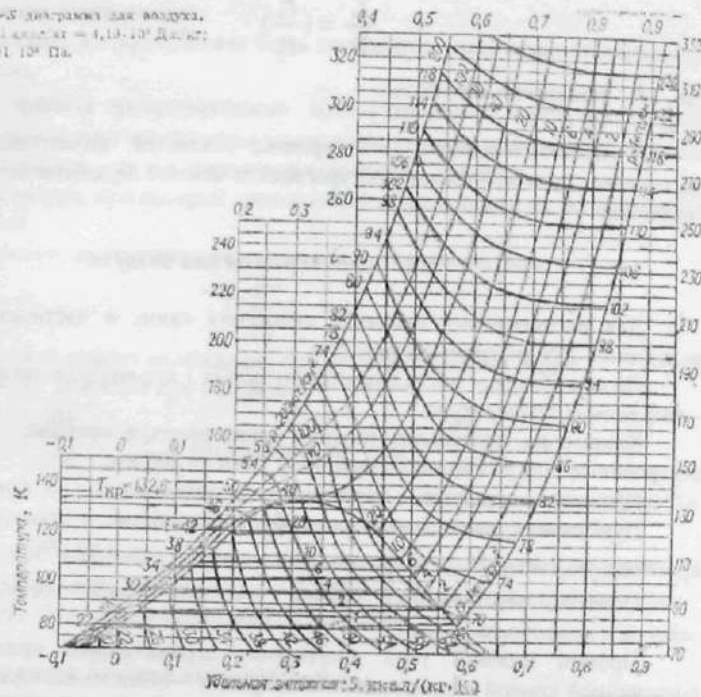


Рис. 1.3. $T-S$ диаграмма для воздуха

Контрольные вопросы

1. Какие методы применяются для сжижения O_2 , H_2 , N_2 , He ?
2. Каким уравнением описывается состояние реальных газов?
3. Какой вид имеет уравнение Ван-дер-Ваальса?
4. Что называется дроссельным эффектом?
5. Что понимается под дифференциальным дроссельным эффектом?
6. Что понимается под интегральным дроссельным эффектом?
7. В чем заключается термодинамическое выражение дроссельного эффекта?
8. Как определяется холодопроизводительность цикла?
9. Какая температура называется инверсионной?
10. Какой вид имеет расширительная машина – детандер?
11. К какому процессу относится процесс расширения газов в расширительной машине?
12. Какие параметры воздуха можно определить по $T-S$ диаграмме?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Госхимиздат, 1983. - 762 с.
2. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. Изд. 4-е. М.,-Л.: Советская наука, Ч.1, 1967. - 392 с.
3. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. Изд. 4-е. М.,-Л.: Советская наука, Ч.2, 1967. - 495 с.

ЛЕКЦИЯ 2. Минимальная работа сжижения газов

Достижение низких температур связано со сжижением газов, т.е. техника глубокого охлаждения является техникой *сжижения газов*.

Основной показатель экономичности метода снижения газов – это расход энергии на снижение 1 кгс газа, а степень совершенства определяется путем сравнения фактического расхода энергии с теоретически минимальной работой, затрачиваемой на сжижение.

Примем обозначения:

P_1 - давление газа в начале сжатия, ата

T_1 - начальная температура газа, °К

S_1 - начальная энтропия газа, кДж (кгс °С)

i_1 - начальное теплосодержание газа, кДж/кгс

P_2 - давление газа в конце сжатия, ата

T_2 - температура газа в конце сжижения, °К

S_1 - энтропия насыщенного пара, кДж (кгс °С)

i_2 - теплосодержание газа в конце сжатия, кДж/кгс

$i_{ж}$ - теплосодержание жидкости, кДж/кгс

$S_{ж}$ - энтропия жидкости, кДж (кг °С)

r - теплота испарения газа, кДж/кг

C_p - теплоемкость при $P = const$, кДж/кг °С

Q_1 - количество тепла, воспринимаемое охлаждающей водой, кДж

Q_2 - количество тепла, отнимаемое при охлаждении и конденсации газа, кДж

AL - работа сжижения 1 кгс газа, кДж

Затрата работы – минимальная при идеальном процессе сжижения газа, который можно представить осуществляемым путем изотермического сжатия и адиабатического расширения.

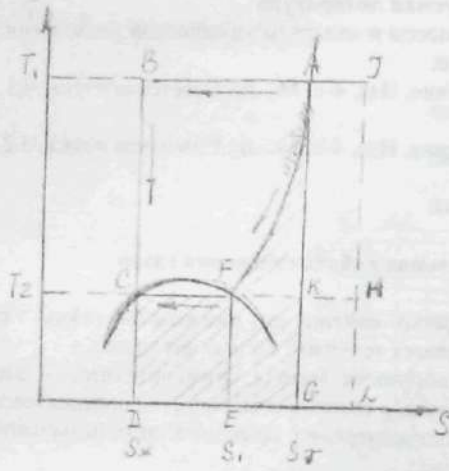


Рис. 2.1. Идеальный процесс сжижения газов на T-S диаграмме

Как видно из T-S диаграммы (рис. 2.1), в таком процессе газ сжимается изотермически при температуре T_1 от точки А до точки В по прямой АВ.

После сжатия газ адиабатически расширяется (вертикаль ВС), превращаясь в жидкость.

Газ подвергается также охлаждению, причем охлаждающей водой от него отнимают не только тепло в количестве, необходимом для сжижения, но и тепло, выделившееся в результате изотермического сжатия

$$Q_1 = Q_2 + AL.$$

Это равенство соответствует II закону термодинамики, т.к. если допустить, что охлаждающая вода и газ обратимо обмениваются теплом в замкнутой системе, причем тепло отнимается от тела (газа) при низкой температуре и отдается воде при более высокой, то для теплообмена необходима затрата механической энергии извне.

Площадь АВДС соответствует количеству тепла, отнимаемому охлаждающей водой (Q_1).

Площадь, эквивалентная затрачиваемой работе (AL), должна быть частью площади АВДС.

Теплота Q_2 , отнимаемая при сжижении газа, складывается из 2-х слагаемых:

1. Теплоты, отнимаемой при охлаждении газа до температуры сжижения;
2. Теплоты конденсации газа.

Можно предположить, что охлаждение газа от T_1 (точка А) протекает по изобаре АF до кривой насыщения при температуре T_2 .

От точки F до точки С происходит конденсация пара при $T_2 = const$.

Итак, первая составляющая соответствует количеству тепла, эквивалентному площади EFAG, а вторая – количеству тепла, эквивалентному площади ДCFE, т.е. на долю работы остается площадь CBAF (незаштрихованная площадь на диаграмме).

Абсолютное значение AL находится, исходя из второго закона термодинамики, по которому сумма изменений энтропии всех тел, участвующих в замкнутом процессе, в предельном случае равна 0.

В рассматриваемом процессе изменение энтропии газа равно:

$$S_x - S_r.$$

Изменение энтропии воды определяется равенством

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2 + AL}{T_1}.$$

Согласно второму закону термодинамики

$$S_x - S_r + \frac{Q_2}{T_1} + \frac{AL}{T_1} \geq 0$$

откуда минимальная работа

$$AL = T_1(S_r - S_x) - Q_2.$$

Пристроим к отрезку KG площадь KHLG, равную площади AFK, тогда

$$\text{площадь CДЛH} = \text{площади AFCДG},$$

следовательно площадь CДЛH – эквивалентна количеству тепла Q_2 .

Площадь CBJH представляет собой эквивалент работы по циклу Карно.

Площадь AFСВ меньше площади CBJH, т.е. минимальная работа сжижения меньше работы, затрачиваемой по идеальному циклу Карно.

Практически достичь сжижения при $AL = \min$ невозможно, т.к. пришлось бы создавать высокие давления.

Как уже известно, количество теплоты Q_2 , которое необходимо отнять от газа при его сжижении, состоит из 2-х частей:

- теплоты охлаждения газа от T_1 до T_2 ;
- теплоты конденсации (испарения).

Первая составляющая может быть выражена равенством:

$$TdS = C_p dT$$

и, следовательно $S_r - S_1 = \int_{T_2}^{T_1} C_p \frac{dT}{T}$ или $S_r - S_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}$

Вторая составляющая отражает изменение энтропии

$$S_1 - S_x = \frac{r}{T_1}.$$

Общее изменение энтропии для всего процесса:

$$S_r - S_{ж} = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{r}{T_1}$$

Из термодинамики известно, что

$$S_r - S_{ж} = AR \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}$$

откуда $AR \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{r}{T_1}$

Из этого уравнения может быть вычислено давление, необходимое для сжижения газа при min затрате работы.

Пример для воздуха: подставив в предыдущее уравнение значения соответствующих величин для воздуха

$$P_1 = 1 \text{ ата};$$

$$T_1 = 293 \text{ }^\circ\text{К};$$

$$T_2 = 80 \text{ }^\circ\text{К};$$

$$r = 47 \text{ ккал/кгс};$$

$$C_p = 0,24 \text{ ккал/кг}^\circ\text{С};$$

$$R = 29,27 \text{ кгем/кгс }^\circ\text{С}, \text{ получим конечное давление } P_2 \approx 500000 \text{ ата!}$$

На практике такого давления достичь трудно и все промышленные установки по отличиям от идеального рабочего цикла работают при давлении обычно в несколько *сот атмосфер*, с затратой большего количества 1 кВт.ч. энергии на сжижение 1 кгс газа.

Реальные циклы отличаются от идеальных тем, что при дросселировании или адиабатическом расширении сжимается не весь газ, а только некоторая его часть.

Несжиженная часть, имеющая низкую температуру, используется для охлаждения вновь введенной порции сжимаемого газа.

Контрольные вопросы

1. Как оценивается экономичность и совершенство метода сжижения газов?
2. Какой вид сжатия газов используется в циклах глубокого охлаждения?
3. Какое тепло отводится с охлаждающей водой?
4. Из каких составляющих складывается тепло Q_2 , отнимаемое при сжижении газа?
5. Как читается второй закон термодинамики?
6. Как определяется минимальная работа сжижения газа?

7. Какому циклу подчиняются циклы глубокого охлаждения газов?
8. Как изменяется энтропия для всего процесса?
9. Чем отличается протекание реальных циклов от идеальных?
10. Как используется в циклах несжиженная часть газа, имеющая низкую температуру?

Рекомендуемая литература

1. Беляков В.Г. Криогенная техника и технология. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 201 с.
2. Барак Р.Ф. Криогенные системы. М.: Агропромиздат, 1989. - 131 с.

ЛЕКЦИЯ 3. Циклы с расширением газа без отдачи внешней работы

План лекции

Простой регенеративный цикл. Тепловой баланс цикла.

Усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под давлением. Расчет цикла.

Усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под высоким давлением и с предварительным охлаждением.

Процесс сжижения газа, основанный на дроссельном эффекте, был впервые разработан для получения жидкого воздуха.

В первых аппаратах использовалось одно дросселирование без совершения внешней работы. В дальнейшем этот метод был значительно усовершенствован, однако принцип остался тем же.

3.1. Простой регенеративный цикл. Тепловой баланс цикла

На рис. 3.1 показана схема и T-S диаграмма простого регенеративного цикла.

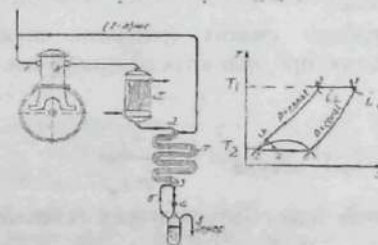


Рис. 3.1. Простой регенеративный цикл

Рассмотрим работу цикла с использованием T-S диаграммы, на которой газ с параметрами P_1 и T_1 всасывается компрессором (К) (точка 1), сжимается в нем до давления P_2 и затем охлаждается в водяном холодильнике Х до начальной температуры T_1 (точка 2).

Далее сжатый газ подвергается изобарическому охлаждению в противоточном теплообменнике Т за счет паров, оставшихся после дросселирования (кривая 2-3).

В точке 3 газ с некоторой температурой T' дросселируется с высокого давления на низкое, охлаждаясь по кривой ($i = const$) (линия 3-4) до температуры T_2 , причем часть его «n» переходит в жидкое состояние.

Соотношение количеств сжиженной части газа «n» и несжиженной (1-n) (если рассуждения относятся к 1 кгс газа) соответствует соотношению отрезков (4-6) и (4-5).

Несжиженная часть газа с температурой T_2 направляется в противоточный теплообменник в точке 3 (изобара 6-1), где и охлаждает новую порцию поступающего газа, нагреваясь при этом до температуры T_1 .

При температуре T_1 состояние газа соответствует первоначальному и поэтому возвратившаяся обратно часть газа вновь засасывается вместе с новыми порциями газа в компрессор.

Тепловой баланс цикла

Составим тепловой баланс, считая, что потери тепла в окружающую среду равны 0. $Q_{потерь} = 0$

Если от 1 кгс газа сжимается часть n, то требуется отнять тепла:

$$Q_2 = n(i_1 - i_x), \text{ кДж}$$

т.е. необходимо затратить такую работу сжатия, которая будет эквивалентна этому количеству тепла.

Эквивалент работы сжатия (разности энтальпий i до и после изотермического сжатия) при принятых обозначениях.

$$i_1 - i_2,$$

тогда $i_1 - i_2 = n(i_1 - i_x)$, откуда $n = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_x}$

или последняя формула может быть получена из теплового баланса

$$1 \cdot i_2 = n \cdot i_x + (1-n) \cdot i_1,$$

т.е. из последней формулы видно, что *холодопроизводительность*

простого регенеративного цикла зависит только от разности энтальпий i_1

расширенного газа и i_2 сжатого газа при его температуре T_1 на входе в противоточный теплообменник.

$i_1 - i_2$ - это тепловое выражение дроссельного эффекта при температуре газа на входе его в теплообменник.

Это значит, что охлаждение газа в теплообменнике перед дросселированием не сказывается на холодопроизводительности установки и влияет лишь на степень понижения температуры.

В действительных условиях сжижаемая часть газа n будет всегда меньше, т.к. имеют место потери холода за счет неполноты теплообмена ΔT_n и потери холода в окружающую среду ΔT_n , с учетом этих потерь получим

$$n = \frac{i_1 - i_2 - \Delta T_n - \Delta T_n}{i_1 - i_x}$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кгс газа, может быть определена по формуле изотермического сжатия:

$$L_{из} = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Практически изотермическое сжатие достичь практически невозможно. Далее определим затраты энергии на сжижение 1 кгс газа.

Обозначим:

$\eta_{из}$ - изотермический к.п.д. компрессора;

$\eta_{мех}$ - механический к.п.д. компрессора

Тогда общий к.п.д. $\eta = \eta_{из} \cdot \eta_{мех}$ и расход энергии на сжатие 1 кгс газа.

$$N = \frac{L_{из}}{3600 \cdot 102 \cdot \eta} \text{ кВтч/кгс}$$

или $N = \frac{RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}{3600 \cdot 102 \cdot \eta} \text{ кВтч/кгс}$ - расход энергии на сжижение 1 кгс газа

$$N_1 = \frac{N}{n} \quad (**)$$

Из формулы (**) видна зависимость расхода энергии на сжижение газа от давления сжатия и температуры: расход энергии уменьшается с увеличением давления в конце сжатия.

Это значит, что количество холода, получаемого в результате дросселирования, примерно прямо пропорционально разности давлений, а

затраченная работа пропорциональна логарифму отношения $\frac{P_2}{P_1}$.

Затраты энергии на сжижение 1 кгс газа будут тем меньше, чем ниже его начальная температура. В соответствии с этими двумя принципами (уменьшение расхода энергии на сжижение с понижением начальной температуры и повышением давления в конце сжатия) были разработаны последующие циклы

3.2. Усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под давлением. Расчет цикла

Такой регенеративный цикл, проводимый без предварительного охлаждения газа, изображен на рис. 3.2.

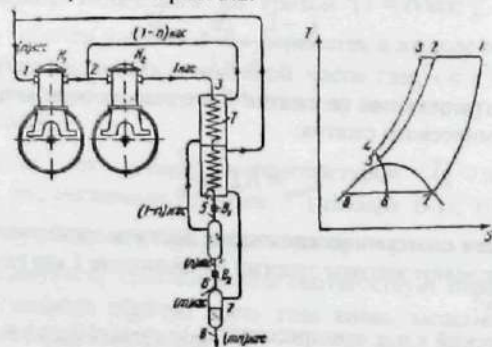


Рис. 3.2. Регенеративный цикл с циркуляцией газа под давлением без предварительного охлаждения

Компрессор низкого давления K_1 засасывает n кгс газа и сжимает его изотермически до среднего давления (изотерма 1-2). В точке 2 к сжатому до среднего давления газу, присоединяется часть его, отработанная в предыдущем цикле $(1-n)$ кгс.

Суммарное количество газа $(n+1-n)$ сжимается во втором компрессоре K_2 до высокого давления (изотерма 2-3) и затем охлаждается в противоточном теплообменнике T (изобара 3-4), тепло отдается газу, движущемуся обратным током.

Охлажденный газ дросселируется через вентиль B_1 с высокого давления на среднее (изэнтальпа 4-5). Часть газа $(1-n)$ направляется в противоточный теплообменник T , где он охлаждает новую порцию газа (изобара 5-2), а затем засасывается вновь в компрессор в точке 2.

Оставшаяся часть газа, проходя через вентиль B_2 , дросселируется второй раз (изэнтальпа 5-6), причем некоторая часть его m (состояние газа характеризуется точкой 8) отводится как готовый продукт, а другая часть его

направляется в противоточный теплообменник, охлаждает новую порцию газа (изобара 7-1) и затем засасывается в компрессор низкого давления.

Далее цикл повторяется.

Расчет цикла

Обозначим величины, характеризующие состояние газа:

а) в начале сжатия в компрессоре низкого давления:

P_1 - давление газа, ата;

T_1 - температура газа, К°;

i_1 - теплосодержание газа, кДж/кгс;

б) в конце сжатия компрессором низкого давления или начале сжатия компрессором высокого давления:

P_2 - давление газа, ата;

i_2 - теплосодержание газа, кДж/кгс;

в) в конце сжатия компрессором высокого давления:

P_3 - давление газа, ата;

i_3 - теплосодержание газа, кДж/кгс.

Обозначим также:

n - часть газа, поступающая на 1-е дросселирование;

m - часть газа, сжижаемая при втором дросселировании;

$i_{ж}$ - теплосодержание жидкости, кДж/кгс.

Если от 1 кгс газа в конечном итоге сжижается часть его, равная $m \cdot n$, то требуется отнять тепла

$$m \cdot n \cdot (i_1 - i_{ж}), \text{ кДж.}$$

В компрессоре низкого давления сжимается n кгс газа и количество тепла, соответствующее примерно эквивалентной работе, произведенной первым компрессором, будет:

$$n \cdot (i_1 - i_2), \text{ кДж.}$$

В компрессоре высокого давления сжимается 1 кгс газа и количество тепла, соответствующее работе второго компрессора, равно:

$$(i_2 - i_3), \text{ кДж.}$$

Т.к. суммарная работа сжатия эквивалентна количеству отнимаемого тепла, т.е.

$$n \cdot m \cdot (i_1 - i_{ж}) = n \cdot (i_1 - i_2) + (i_2 - i_3),$$

$$\text{откуда } m \cdot n = \frac{n \cdot (i_1 - i_2) + (i_2 - i_3)}{(i_1 - i_{ж})} \quad (*)$$

Из последней формулы (*) можно определить количество сжиженного газа, приходящееся на 1 кгс газа, поступившего в компрессор высокого давления.

Если учесть потери холода в окружающую среду Δt_n и потери от неполноты теплообмена Δt_u , тогда

$$m \cdot n = \frac{n \cdot (i_1 - i_2) + (i_2 - i_3) - \Delta t_n - \Delta t_u}{(i_1 - i_{ж})}$$

Работа компрессора низкого давления составляет

$$L_n = \frac{1}{\eta} n R T_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}, \text{ кгсм/кгс}$$

а мощность его

$$N_n = \frac{n \cdot R T_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}{3600 \cdot 102 \eta}, \text{ кгсм/кгс}$$

Суммарная мощность компрессора:

$$N = \frac{R T_1 (n \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} + \ln \frac{P_3}{P_2})}{3600 \cdot 102 \eta}, \text{ кгсм/кгс}$$

Расход энергии на 1 кгс сжиженного газа

$$W = \frac{R T_1 (n \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} + \ln \frac{P_3}{P_2}) (i_1 - i_{ж})}{3600 \cdot 102 \eta [n(i_1 - i_2) + (i_2 - i_3) - \Delta t_n - \Delta t_u]}, \text{ кВтч/кгс}$$

3.3. Усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под высоким давлением и с предварительным охлаждением

Усовершенствование простого регенеративного цикла – введение предварительного охлаждения сжатого газа, поступающего в теплообменник, в специальном аммиачном холодильнике до -30°C или до -50°C .

В отличие от простого цикла в этом случае холодопроизводительность установки определяется разностью теплосодержаний сжатого и расширенного газа при температуре его охлаждения в аммиачном холодильнике.

На рис. 3.3 показана схема и энтропийная диаграмма регенеративного цикла с одновременным применением циркуляции газа под давлением и предварительного аммиачного охлаждения.

Некоторое количество газа засасывается (точка 1) в компрессор низкого давления K_1 и сжимается в нем изотермически от давления P_1 до давления P_2 (изотерма 1-2). В точке 2 к свежему газу присоединяется отработанная часть газа предыдущего цикла.

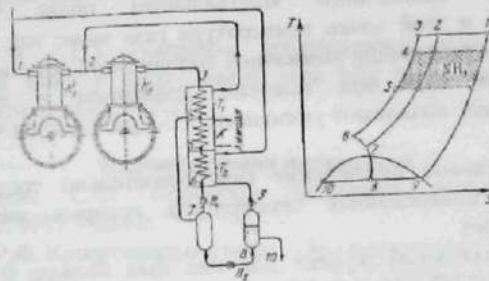


Рис. 3.3. Регенеративный цикл с циркуляцией газа под высоким давлением и с предварительным охлаждением

Газовая смесь с давлением P_2 сжимается в компрессоре высокого давления K_2 до давления P_3 (изотерма 2-3), затем охлаждается в противоточном теплообменнике T_1 отработанным газом предыдущего цикла (до точки 4 по изобаре 3-4).

Далее газ охлаждается при помощи аммиачной холодильной машины X (изобара 4-5). После этого газ вновь охлаждается в теплообменнике T_2 отработанной порцией газа предыдущего цикла (изобара 5-6).

Охлажденный газ дросселируется через вентиль B_1 с высокого давления на среднее (изэнтальпа 6-7). Часть газа направляется в противоточный теплообменник T_1 , где и охлаждает новую порцию газа (изобара 7-2) и затем вновь засасывается в компрессор в точке 2.

Оставшаяся часть газа, проходя через вентиль B_2 дросселируется второй раз (изэнтальпа 1-8), причем некоторая часть его (точка 10) отводится как готовый продукт, а другая направляется в противоточный теплообменник T_2 , охлаждает новую порцию газа (изобара 9-1) и затем засасывается в компрессор низкого давления.

По существу в рассматриваемом цикле используется один теплообменник, в котором свежая порция газа обменивается теплом с отработанной его частью от предыдущего цикла, но этот теплообменник разделен на 2 части.

Первая часть включена перед аммиачным (компрессором) холодильником, а вторая - после него. Это необходимо для того, чтобы более полно использовать запас холода отработанного газа. Если аммиачный холодильник включить до теплообменника, то свежая порция газа, обменивающаяся теплом с отработанной, имела бы при встрече с ней низкую температуру и теплообмен был бы не эффективным.

Включение аммиачного холодильника после теплообменника невозможно, т.к. в этой точке температура газа ниже той, которая может быть достигнута при помощи аммиачной холодильной машины.

Циркуляция газа под высоким давлением и предварительное охлаждение в цикле позволяют уменьшить в 2-3 раза расход энергии на 1 кгс сжимаемого газа.

Предварительное охлаждение газа обязательно тогда, когда надо сжигать газы, инверсионная температура которых ниже комнатной (например, H_2 и He).

Чтобы дроссельный эффект для них был больше 0, необходимо охладить $He < -243^\circ C$, а $H_2 < -73^\circ C$.

Контрольные вопросы

1. Как на T-S диаграмме изображается простой регенеративный цикл?
2. Что входит в состав оборудования простого регенеративного цикла?
3. Тепловой баланс простого регенеративного цикла.
4. От чего зависит холодопроизводительность простого регенеративного цикла?
5. Какие потери холода имеют место в установке простого регенеративного цикла?
6. Как рассчитывается ожиженная доля газа в действительных условиях работы установки простого регенеративного цикла?
7. По какой формуле рассчитывается работа, затрачиваемая на сжатие 1 кгс газа?
8. Из каких элементов состоит установка усовершенствованного регенеративного цикла с циркуляцией газа под давлением?
9. Как на T-S диаграмме изображается усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под давлением?
10. Как рассчитывается удельный расход энергии на 1 кгс газа для усовершенствованного регенеративного цикла с циркуляцией газа под давлением?
11. Как рассчитывается суммарная мощность компрессора усовершенствованного регенеративного цикла с циркуляцией газа под давлением?

12. В чем заключается усовершенствование простого регенеративного цикла в цикле с циркуляцией газа под высоким давлением и с предварительным охлаждением?

13. Из каких элементов состоит установка регенеративного цикла с одновременным применением циркуляции газа под давлением и предварительного аммиачного охлаждения?

14. В каком месте установки должен быть аммиачный холодильник и почему?

15. Как в T-S диаграмме изображается усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под высоким давлением и с предварительным охлаждением?

Рекомендуемая литература

1. Буднева С.Ф. Процессы глубокого охлаждения. - М.: Госэнергоиздат, 1977. - 230 с.
2. Барак Р.Ф. Криогенные системы. - М.: Агропромиздат, 1989. - 131 с.

ЛЕКЦИЯ 4. Циклы с расширением газа и отдачей внешней работы

План лекции

- 4.1. Цикл среднего давления с расширительной машиной и однократным расширением газа (Цикл Клода)
- 4.2. Расчет цикла Клода

4.1. Цикл среднего давления с расширительной машиной и однократным расширением газа (Цикл Клода)

Простейшей схемой сжижения газов по циклу среднего давления с расширительной машиной является схема с однократным расширением газа (рис.4.1).

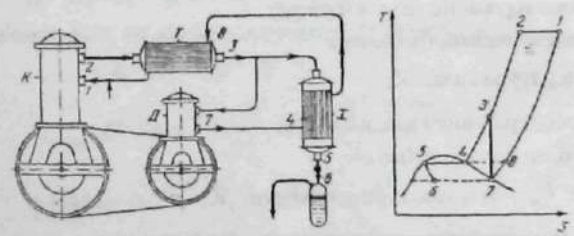


Рис. 4.1. Цикл среднего давления с расширительной машиной и однократным расширением газа

Газ всасывается компрессором K , сжимается в нем изотермически от давления P_1 до давления P_2 (линия 1-2) и охлаждается в противоточном теплообменнике T (изобара 2-3).

Сжатый охлажденный газ на выходе из теплообменника разделяется на две части. Одна часть поступает в холодильник X , где происходит полная конденсация газа (линия 3-4-5) и в расширительном вентиле B (в точке 6) расширяется до давления P_1 .

Другая часть сжатого газа направляется в расширительную машину – детандер D , где газ адиабатически расширяется (линия 3-7) отдает внешнюю работу, отводимую на вал компрессора K , и понижает при этом свою температуру.

Охлажденная часть газа направляется в холодильник X , где сжижает протекающую в нем другую часть газа. Газ из холодильника X поступает в теплообменник T , где и охлаждает новую порцию сжатого газа, причем его температура повышается в идеальном случае до первоначальной (линия 7-8-1).

4.2. Расчет цикла Клода

Обозначим величины, характеризующие состояние газа

а) в начале сжатия:

P_1 - давление газа, ата;

T_1 - температура газа, °К;

i_1 - энтальпия (теплосодержание) газа, кДж/кгс (ккал/кгс);

б) в конце сжатия:

P_2 - давление газа, ата;

T_2 - температура газа, °К;

i_2 - теплосодержание газа, кДж/кгс;

в) после теплообменника:

T_3 - температура газа, °К;

i_3 - теплосодержание газа, кДж/кгс;

г) после холодильника:

$T_4 = T_5 = T_{ж}$ - температура жидкости, °К;

$i_5 = i_{ж}$ - теплосодержание жидкости, кДж/кгс ;

д) после расширения в расширительной машине:

P_7 - давление газа, ата ;

T_7 - температура газа, °К;

i_7 - теплосодержание газа, кДж/кгс ;

е) на выходе из холодильника:

T_8 - температура газа, °К;

i_8 - теплосодержание газа, кДж/кгс ;

ж) на выходе из теплообменника (также, как и в начале сжатия)

T_1 - температура газа, °К;

i_1 - теплосодержание газа, кДж/кгс .

Кроме того, обозначим:

n - сжиженная часть газа, приходящаяся на 1 кгс сжимаемого газа, кгс;

C_p - теплоемкость газа, кДж/кг °С;

r - теплота испарения газа, кДж/кгс.

При принятых обозначениях 1 кгс засасываемого газа после теплообменника распределяется на часть n - сжижаемую в холодильнике X , и часть $(1-n)$, направляющуюся в расширительную машину D .

Количество тепла, отнимаемое от 1 кгс сжатого в компрессоре газа при прохождении его через теплообменник

$$i_2 - i_3 = C_p (T_2 - T_3).$$

Количество тепла, отнимаемое от сжижаемой части газа в холодильнике

$$n \cdot (i_3 - i_{ж}) = n[(T_3 - T_{ж})_c + r].$$

Количество тепла, воспринимаемое в холодильнике газом, поступающим из расширительной машины

$$(1-n) \cdot (i_8 - i_5) = (1-n) \cdot C_p \cdot (T_8 - T_7).$$

Количество тепла, воспринимаемое газом при прохождении его через теплообменник (после холодильника)

$$(1-n) \cdot (i_1 - i_8) = (1-n) \cdot C_p \cdot (T_1 - T_8).$$

Т.к. цикл замкнутый, то должно выполняться равенство:

$$i_2 - i_3 = (1-n) \cdot (i_1 - i_8)$$

$$\text{или } U - n = \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_8} = \frac{C_p (T_2 - T_3)}{C_p (T_1 - T_8)},$$

$$\text{а также } n \cdot (i_3 - i_{ж}) = (1-n) \cdot (i_8 - i_7),$$

$$\text{откуда } \frac{n}{1-n} = \frac{i_8 - i_7}{i_3 - i_{ж}} = \frac{C_p (T_8 - T_7)}{C_p (T_3 - T_{ж})}.$$

По последней формуле рассчитываем сжиженную долю газа n .

Работу, требуемую для сжатия, и расход энергии на 1 кгс сжиженного газа можно определить по работе, которая отдается расширительной машиной компрессору.

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кгс газа, определяется из равенства:

$$L' = RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}, \text{ кгсм/кгс}$$

а работа, совершаемая в расширительной машине, определится как:

$$L'' = \frac{C_p}{A} (T_8 - T_7) \cdot (1 - n), \text{ кгсм/кгс}$$

где $A = \frac{1}{427}$ кал/кгсм - тепловой эквивалент работы.

Суммарная затрата работы с учетом к.п.д.

$$L = L' - L'' = \left[RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} - \frac{C_p}{A} (T_8 - T_7) \cdot (1 - n) \right] \frac{1}{\eta} \text{ кгсм/кгс.}$$

Таким образом, расход энергии на 1 кгс сжиженного газа:

$$W = \frac{RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} - \frac{C_p}{A} (T_8 - T_7) \cdot (1 - n)}{3600 \cdot 102 \cdot n \cdot \eta}, \text{ кВт.ч/кгс}$$

В данном цикле жидкий газ получается при давлении P_2 и для приведения его к атмосферному давлению пришлось бы жидкость, полученную в холодильнике X , пропустить через дросселирующий вентиль.

В этом случае произошло бы испарение части жидкости

$$m = \frac{i_{ж} - i'_{ж}}{r},$$

где m - количество испаряющейся жидкости на 1 кгс жидкости, полученной в холодильнике, кг;

$i_{ж}$ - теплосодержание жидкости до дросселирования, кДж/кгс;

$i'_{ж}$ - теплосодержание жидкости после дросселирования, кДж/кгс;

r - теплота испарения при атмосферном давлении, кДж/кгс

Следует заметить, что расход энергии на 1 кгс сжиженного газа в данном случае увеличится. Для использования холода паров, образующихся при дросселировании жидкости, их присоединяют к газу, выходящему из расширительной машины.

Данный теоретический расчет энергии и холодопроизводительности цикла является примерным, так как трудно определить расчетом перепад тепла в расширительной машине.

В практике цикл среднего давления с расширительной машиной имеет примерно такие же показатели расхода энергии, что и усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под давлением и применением аммиачного охлаждения.

Существенным недостатком данного цикла являются плохие условия работы расширительной машины (большое вредное пространство, трудность смазки, плохое использование внешней работы и т.д.).

Так как расширительная машина работает при очень низких температурах, то это затрудняет ее конструирование и изготовление, кроме того, она работает с небольшим к.п.д.

Работа этой машины может быть значительно улучшена в случае применения двухкратного расширения.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит установка цикла среднего давления с расширительной машиной и однократным расширением газа?
2. Изображение цикла в координатах T-S диаграммы.
3. Как рассчитывается ожиженная доля газа в цикле?
4. Как рассчитывается холодопроизводительность цикла?
5. По какой формуле определяется расход энергии на 1 кгс сжиженного газа?
6. Какие недостатки имеет цикл в реальных условиях его работы?
7. Какая доля сжатого газа направляется в детандер?
8. Почему детандер имеет низкий к.п.д. работы?
9. Какие процессы происходят в детандере?
10. Какое охлаждение сжатого в компрессоре газа происходит в противоточном теплообменнике?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Раздел Глубокое охлаждение. - М.: Госхимиздат, 1983. - 762 с.
2. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. Изд. 4-е М., -Л.: Советская наука. Ч.1, 1977. - 392 с.

ЛЕКЦИЯ 5. Комбинированные циклы

План лекции

- 5.1. Цикл высокого давления с расширительной машиной и однократным дросселированием (Цикл Гейландта). Расчет цикла Гейландта
- 5.2. Цикл низкого давления с турбодетандером (Цикл Капицы). Основные расчетные зависимости цикла.
- 5.3. Сравнительный анализ методов сжижения газов.

5.1. Цикл высокого давления с расширительной машиной и однократным дросселированием (Цикл Гейландта). Расчет цикла Гейландта

Отмеченных недостатков цикла, рассмотренного в лекции 4, лишен цикл высокого давления с расширительной машиной, представленный на рис. 5.1. В нем газ расширяется при комнатной температуре.

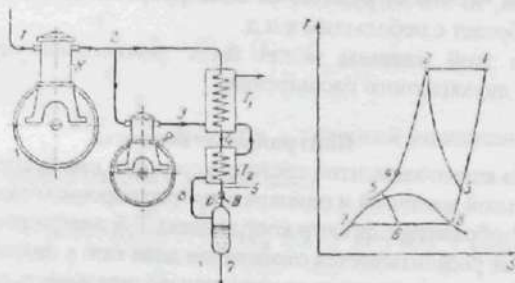


Рис. 5.1. Цикл высокого давления с расширительной машиной

Этот цикл – комбинация регенеративных циклов и цикла среднего давления с расширительной машиной.

Его можно рассматривать как усовершенствованный регенеративный цикл, в котором предварительное аммиачное охлаждение заменено охлаждением самим сжижаемым газом (часть газа расширяется с отдачей внешней работы).

В цикле высокого давления с расширительной машиной основным источником холода является расширительная машина, в которой воздух, поступающий при обычной комнатной температуре, расширяется с 200 до 1 ата.

В цикле газ всасывается в компрессор K и сжимается в нем до 200 ата (линия 1-2). Выйдя из компрессора, сжатый газ делится на примерно равные две части.

Одна часть поступает в расширительную машину P , в которой газ расширяется до 1 ата (линия 2-3).

Теоретически расширение газа в расширительной машине должно протекать при постоянной энтропии $S = const$ – по вертикали, однако, вследствие притока тепла извне и тепла трения в цилиндре линия 2-3 – наклонна.

После расширения газ поступает из машины в основной теплообменник T_1 , в котором охлаждает вторую часть газа, поступающего из компрессора (линия 3-1).

Вторая часть газа охлаждается сначала в теплообменнике T_1 , отдавая тепло газу, поступающему из расширительной машины P (линия 2-4) и

затем в теплообменнике T_2 (линия 4-5) при помощи паров, образующихся после дросселирования; затем газ дросселируется в вентиле B до 1 ата (линия 5-6).

Сжиженная часть собирается в сосуде и удаляется из него в виде готового продукта (точка 7), несжиженная же часть газа поступает в теплообменник T_2 , из него – в теплообменник T_1 и затем удаляется в окружающую атмосферу (линии 8-3 и 3-1).

Холодопроизводительность цикла высокого давления с расширительной машиной и величину сжижаемой части газа можно определить также, как и для цикла среднего давления.

Расчет Цикла Гейландта

Обозначим величины, характеризующие состояние газа.

а) при входе в компрессор:

P_1 – давление газа, ата;

T_1 – температура газа, °К;

i_1 – теплосодержание газа, кДж/кгс;

б) после сжатия в компрессоре:

P_2 – давление газа, ата;

T_2 – температура газа, °К;

i_2 – теплосодержание газа, кДж/кгс;

в) после расширения в расширительной машине:

T_3 – температура газа, °К;

i_3 – теплосодержание газа, кДж/кгс.

Обозначим также:

$i_{ж}$ – теплосодержание жидкого газа, кДж/кгс;

n – количество газа, поступающего в расширительную машину в кгс на 1 кгс газа, поступающего в компрессор;

m – количество сжижающего газа в кгс на 1 кгс газа, поступающего в компрессор.

Для сжижения m кгс газа необходимо затратить количество холода (в кДж):

$$m \cdot (i_1 - i_{ж}).$$

Это количество холода получается при расширении в расширительной машине и при изотермическом сжатии газа.

Количество холода, получаемое при расширении в машине, составляет:

$$n \cdot (i_2 - i_3),$$

а при сжатии газа в компрессоре:

$$(i_1 - i_2), \text{ кДж.}$$

Если потерь холода нет, то теоретически должно соблюдаться равенство:

$$m \cdot (i_1 - i_{ж}) = n \cdot (i_2 - i_3) + (i_1 - i_2),$$

$$\text{откуда } m = \frac{n \cdot (i_2 - i_3) + (i_1 - i_2)}{(i_1 - i_{ж})},$$

т.е. чем больше величина n , тем больше значение m , но если $n = 1$, то весь воздух проходит через расширительную машину и фактически холодопроизводительность $Q_0 = 0$, т.к. этот холод не используется.

Поэтому необходимо, чтобы минимальная часть воздуха не проходила бы через расширительную машину, а охлаждалась бы в теплообменниках и дросселировала.

Обычно 40÷50% газа направляется в расширительную машину и 50÷40% - на дросселирование.

Для определения расхода энергии на получение 1 кгс жидкости определим работу (кгсм/кгс), совершаемую в цикле:

а) работа сжатия в компрессоре:

$$L_k = RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1};$$

б) работа расширительной машины:

$$L_{p.m.} = \frac{C_p}{A} (T_2 - T_3) \cdot n;$$

Суммарная работа с учетом к.п.д.

$$L = L_k - L_{p.m.} = [RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} - \frac{C_p}{A} (T_2 - T_3) \cdot n] \cdot \frac{1}{\eta}, \text{ кгсм/кгс}$$

Расход энергии на получение 1 кгс жидкости:

$$W = \frac{[RT_1 \frac{P_2}{P_1} - \frac{C_p}{A} (T_2 - T_3) \cdot n]}{3600 \cdot 102 \cdot m \cdot \eta},$$

где C_p - теплоемкость газа при постоянном давлении, кДж/кгс °С

5.2. Цикл низкого давления с турбодетандером (Цикл Капицы)

Повышение эффективности расширения газа в детандере заключается в использовании турбодетандеров вместо поршневых машин.

Академиком П.Л. Капицей был создан одноступенчатый турбодетандер, обладающий при низких температурах высоким коэффициентом полезного действия ($\eta_{дет} = 0,8$)

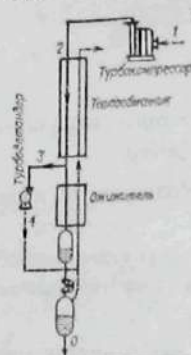


Рис. 5.2. Цикл низкого давления с турбодетандером

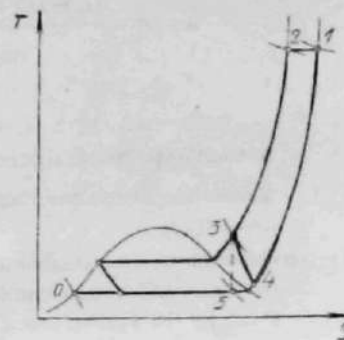


Рис. 5.3. T-S диаграмма цикла низкого давления с турбодетандером

Применение этого турбодетандера позволило осуществить сжижение газа (воздуха) при давлении, не превышающем $59 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$ (6 ата). При таком давлении стало возможным использовать в качестве теплообменных устройств для газов регенеративные теплообменники, отличающиеся малой недореконверсией холода и не требующие предварительной очистки воздуха от двуокси углерода и влаги.

Кроме того, применение в цикле только турбомашин позволяет достигать очень больших производительностей в одном агрегате.

В цикле низкого давления газ сжимается в турбокомпрессоре 1 (по изотерме 1-2) примерно до 6 ата (при сжижении воздуха), после чего охлаждается при том же давлении в регенераторе 3. На выходе из теплообменника поток газа делится на 2 части. Меньшая часть газа направляется в регенератор 4, где охлаждается до более низкой температуры, при которой происходит сжижение газа.

Процесс охлаждения и сжижения газа изображается линией (3-5).

Сжиженный газ проходит дроссель 5, в котором расширяется до первоначального давления (линия 5-6).

Большая часть газа после регенератора 3 поступает в турбодетандер 4 и расширяясь (линия 3-4), совершает внешнюю работу. Выходящий из турбодетандера охлажденный газ смешивается с той частью газа, которая после процесса дросселирования остается несжиженной (точка 4).

Смесь газов проходит последовательно регенераторы 4 и 3, где отнимает тепло от сжатого в турбокомпрессоре газа и нагревается до первоначальной температуры (изобара 4-1).

Основные расчетные зависимости цикла

1. Ожижаемая доля воздуха рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{(i_1 - i_2) + (1 - a \cdot y) \cdot (i_3 - i_4) - q_{пот}}{i_1 - i_{ж}}$$

где i_1, i_2 - удельные энтальпии расширенного и сжатого воздуха при температуре входа в основной теплообменник, Дж/кгс;

i_3, i_4 - удельные энтальпии сжатого воздуха перед турбодетандером и после него, Дж/кгс;

a - коэффициент, учитывающий испарение при дросселировании жидкости от давления конденсации до атмосферного давления (при давлении $P = 5,89 \cdot 10^5 \text{ Па} = 6 \text{ ата}$, $a = 1,25$);

$q_{пот}$ - суммарные потери от недорекуперации и в окружающую среду, Дж/кг.

2. Для воздуха, расширяющегося в турбодетандере, принимается:

$$i_3 - i_4 = 0,8 \Delta i_{из} = 0,8 \cdot (i_3 - i_5),$$

где i_5 - удельная энтальпия воздуха при давлении после детандера и при той же энтропии, что и i_3 , Дж/кгс.

3. Количество воздуха (кг/г), проходящего через турбодетандер:

$$G_a = \frac{3600 \cdot N}{\Delta i_g}$$

где N - мощность отдаваемая турбодетандером, кВт;

Δi_g - действительное теплопадение в турбодетандере, Дж/кгс

$$\Delta i_g = (i_1 - i_2).$$

4. Термодинамический к.п.д. детандера:

$$\eta = \frac{\Delta i_g}{\Delta i_{из}}$$

где $\Delta i_{из}$ - изэнтропическое теплопадение в турбодетандере, Дж/кгс.

5.3. Сравнительный анализ методов сжижения газов

Оценка методов ведется по:

- удельному расходу энергии;
- величине к.п.д. (по сравнению с идеальным циклом);

- по количеству сжижаемого газа на 1 кгс газа поступающего в компрессор.

Циклы	Сжижаемая часть газа	Удельный расход энергии, кВт.ч. на 1 кг сжиженного газа	К.п.д. по сравнению с ид. циклом, %
1. Простой регенеративный ($P_2 = 200 \text{ ата}$)	0,086	2,47	7,3
2. Усовершенствованный регенеративный с циркуляцией газа под давлением ($P_3 = 200 \text{ ата}$; $P_2 = 50 \text{ ата}$; $n = 0,2$)	0,062	1,35	13,9
3. Усовершенствованный регенеративный с циркуляцией газа под давлением ($P_3 = 200 \text{ ата}$; $P_2 = 50 \text{ ата}$; $\Pi = 0,35$) и с предварительным охлаждением (до $-50 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,162	0,7	26,7
4. Среднего давления с расширительной машиной ($P_2 = 25 \text{ ата}$)	0,115	0,74	25,0
5. Высокого давления с расширительной машиной	0,240	0,66	28,2

Наиболее экономичный - (5). При получении газообразных O_2 и N_2 сжижение всего перерабатываемого воздуха необходимо лишь для ректификации жидкого воздуха.

Холодопроизводительность цикла определяется потерями холода в окружающую среду и неполнотой теплообмена (недорекуперацией).

Величина потерь холода в окружающую среду зависит от размеров установки. Чем больше установка, тем меньше потерь на 1 кгс перерабатываемого воздуха.

В связи с этим, изменяется и относительная эффективность холодильных циклов.

Для циклов, перерабатывающих небольшое количество воздуха ($\approx 5000 \text{ м}^3/\text{ч}$) с получением газообразного кислорода и азота, весьма экономичным по расходу энергии является регенеративный цикл с аммиачным охлаждением и двумя давлениями.

Для установок, перерабатывающих большое количество воздуха, более экономичными оказываются циклы, в которых используется расширение воздуха низкого давления в турбодетандере, при этом начальное давление воздуха (6 ата) определяется условиями его ректификации.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой цикл Гейландта?
2. Какие элементы входят в состав установки, работающей по циклу высокого давления с расширительной машиной?
3. Как в диаграмме T-S изображается цикл Гейландта?
4. К чему сводится расчет цикла Гейландта?
5. По каким показателям проводится сравнительный анализ методов сжижения газов?
6. В чем состоит суть цикла низкого давления с турбодетандером (цикл Капицы)?
7. Из каких элементов состоит установка, работающая по циклу низкого давления с турбодетандером?
8. Изображение цикла Капицы в диаграмме T-S.
9. За счет чего повышается эффективность расширения газа в детандере по циклу Капицы?
10. Как проводится расчет основных зависимостей цикла?

Рекомендуемая литература

1. Беляков В.Г. Криогенная техника и технология. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 201с.
2. Барак Р.Ф. Криогенные системы. – М.: Агропромиздат, 1989. – 131с.

ЛЕКЦИЯ 6. Методы разделения газовых смесей

План лекции

- 6.1. Фракционированная конденсация
- 6.2. Ректификация: разделительный аппарат одинарной ректификации; разделительный аппарат двойной ректификации

6.1. Фракционированная конденсация

Всеми вышеуказанными способами сжижения газов можно получать в чистом виде компоненты газовых смесей. Методы разделения газовых смесей с применением глубокого охлаждения выбирают в зависимости от разности температур кипения отдельных компонентов смеси. Но во всех случаях газовая смесь подвергается постепенному глубокому охлаждению.

При этом возможны два случая:

- 1) из газовой смеси конденсируется только 1 компонент или группа, в то время как остальные компоненты смеси остаются газообразными;
 - 2) конденсируются все составные части смеси и дальнейшее их разделение производится в жидком состоянии.
- Для первого случая используется фракционированная конденсация, а для второго – фракционированная перегонка или ректификация.

Фракционированная конденсация

Типичным примером разделения газов фракционированной конденсацией является выделение чистого водорода из водяного газа (водород, окись углерода и азот).

В этом случае оказывается возможным, охладив газовую смесь до определенной температуры, сконденсировать окись углерода и азот и таким образом легко отделить газовую фазу (водород) от жидкой (окись углерода и азот).

Не останавливаясь подробно на описании подобных методов разделения, так как они являются лишь видоизменениями описанных методов сжижения газов, рассмотрим только схему установки для получения чистого водорода из водяного газа (рис. 6.1).

Водяной газ, подвергнутый предварительной очистке от примесей сероводорода, углекислоты, водяных паров и др., сжимается компрессором (на схеме не показан), после чего по трубопроводу 1 поступает в противоточные теплообменники 2 и 3, первый из которых охлаждается испарившейся окисью углерода, а второй – расширившимся чистым водородом.

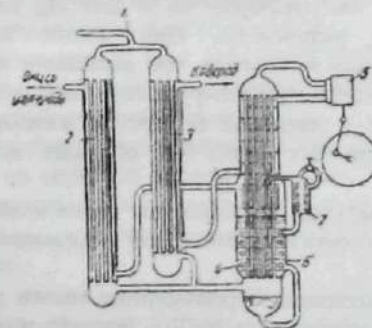


Рис. 6.1. Схема получения водорода из водяного газа:

- 1 – трубопровод для подачи водяного газа; 2,3 – противоточный теплообменник;
- 4 – разделительный аппарат; 5 – расширительная машина; 6,7 – змеевики

Пройдя эти теплообменники, водяной газ поступает в трубчатку аппарата 4, где в нижней части он охлаждается, отдавая тепло на испарение окиси углерода в межтрубном пространстве, а в верхней части охлаждается

за счет холода, полученного в результате расширения водорода в расширительной машине 5.

То количество холода, которое получается в аппарате 4 при испарении окиси углерода и расширении сжатого водорода, оказывается достаточным для того, чтобы сконденсировать окись углерода и азот, поступающие с водяным газом из теплообменников.

Несжиженный в этих установках водород, пройдя через трубчатку аппарата 4 и расширительную машину 5, вновь возвращается в аппарат 4, но уже сильно охлажденный.

В аппарате 4 водород проходит по межтрубному пространству, охлаждает новую порцию газа, протекающего по трубам и затем поступает в теплообменник 3, где отдает остаток холода вновь нагнетаемой порции газа.

Как готовый продукт, почти свободный от примесей, водород выходит из межтрубного пространства теплообменника 3. Сжиженные в трубчатке аппарата 4 примеси (CO и N_2) стекают вниз и собираются в нижней части аппарата, откуда они через змеевики 6 и 7 и расширительный вентиль попадают в межтрубное пространство нижней части аппарата 4, кипят при атмосферном давлении и охлаждают при этом водяной газ, протекающий по трубчатке.

После испарения они поступают в межтрубное пространство теплообменника 2, отдают новой порции газа имеющийся запас холода и удаляются из установки.

6.2. Ректификация

Разделительный аппарат одинарной ректификации

Такие газы, как кислород O_2 и азот N_2 , не могут быть разделены описанной выше установкой. Они имеют приблизительно близкие температуры кипения и поэтому при сжижении смеси кислорода и азота (воздуха) одновременно конденсируются в оба компонента.

Жидкие азот и кислород полностью взаимно растворимы в любых отношениях, причем их смесь не обладает постоянной температурой кипения.

Более легколетучим компонентом смеси является азот, поэтому пары всегда будут более богаты азотом, чем находящаяся с ними в равновесии жидкая смесь.

Полное их разделение производится только ректификацией. Отличие ректификации сжиженных газов от ректификации обычных жидкостей заключается в том, что процесс проводится при очень низких температурах и продукты ректификации получаются в виде газов.

Каждая установка работает по схеме: сжатый компрессором воздух охлаждается в теплообменнике при помощи отходящих продуктов разделения. Охлажденный в теплообменнике воздух после дросселирования поступает в виде жидкости в ректификационную колонну, где и происходит

разделение его на кислород и азот. Для разделения воздуха применяют разделительные аппараты одинарной и двойной ректификации.

Разделительный аппарат одинарной ректификации (рис. 6.2) позволяет получать чистый кислород и загрязненный им ($7 \div 10\%$) азот.

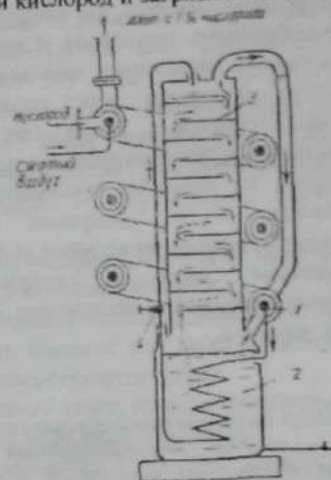


Рис. 6.2. Разделительный аппарат одинарной ректификации
1 – противоточный теплообменник; 2 – змеевик; 3 – ректификационная колонна;
4 – расширительный вентиль

Сжатый воздух поступает из компрессора во внутреннюю трубу противоточного теплообменника 1, охлаждается, используя запас холода отходящих кислорода и азота, и направляется в змеевик 2, находящийся в испарителе нижней части колонны 3.

Здесь он конденсируется за счет испарения жидкости, пары которой, представляющие собой практически чистый кислород, отводятся из установки по средней трубе теплообменника.

Сконденсировавшийся воздух передавливается через расширительный вентиль 4 и стекает на верхнюю тарелку колонны. При стекании его по тарелкам вниз из жидкости испаряется азот, взамен чего из паров, поднимающихся снизу, конденсируется кислород и таким образом происходит разделение.

Получающийся сверху колонны азот, содержащий $7 \div 10\%$ O_2 , отводится наружу через внешнюю трубу теплообменника 1, при этом он отдает избыток своего холода, так же как и кислород, испаряющийся внизу колонны, сжатому воздуху, поступающему из компрессора.

Существенный недостаток одинарной ректификации заключается в том, что полезно используется только $2/3$ кислорода, сжатого в компрессоре, а $1/3$ уходит с азотом, загрязняя последний.

Поэтому для разделения воздуха применяются разделительные аппараты двойной ректификации.

Разделительный аппарат двойной ректификации

На рис. 6.3 приведена схема двухколонного разделительного аппарата двойной ректификации для разделения воздуха на кислород и азот и получения газообразного кислорода. Сжатый и охлажденный до состояния насыщения или даже частично сжиженный воздух поступает через трубку в змеевик 6, где конденсируется. Тепло от воздуха отнимается жидкостью, испаряющейся в испарителе 7. Сжиженный воздух из змеевика проходит через расширительный вентиль 5 и поступает в первую (нижнюю) ректификационную колонну А. В колонне он стекает по тарелкам вниз и соприкасается с парами, образующимися в испарителе 7, обогащаясь при этом кислородом.

Рис. 6.3. Разделительный аппарат двойной ректификации:
А - нижняя ректификационная колонна; Б - верхняя ректификационная колонна; В - конденсатор; 1 - трубки конденсатора; 2 - карманы конденсатора; 3 - азотный расширительный вентиль; 4 - кислородный расширительный вентиль; 5 - воздушный расширительный вентиль; 6 - змеевик; 7 - испаритель.

Попадая в конце концов в испаритель в виде жидкости, обогащенный кислородом до содержания 40-60% O_2 , он частично испаряется вследствие теплообмена с воздухом, проходящим через змеевик 6. Образовавшиеся пары поднимаются вверх, промываются стекающей вниз жидкостью и обогащаются азотом.

Пары азота с содержанием 94-96% N_2 поступают в трубки конденсатора, где сжижаются за счет испарения кислорода, стекающего из верхней ректификационной колонны Б и собирающегося в межтрубном пространстве конденсатора. Около половины сконденсировавшегося азота стекает вниз по тарелкам первой колонны для более полной очистки кислорода от азота, а другая половина, улавливаемая в карманах 2, проходит через расширительный вентиль 3 и попадает на верхнюю тарелку колонны Б.

В колонну Б поступает и жидкость из испарителя 7, представляющая собой приблизительно 40% - ый кислород. Она подается на среднюю тарелку верхней колонны (пройдя через расширительный вентиль 4). Оба потока жидкости стекают по тарелкам верхней колонны, обогащаясь кислородом, и в виде чистого кислорода собираются в межтрубном пространстве В.

Воспринимая теплоту конденсации азота, сжижающегося в трубках конденсатора В, жидкий кислород в межтрубном пространстве испаряется. Часть паров кислорода отводится как готовый продукт через трубку из аппарата к теплообменнику, где отдает холод воздуху, поступающему на разделение. Остальная, большая часть паров кислорода проходит тарелки

верхней колонны и вступает во взаимодействие со стекающей жидкостью. В результате пары превращаются в почти чистый азот, который отводится по трубке из аппарата к теплообменнику, где, так же как и кислород, отдает холод воздуху, поступающему на разделение.

В верхней колонне давление определяется сопротивлением теплообменника и равно 1,4-1,5 ата. Давление в нижней колонне поддерживается равным 5-6 ата для того, чтобы температура конденсирующегося в трубках 1 конденсатора азота (низкокипящий компонент) была на 2-3° выше температуры кипящего в межтрубном пространстве конденсатора кислорода (высококипящий компонент).

Воздух, поступающий на разделение, охлаждается продуктами разделения.

Получаемый N_2 и O_2 содержат некоторое количество аргона и других газов, которые находятся в исходном воздухе.

Для повышения степени чистоты конечных продуктов разделения приходится удалять часть паров с той тарелки колонны А, на которой в наибольшем количестве накапливается аргон.

Дальнейшее разделение газов происходит путем низкотемпературной ректификации в отдельных колонных аппаратах.

Из верхней части колонны 2 выводят пары азота N_2 , содержащего 99,8÷99,9% N_2 , снизу колонны 1 - технический жидкий кислород O_2 (99,3% O_2).

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы разделения газовых смесей?
2. В каких случаях применяется фракционированная конденсация?
3. Для разделения каких газовых смесей применяется одинарная разделительная ректификация?
4. В каких случаях используется разделительная двойная ректификация?
5. Устройство и работа установки разделительной одинарной ректификации.
6. Из каких элементов состоит и как работает установка фракционированной конденсации?
7. Из каких элементов состоит и как работает разделительный аппарат двойной ректификации?
8. Какая степень очистки отводящихся паров достигается в установке фракционированной конденсации?
9. Какая степень очистки отводящих паров N_2 и O_2 достигается в разделительном аппарате двойной ректификации?

Рекомендуемая литература

1. Григорьев В.О. Теплообменные аппараты криогенной техники. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 258 с.
2. Усюкин Н.П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 310 с.

ЛЕКЦИЯ 7. Аппараты контактного замораживания.

Иммерсионные аппараты

План лекции

7.1. Классификация криогенных аппаратов

7.2. Иммерсионные аппараты: иммерсионный аппарат с зоной предварительного охлаждения продуктов; иммерсионный аппарат с погружением продуктов в ванну с жидким азотом

В аппаратах контактного замораживания пищевых продуктов происходит непосредственный интенсивный отвод тепла от замораживаемого продукта к теплоотводящей среде.

В качестве теплоотводящих сред используются:

- криогенные жидкости – жидкий азот и воздух;
- углекислота;
- фреон – 12, прошедший специальную химическую очистку;
- хладоноситель – водный раствор хлористого натрия.

При непосредственном контакте пищевого продукта с теплоотводящей средой, она не должна вызывать нежелательного ухудшения качества замороженного продукта.

Следует отметить, что стоимость замораживания пищевых продуктов в контактных аппаратах с криогенной жидкостью выше, чем в воздушных и плиточных морозильных аппаратах.

В зависимости от вида теплоотводящей среды, которую применяют для холодильной обработки пищевых продуктов, аппараты контактного замораживания бывают:

- криогенные;
- углекислотные;
- фреоновые;
- аппараты для замораживания продуктов хладоносителями.

7.1. Классификация криогенных аппаратов

В криогенных аппаратах в качестве теплоотводящей среды обычно применяется *жидкий азот*, а иногда и *жидкий воздух*.

При замораживании в этих аппаратах продукт погружается в жидкий азот или орошается им.

По этому признаку криогенные аппараты можно классифицировать на:

- иммерсионные (погружение продуктов в ванну с жидким азотом);
- аппараты с распылением жидкого агента в грузовом отсеке.

7.2. Иммерсионные аппараты

Они состоят из изолированной ванны, в которой находится жидкий азот и конвейера для перемещения замораживаемого продукта в аппарате.
Достоинства:

- высокая интенсивность замораживания;
- компактность;
- простота устройства

Недостатки:

- трудность регулирования температуры замораживаемого продукта, который имеет неодинаковые размеры и форму;
- большой удельный расход жидкого азота (2 кгс на 1 кг продукта)

Иммерсионный аппарат с зоной предварительного охлаждения продуктов

Применяется для замораживания продуктов, упакованных в пачки (рис.7.1).

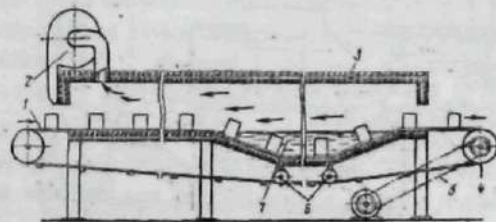


Рис. 7.1. Иммерсионный аппарат с зоной предварительного охлаждения продуктов
1 – грузовой конвейер; 2 – вытяжной вентилятор; 3 – изолированный контур;
4 – барабан; 5 – цепная передача; 6 – направляющие рамки; 7 – ванна с жидким азотом

Продукт, который необходимо заморозить, грузовым конвейером направляется в грузовой отсек, состоящий из зоны предварительного охлаждения продукта длиной $\ell = 5000$ мм и иммерсионной зоны длиной $\ell = 2500$ мм.

В зоне предварительного охлаждения продукт обдувается газообразным азотом, охлаждается и подмораживается. Затем медленно погружается в ванну с жидким азотом глубиной $h = 550$ мм, глубина азота 300–400 мм.

Из ванны замороженный продукт направляется к разгрузочному окну, через которое он удаляется из грузового отсека аппарата.

Движение газообразного азота в зоне предварительного охлаждения продукта производится вытяжным вентилятором, установленным на входном конце аппарата.

Выходящий из вентилятора газообразный азот создает газовую завесу у разгрузочного окна аппарата, что уменьшает теплоприток в грузовой отсек.

В аппарате предусмотрены 2 вытяжных вентилятора, работающих попеременно: один работает, другой обогревается теплым воздухом.

Техническая характеристика:

производительность, кг/ч	300
емкость, кг	60÷80
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин.	10÷15

Иммерсионный аппарат с погружением продуктов в ванну с жидким азотом

Такие аппараты (рис.7.2) устанавливаются непосредственно за упаковочными автоматами и состоят: из 2-х грузовых конвейеров, ванны с жидким азотом, загрузочного и разгрузочного конвейеров, вытяжных трубопроводов для газообразного азота, привода и изолированного контура.

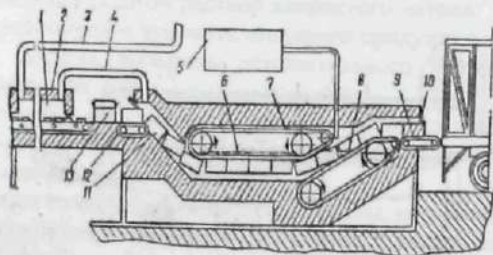


Рис. 7.2. Иммерсионный аппарат для замораживания упакованных продуктов

- 1 – камера предварительного охлаждения продуктов в упаковочном автомате;
- 2 – упаковочный автомат; 3 – вытяжной трубопровод; 4 – вытяжной трубопровод для подачи газообразного азота из грузового отсека аппарата в упаковочный автомат;
- 5 – бак жидкого азота; 6 – ванна с жидким азотом; 7, 8 – грузовые конвейеры;
- 9 – разгрузочный конвейер; 10 – разгрузочное окно; 11 – желоб;
- 12 – загрузочный конвейер; 13 – упакованный продукт

Аппарат работает следующим образом.

Из упаковочного автомата картонные коробки, которые предохраняют продукт от резкого воздействия низких температур, поступают в загрузочный конвейер.

Коробки с продуктом сталкиваются в желоб для подачи продукта в ванну с жидким азотом. Загрузочный конвейер и желоб в аппарате служат зоной предварительного охлаждения продукта.

Двигаясь по желобу под действием собственной массы, коробки обдуваются влажным паром азота, удаляемым из ванны, а находящийся в коробках продукт при этом охлаждается и подмораживается.

Движение коробок в грузовом (конвейере) отсеке аппарата осуществляется двумя конвейерами, которые перемещают.

Аппарат состоит из изолированного контура, грузового конвейера, циркуляционного вентилятора для давления газообразного азота, шиберов, бака с жидким азотом, системы питания аппарата жидким азотом, коллекторов с форсунками для распыления жидкого азота, поддона, насоса, пельменного автомата.

В торцовых стенах изолированного контура имеются окна для входа и выхода ленты грузового конвейера. Лента грузового конвейера выходит из грузового отсека на длину, необходимую для установки пельменного автомата.

На ленту укладывают тестовую трубку, подмораживают ее и штампуют с последующим замораживанием и выравниванием температуры.

Циркуляционный вентилятор для движения газообразного азота расположен в средней части аппарата.

В зоне предварительного охлаждения продукта размещается нагнетательный канал прямоугольного сечения длиной $\ell = 2,5$ м с целевыми соплами. Он оборудован двумя шиберами, регулирующими количество азота, который охлаждается жидким азотом, распыляемым в канале $t_{\text{до до}}$ $-120 \div -130$ °С.

Жидкий азот из бака $V = 15 \text{ м}^3$, расположенного вне аппарата, через дроссельное устройство, подается в коллекторы с форсунками, снабженными специальными винтами для регулирования подачи и распыления жидкого азота.

Для сбора избыточного жидкого азота устанавливается поддон, из которого жидкий азот перекачивается насосом в коллекторы с форсунками для рециркуляции.

Коробки с продуктом сталкиваются в желоб для подачи продукта в ванну с жидким азотом. Загрузочный конвейер и желоб в аппарате служат зоной предварительного охлаждения продукта.

Двигаясь по желобу под действием собственной массы, коробки обдуваются влажным паром азота, удаляемым из ванны, а находящийся в коробках продукт при этом охлаждается и подмораживается.

Движение коробок в грузовом отсеке аппарата осуществляется двумя конвейерами, которые перемещают коробки с продуктом через ванну с жидким азотом, а затем передают их на разгрузочный конвейер.

Через окно разгрузки продукты удаляются из аппарата. Размеры окна – минимальные.

Жидкий азот подается в ванну по трубопроводу из бака жидкого азота, а газообразный – отводится по вытяжному трубопроводу сначала в камеру упаковочного автомата, а затем направляется для охлаждения продукта на конвейерной линии, которая расположена перед упаковочным автоматом.

Техническая характеристика:
производительность, кг/ч

емкость, кг	50±60
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин.	15±20

К достоинствам аппарата можно отнести:

- уменьшение вредного влияния на продукт низких температур;
- возможность транспортировки в изотермическом транспорте без охлаждения.

Однако, в аппарате имеет место повышенный расход жидкого азота и сложность транспортной системы продукта.

Контрольные вопросы

1. Что используется в качестве теплоотводящих сред с аппаратах контактного замораживания пищевых продуктов?
2. Какие требования предъявляются к теплоотводящим средам?
3. Какие аппараты контактного замораживания используются для холодильной обработки пищевых продуктов?
4. Что используется в качестве теплоотводящей среды в криогенных аппаратах?
5. Как классифицируются криогенные аппараты в зависимости от принятого способа обработки?
6. Из каких основных элементов состоит иммерсионный аппарат?
7. В чем состоят достоинства и недостатки иммерсионных аппаратов?
8. Как конструктивно выполнен иммерсионный аппарат с зоной предварительного охлаждения продуктов?
9. В чем особенность конструкции иммерсионного аппарата с погружением продуктов в ванну с жидким азотом?
10. Каково назначение зон предварительного охлаждения продуктов в иммерсионных аппаратах?

Рекомендуемая литература

1. Беляков В.Г. Криогенная техника и технология. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – с.201
2. Усюткин И.П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 310 с.

ЛЕКЦИЯ 8. Криогенные аппараты с распылением жидкого азота. Основы расчета

План лекции

- 8.1. Конструктивное исполнение криогенных аппаратов с распылением жидкого азота.
- 8.2. Основы расчета аппаратов с распылением жидкого азота в грузовом отсеке

8.1. Конструктивное исполнение криогенных аппаратов с распылением жидкого азота

Криогенный аппарат для замораживания пельменей (рис.8.1) используется для замораживания пельменей и фрикаделек.

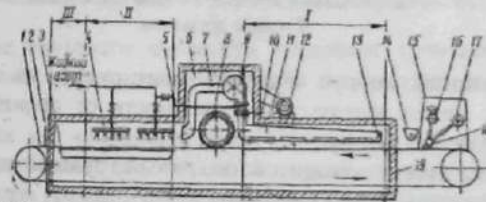


Рис. 8.1. Криогенный аппарат для замораживания пельменей:

- 1 – лента грузового конвейера; 2 – шторка; 3 – поддон; 4 – коллектор с форсунками для распыления жидкого азота; 5 – трубопровод подачи жидкого азота в нагнетательный канал с щелевыми соплами; 6 – надстройка под грузовым отсеком; 7 – всасывающий канал; 8 – штампуемый барабан; 9 – циркуляционный вентилятор; 10 – шиббер; 11 – нагнетательный канал с щелевыми соплами; 12 – электродвигатель; 13 – поворотная заслонка; 14 – устройство для посыпания муки тестовой трубки; 15 – корпус пельменного автомата; 16 – тестовый коллектор; 17 – фаршевый коллектор; 18 – фильтра (формующая головка); 19 – изолированный контур; I – зона предварительного охлаждения; II – зона орошения; III – зона выравнивания температур

Замороженные пельмени проходят зону выравнивания температуры и удаляются из аппарата для расфасовки и упаковки.

К недостаткам данной конструкции можно отнести высокую стоимость замораживания и возможность замораживания продукта только одного вида.

Техническая характеристика:

производительность, кг/ч	200±300
емкость, кг	20±30
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин.	4÷6

Криогенный аппарат с наклонным расположением контейнера для замораживания неупакованных продуктов (рис.8.2.) предназначен для замораживания широкого ассортимента мелкоштучных и кусковых продуктов, движущихся по наклонному конвейеру без упаковки.

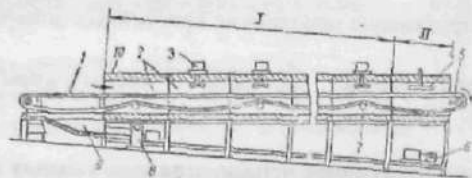


Рис. 8. 2. Криогенный аппарат с наклонным расположением конвейера для замораживания неупакованных продуктов:

- 1 – грузовой конвейер; 2 – сборные секции; 3 – циркуляционный вентилятор;
 4 – коллектор с форсунками; 5 – ведущий барабан; 6 – электродвигатель привода грузового конвейера; 7 – несущие ролики; 8 – вытяжной вентилятор;
 9 – газосборник; 10 – изолированный контур; I – зона предварительного охлаждения;
 II – зона орошения

Изолированный корпус аппарата монтируется из сборных секций, число которых может меняться в зависимости от производительности, и имеет «П» - образную форму.

В грузовом отсеке находится наклонный грузовой конвейер, который движется со скоростью $v = 2 \div 6$ м/мин.

Загрузка продуктом производится в нижней части грузового отсека, а его выгрузка – в верхней.

В зоне орошения находится коллектор с форсунками, предназначенный для распыления жидкого азота, который подается по трубопроводу из бака.

Количество жидкого азота регулируется так, чтобы он полностью испарялся, орошая замороженный продукт. Газообразный азот образуется при испарении жидкости.

Движение газа осуществляется индивидуальными циркуляционными вентиляторами, которые находятся в каждой сборной секции, скорость движения газообразного азота $V_{от} = 25 \div 30$ м/с только в верхней зоне грузового отсека, разделенного перегородками сборных «П» - образных секций на 2 части.

Газообразный азот, опускаясь по наклонному грузовому отсеку, собирается в газосборнике, откуда отработанный азот удаляется вытяжным вентилятором, создающим газовую завесу у загрузочного окна.

Продукт сначала направляется в зону предварительного охлаждения. В этой зоне продукт, обдуваемый холодным газообразным азотом охлаждается и подмораживается, а поступая в верхнюю часть, быстро замораживается и выводится из аппарата для упаковки.

К достоинствам этой конструкции можно отнести рациональную схему сбора и удаления отработанного газообразного азота, простоту монтажа,

ремонта, обслуживания, а также возможность замораживания широкого ассортимента продуктов.

Однако в конструкции не предусмотрена зона выравнивания температуры.

Техническая характеристика:

производительность, кг/ч	400÷800
емкость, кг	40÷80
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин.	6÷10

Зачастую в качестве транспортного устройства в криогенных аппаратах используются винтовые конвейеры. В таких аппаратах отсутствуют вентиляторы, своеобразно решается подача криогенной жидкости в грузовые отсеки аппарата.

Применение винтового конвейера упрощает транспортную систему аппарата, позволяет легко решать вопрос о загрузке и разгрузке его продуктом.

В аппаратах нет устройств, предназначенных для натяжения ленты конвейера, а отсутствие его обратной ветви и приводных барабанов позволяет выполнять грузовой отсек аппарата очень компактным.

Эти аппараты позволяют замораживать продукты, которые подаются навалом.

При замораживании такие продукты не слипаются, а слипшиеся куски в процессе транспортировки отделяются друг от друга.

В грузовом отсеке аппарата винтовой конвейер может располагаться не только наклонно, но и вертикально. В них движение газообразного азота осуществляется с помощью каналов и автоматических заслонок.

Такие аппараты применяются для быстрого замораживания мясных продуктов, готовых блюд, а также для закаливания мороженого.

Криогенный аппарат с наклонным винтовым конвейером для мелкоштучных продуктов (рис. 8.3.) используется для замораживания мелкоштучных продуктов.

Между обшивками он изолирован. Внутри аппарата расположен наклонный грузовой конвейер. Чтобы частицы замороженного продукта не прилипали к конвейеру и внутренней обшивке изолированного контура, их поверхности покрыты слоем нифлона.

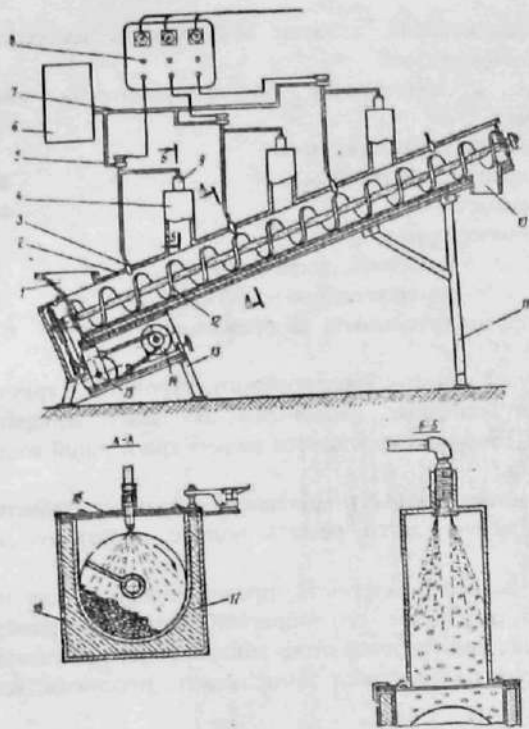


Рис. 8.3. Криогенный аппарат с наклонным винтовым конвейером:

- 1 – загрузочное окно; 2 – изолированный контур; 3 – форсунки; 4 – расширительная камера; 5 – соленоидный клапан; 6 – бак с жидким азотом; 7 – трубопровод; 8 – пульт управления; 9 – форсунки; 10 – разгрузочное окно; 11 – подставки; 12 – наклонный винтовой конвейер; 13 – наклонный винтовой конвейер; 14 – электродвигатель; 15 – вариатор скоростей; 16 – крышка; 17 – теплоизоляция; 18 – наружная обшивка изолированного контура

Загрузочное окно предназначено для загрузки продукта, а разгрузочное – для его разгрузки. По всей длине изолированного контура в непосредственной близости от винтовых конвейеров расположены форсунки. Жидкий азот в них подается по трубопроводам из бака. Между форсунками и по всей длине изолированного контура установлены расширительные камеры со своими форсунками, которые смонтированы на некотором расстоянии от наклонного винтового конвейера.

Распыленный в расширительной камере жидкий азот превращается в газ. В результате комбинированной подачи азота в грузовой отсек аппарата, продукт сначала орошается жидким азотом, а затем обдувается газообразным. Подача жидкого азота осуществляется соленоидным клапаном.

Продукт, предварительно охлажденный на транспортере загрузки, через окно поступает в грузовой отсек аппарата. Транспортируемый продукт попеременно или орошается жидким азотом, или обдувается газом, что обеспечивает его быстрое замораживание. Замороженный продукт через окно сыпается на транспортер разгрузки, где происходит выравнивание его температуры.

Этот аппарат прост по конструкции и компактен и обеспечивает заморозку продукта навалом.

Однако, в нем имеет место повышенный расход жидкого азота.

Техническая характеристика:

производительность, кг/ч	300
емкость, кг	50÷100
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин.	10÷20

Криогенный аппарат с вертикальным винтовым конвейером

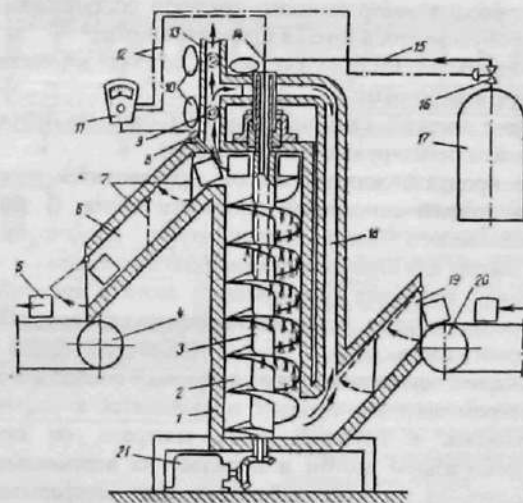


Рис. 8.4. Криогенный аппарат с вертикальным винтовым конвейером:

- 1 – цилиндрический изолированный контур; 2 – грузовой отсек; 3 – вертикальный винтовой конвейер; 4 – транспортер разгрузки; 5 – замороженный продукт; 6 – разгрузочный туннель; 7 – подъемные перегородки; 8 – датчик температуры; 9, 18 – канал для циркуляции газообразного азота; 10 – автоматическая задвижка; 11 – регулятор температуры; 12 – линия связи; 13 – канал отвода газообразного азота; 14 – патрубок подачи жидкого азота в пустотелый винт; 15 – трубопровод подачи жидкого азота к пустотелому винту; 16 – регулирующий клапан; 17 – бак с жидким азотом; 19 – загрузочный туннель; 20 – транспортер загрузки; 21 – электродвигатель привода винтового конвейера.

Стрелки показывают направление движения газового потока.

В криогенных аппаратах с вертикальным винтовым конвейером (рис. 8.4) движение газообразного азота осуществляется с помощью каналов автоматических заслонок.

Такие аппараты используются для быстрого замораживания мясных продуктов, готовых блюд, а также для закаливания мороженого.

Аппарат состоит из: цилиндрического изолированного контура; вертикального винтового конвейера; его привода; загрузочного и разгрузочного тоннелей; каналов для циркуляции и отвода газообразного азота, оборудованных автоматическими заслонками; бака с жидким азотом.

Изолированный контур морозильного аппарата имеет цилиндрическую форму. В пространство между внутренней и наружной металлическими обечайками уложена теплоизоляция.

В грузовом отсеке расположен вертикальный винтовой конвейер, пустотелый винт которого приводится во вращение электродвигателем через коническую зубчатую передачу.

В грузовой отсек аппарата продукт попадает через загрузочный, а удаляется — через разгрузочный туннели. В туннелях установлены перегородки, препятствующие как проникновению теплого воздуха в грузовой отсек, так и выходу газообразного азота наружу.

При прохождении замороженного продукта по туннелям перегородки поднимаются, пропуская его, а затем вновь опускаются.

Продукт орошается жидким азотом N_2 , который впрыскивается через пустотелый винт с отверстиями.

В этот винт жидкий азот поступает из бака по трубопроводу, на котором расположен регулирующий вентиль (РВ).

Орошение продукта жидким азотом производится через отверстие, находящееся на нижней спиральной плоскости винта. В зависимости от количества подаваемого азота, температуру регулируют датчиком, находящимся в канале для циркуляции газообразного азота.

Направление движения газообразного азота в аппарате изменяется автоматическими задвижками, установленными на канале для циркуляции и отвода газообразного азота.

Работа аппарата осуществляется в следующей последовательности.

Транспортером загрузки продукт направляется к соответствующему туннелю. Скатываясь в грузовой отсек аппарата, он предварительно охлаждается газообразным азотом и попадает на вертикальный винтовой конвейер. Находясь на этом конвейере, продукт непрерывно орошается жидким азотом, замораживается и направляется в разгрузочный туннель, где происходит выравнивание температуры уже замороженного продукта.

Транспортером разгрузки продукт перемещается для упаковки и укладки его в тару.

Эти аппараты компактны, просты по конструкции и обладают малой энергоемкостью.

Однако, в них имеет место повышенный расход жидкого азота.

Техническая характеристика:

производительность, кг/г	250
емкость, кг	30
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин	10÷20
габаритные размеры, мм:	
- длина	3200
- ширина	1350
- высота	3500
масса, кг	1200

Криогенный аппарат для замораживания крупно кусковых продуктов в среде газообразного азота (рис. 8.5) предназначен для замораживания неупакованных крупнокусковых продуктов.

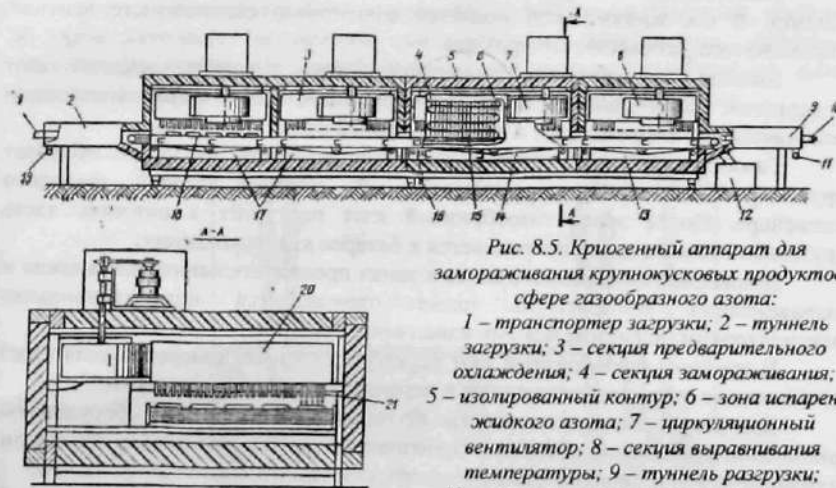


Рис. 8.5. Криогенный аппарат для замораживания крупнокусковых продуктов в сфере газообразного азота:
 1 — транспортер загрузки; 2 — туннель загрузки; 3 — секция предварительного охлаждения; 4 — секция замораживания; 5 — изолированный контур; 6 — зона испарения жидкого азота; 7 — циркуляционный вентиль; 8 — секция выравнивания температуры; 9 — туннель разгрузки; 10 — транспортер разгрузки; 11, 19 — канал отвода газообразного азота; 12 — привод грузового конвейера; 13, 14, 17 — нижняя часть грузового отсека; 15 — охлаждающая батарея; 16 — трубопровод подачи жидкого азота; 18 — грузовой конвейер; 20 — нагнетательный канал; 21 — сопло.

Он состоит из грузового конвейера, транспортеров загрузки и разгрузки, туннелей загрузки и разгрузки, охлаждающей батареи, трубопровода подачи жидкого азота, циркуляционных вентиляторов, нагнетательных каналов с соплами, вытяжных (вентиляторов) трубопроводов

ля отвода отработанного газообразного азота, привода грузового конвейера изолированного контура.

Грузовой отсек морозильного аппарата смонтирован из 4-х секций. зоны образуют зону *предварительного охлаждения* продукта, 3-я зона – *зона замораживания*, а 4-я – *зона выравнивания температуры*.

Изолированный контур аппарата состоит из листов армированного стекловолокна (наружная обшивка) полиуретана (теплоизоляция) и листов нержавеющей стали (внутренняя обшивка).

С торцовых сторон грузового отсека аппарата находятся загрузочный и азгрозочный туннели с соответствующими транспортерами. В грузовом отсеке аппарата установлен грузовой конвейер, сетчатая лента которого выполнена из нержавеющей стали. Скорость движения грузового конвейера может регулироваться вариатором скоростей в широких пределах.

На сетчатой ленте грузового конвейера замораживаются крупнокусковые продукты, которые в зоне замораживания обдуваются холодным газообразным азотом.

Охлаждающая батарея выполнена в виде змеевика с открытым верхним концом. В нее жидкий азот подается с помощью соленоидного вентиля, управляемого датчиком температуры.

Выходя из верхнего открытого конца змеевика, жидкий азот испаряется, а образовавшийся газообразный азот циркуляционными вентиляторами направляется в нагнетательный канал с соплами.

Газообразный азот, скорость движения которого $30 \div 35$ м/с, обдувает крупнокусковой продукт, перемещаемый сетчатой лентой грузового конвейера. После этого газообразный азот поступает в нижнюю часть грузового отсека и далее направляется к батарее для охлаждения.

Движение газообразного азота в зонах предварительного охлаждения и выравнивания температуры также производится циркуляционными вентиляторами, нагнетательными каналами с соплами.

В эти зоны газообразный азот перетекает из зоны замораживания через специальные окна, расположенные в перегородках между секциями.

Для регулирования количества протекающего азота окна оборудованы шиберами, управление которыми производится дистанционно (вручную или автоматически) в зависимости от температуры газообразного азота в зонах.

В *первой секции* температура газообразного азота $-17 \div -45$ °С, во второй $-45 \div -128$ °С, в третьей $-156 \div -184$ °С.

Из грузового отсека аппарата отработанный газообразный азот по вытяжному трубопроводу удаляется в атмосферу.

В аппарате отсутствует вытяжной вентилятор, т.к. в грузовом отсеке поддерживается избыточное давление газообразного азота, проникновение теплого наружного воздуха в грузовой отсек аппарата исключен.

Аппарат компактен, удобен в работе, в нем можно замораживать и мелкокусковые, и крупнокусковые продукты.

К недостаткам можно отнести повышенную металлоемкость, необходимость установки батареи охлаждения, увеличение энергетических затрат на привод циркуляционных вентиляторов, а также усушку продукта.

Техническая характеристика:

производительность, кг/ч	300
емкость, кг	$30 \div 40$
температура, °С:	
- теплоотводящей среды	-196
- замороженного продукта	-20
продолжительность замораживания, мин.	$10 \div 20$

Криогенный аппарат П - образной формы для замораживания продуктов (рис. 8.6) предназначен для замораживания упакованных и неупакованных продуктов. В нем транспортер загрузки используется для *предварительного охлаждения продукта*, а транспортер разгрузки - для *выравнивания температуры замороженного продукта*.

В состав аппарата входят: транспортеры загрузки и разгрузки, грузовой и промежуточные конвейеры, коллектор с форсунками, вытяжной вентилятор, система нагнетательных каналов подачи газообразного азота, шибер, изолированный контур, вакуум – насос и электродвигатели.

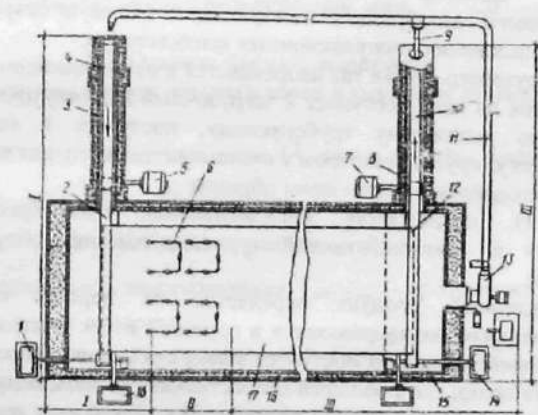


Рис. 8.6. Криогенный аппарат П-образной формы для замораживания продуктов: 1,14 – электродвигатели привода промежуточного конвейера; 2,12 – промежуточные конвейеры; 3 – загрузочный туннель; 4 – транспортер загрузки; 5 – электродвигатель транспортера загрузки; 6 – коллектор с форсунками; 7 – электродвигатель транспортера разгрузки; 8 – разгрузочный туннель; 9 – нагнетательный канал подачи газообразного азота; 10 – транспортер разгрузки; 11 – нагнетательный канал для распределения газообразного азота; 13 – вытяжной вентилятор; 15 – грузовой отсек; 16 – изолированный контур; 17 – грузовой конвейер; 18 – электродвигатель привода грузового конвейера; I – зона предварительного охлаждения; II – зона орошения; III – зона выравнивания температуры

Аппарат имеет П - образную форму. К одной из боковых сторон примыкают загрузочный и разгрузочный транспортеры.

Поперечное сечение туннелей имеет прямоугольную форму с минимальными размерами загрузочного и разгрузочного окон для уменьшения теплопритока в аппарат. Изоляция туннелей выполнена из многослойного полиуретана.

Изолированный контур грузового отсека аппарата в поперечном сечении имеет форму тора.

Пространство между наружной и внутренней обечайками его отвакуумировано и является тепловой изоляцией грузового отсека. Наружная обечайка выполнена из обычной конструкционной стали, а внутренняя – из нержавеющей стали.

В загрузочный и разгрузочный туннели вытяжным вентилятором (он является циркуляционным) по нагнетательным каналам подачи газообразного азота направляется холодный газ. Температура газа в туннеле $-20 \div -30$ °С.

В грузовом отсеке расположен грузовой конвейер, на котором происходит орошение замораживаемого продукта жидким азотом.

В грузовой отсек он подается из бака по трубопроводу. Давление жидкого азота в трубопроводе и коллекторе с форсунками – 203кПа.

Верхняя и нижняя перегородки грузового отсека, резко уменьшая поперечное сечение, позволяют (при минимальном количестве циркулирующего газообразного азота) создать высокую скорость движения газа без использования циркуляционных вентиляторов.

Из грузового отсека газ направляется к отсасывающему вентилятору. Газовый поток из него поступает в загрузочный и разгрузочный туннели, а частично, по вытяжному трубопроводу, поступает в атмосферу. Его количество регулируется шибером у отсасывающего вентилятора.

Аппарат работает следующим образом.

Продукт, подлежащий замораживанию, транспортером загрузки направляется в соответствующий туннель, где он, обдуваясь азотом, охлаждается.

Охлажденный продукт передается на первый промежуточный конвейер, которым он направляется в грузовой отсек аппарата. Попадая на грузовой конвейер, продукт поступает в зону орошения, а затем направляется в ту часть аппарата, где с большей скоростью движется холодный газ.

В этих зонах продукт замораживается. Во время его движения по промежуточному конвейеру и транспортеру разгрузки происходит выравнивание температуры в его объеме.

Если продукт не расфасован и не упакован, то он направляется к соответствующим автоматам, которые быстро расфасовывают и упаковывают его.

Аппараты этого типа компактны, в них отсутствуют циркуляционные вентиляторы, а на движение газообразного азота в циркуляционном кольце затрачивается меньше электроэнергии.

К недостаткам аппарата относится сложность транспортной системы для перемещения продукта при его замораживании.

В криогенных аппаратах, где замораживаемый продукт непосредственно орошается азотом, трудно замораживать продукты, имеющие повышенные габаритные размеры (готовые блюда, крупнокусковое мясо).

Такие продукты растрескиваются и деформируются при быстром замораживании жидким азотом, несмотря на наличие в аппарате зоны предварительного охлаждения. Увеличение времени пребывания крупнокусковых продуктов в зоне предварительного охлаждения приводит или к возрастанию длины грузового отсека, или (при малой скорости грузового конвейера) к резкому снижению производительности аппарата.

Поэтому крупнокусковые продукты целесообразно замораживать в газообразном азоте при его многократной циркуляции. В таких аппаратах жидкий азот при атмосферном давлении подается в поток газообразного холодильного агента, в котором жидкость, испаряясь, понижает температуру газа.

Техническая характеристика:

производительность, кг/ч	200÷250
емкость, кг	30÷35
температура теплоотводящей среды, °С:	-196
продолжительность замораживания, мин.	20

8.2. Основы расчета аппаратов с распылением жидкого азота в грузовом отсеке

Если заданы производительность Q , вид и размеры замораживаемого продукта, его начальная температура $t_{нач.прод.}$, конечная температура продукта $t_{кон.прод.}$, то необходимо определить:

- продолжительность замораживания $t_{замораз.}$ - пребывание продукции в грузовом отсеке аппарата, с;
- площадь сечения ленты грузового конвейера;
- длину грузового конвейера;
- габаритные размеры изолированного контура;
- тепловую нагрузку;
- общий расход жидкого азота и избыточное количество жидкого азота, орошающего продукт;
- количество форсунок;
- удельный расход жидкого азота;
- производительность отсасывающего вентилятора;
- количество газообразного азота, движущегося в зоне предварительного охлаждения;

- количество газообразного азота в зоне выравнивания температур.

I. Расчет времени замораживания выполняется по формуле:

$$\tau_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3.$$

1) τ_1 - продолжительность замораживания рассчитывается по формуле Планка:

$$\tau_1 = \frac{q_3 \cdot P}{t_{кр} - t_c} \cdot \delta_{ав} \left[R \frac{\delta_{ав}}{\lambda} + P \left(\frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right],$$

где $\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ - сумма теплового сопротивления стенок блок-формы и слоев упаковки, м²К/Вт;

α - коэффициент теплоотдачи от блок - формы при вынужденном движении воздуха ($\alpha = 0,032 \frac{v^{0,8} \cdot \lambda_a}{l_x^{0,2} \cdot v^{0,8}}$);

q_3 - количество тепла, отводимого от 1 кг продукта при его замораживании от начальной ($t_n = 4^\circ\text{C}$) до конечной (например - 20 °С) температуры, Дж;

$t_{кр}$ - криоскопическая температура, °С;

λ - коэффициент теплопроводности замороженного продукта, Вт(м°К);

R, P - коэффициенты, зависящие от формы и соотношения размеров замораживаемого тела;

$\delta_{ав}$ - толщина блоков (материала), м;

t_c - средняя температура воздуха за цикл охлаждения, °С;

q_{31} - количество тепла, отводимое от продукта при его холодильной обработке в зоне предварительного охлаждения, q_{31} зависит от его вида, а также от начальной и криоскопической температуры, Дж.

Температура теплоотводящей среды (газообразного азота N_2) в зоне предварительного охлаждения рассчитывается:

$$t_{cl} = \frac{t_r + t_0}{2},$$

где t_r - температура отработанного газообразного азота N_2 , удаляемого из зоны предварительного охлаждения, °С ($t = -20 \div -30^\circ\text{C}$)

2) Продолжительность домораживания продукта в зоне орошения τ_2 также находится по формуле Планка.

Величина q_n зависит от температуры замороженного продукта.

Температура теплоотводящей среды в зоне орошения равна температуре кипения жидкого азота N_2 в зоне орошения t_o .

Коэффициент α_2 теплоотдачи от продукта к жидкому азоту N_2 находится по формуле:

$$\alpha_2 = 25,06 \cdot \lambda^* \left(\frac{C^* \Delta t_a}{r} \right)^{-0,6} \cdot \left(\frac{\rho' - \rho^*}{\sigma} \right)^{0,5}, \text{ Вт(м}^2\text{°К)},$$

где λ^* - теплопроводность газообразного азота N_2 , Вт(м°К);

C^* - удельная теплоемкость газообразного N_2 , Дж(кг°К);

Δt_a - разность температур продукта, поступающего в зону орошения, и кипения азота N_2 , °С;

ρ' - плотность жидкого азота N_2 , кг/м³;

ρ^* - плотность насыщенного пара азота при $t_{кип}$, кг/м³;

σ - поверхностное натяжение жидкого азота N_2 , н/м.

3) Продолжительность τ_3 пребывания продукта в зоне выравнивания температур равна продолжительности замораживания продукта до криоскопической температуры в зоне предварительного охлаждения, т.е. $\tau_3 = \tau_1$. Обычно принимают (2) $\tau_3 = (0,5 \div 0,75)\tau_1$ и отказываются от зоны выравнивания температур, тогда $\tau_3 = 0$.

II. Расчет габаритов аппарата производится в следующей последовательности.

Емкость аппарата или масса продукта на ленте грузового конвейера, определяется как:

$$G = G' \cdot \tau.$$

Далее определяется:

1) Площадь $F_{ки}$ (м²) поверхности ленты грузового конвейера:

$$F_{ки} = \frac{G}{g_f},$$

где G - масса продукта, кг;

g_f - масса продукта, размещенного на 1 м² площади поверхности ленты грузового конвейера, кг/м².

2) Длина грузового конвейера:

$$L_{ки} = \frac{F_{ки}}{B_{ки}},$$

где $L_{кн}$, $B_{кн}$ - длина и ширина грузового конвейера, м.

3) Длина изолированного контура:

$$L_A = L_{кн} + D_6 + 2\delta_{И_3} + 2\delta_3,$$

где L_A - длина контура, м;

D_6 - диаметр барабана грузового конвейера, м;

$\delta_{И_3}$ - толщина слоя изоляционного материала, м;

δ_3 - зазор между барабаном и торцевой стенкой изолированного контура, м.

4) Ширина изолированного контура:

$$B_A = B_k + 2\delta_{И_3} + 2\delta_3,$$

где B_A - ширина изолированного контура, м;

δ_3 - зазор между грузовым конвейером и боковой стенкой изолированного контура, м.

5) Высота изолированного контура:

$$H_A = D_6 + h_a + \delta_3^{II} + \delta_3^{III} + \delta_3^{IV} + 2\delta_{И_3},$$

где H_A - высота изолированного контура, м;

h_a - размер циркуляционного вентилятора по высоте изолированного контура, м;

δ_3^{II} , δ_3^{III} , δ_3^{IV} - зазоры между циркуляционным вентилятором и лентой грузового контейнера, между циркуляционным вентилятором и верхней крышкой изолированного контура, между обратной ветвью грузового конвейера и нижней крышкой изолированного контура, соответственно, м.

III. Тепловой расчет

Тепловая нагрузка определяется на холодильное оборудование камеры:

$$Q_o = a_{o.л.} Q_1 + Q_2 + Q_4,$$

где $a_{o.л.}$ - дополнительный коэффициент = 1,4 ÷ 1,5;

Q_1 - теплоприток в камеру через ограждение, Вт;

Q_2 - теплоприток от продукта, Вт;

Q_4 - эксплуатационный теплоприток от работы двигателей, вентиляторов, который определяется $Q_4 = (0,1 \div 0,2) Q_2$, Вт - для криогенных аппаратов: $Q_4 = (0,1 \div 0,15) Q_2$.

1) Общий расход жидкого азота $G_{АЗ}$ (кг/с):

$$G_{АЗ} = \frac{Q'_A}{r},$$

где Q'_A - тепловая нагрузка, отводимая жидким азотом при домораживании продукта в зоне орошения, Вт;

r - время пребывания продукта в зоне орошения, с.

Тепловая нагрузка рассчитывается в свою очередь, по формуле:

$$Q'_A = G' \cdot q_{32},$$

где q_{32} - количество тепла, отводимого от замораживаемого продукта в зоне орошения, Дж/кг.

2) Тепловая нагрузка (Вт), отводимая газообразным азотом

$$Q_A^* = Q_o - Q'_A$$

Действительная тепловая нагрузка, отводимая газообразным азотом:

$$Q_{АД}^* = G_{АЗ} \cdot C(t_r - t_o),$$

где t_r - температура газообразного азота, уходящего из грузового отсека, °С.

Если $Q_{АД}^* = Q_A^*$ (расх ±10%), то условия работы криогенного аппарата правильные.

Если $Q_{АД}^* \neq Q_A^*$, то добиваются равенства, изменяя расход жидкого азота.

Удельный расход q_A (кг/кг) жидкого азота:

$$q_A = \frac{G_{АД}}{G'}.$$

3) Производительность $V_{ОВ}$ (м³/с) отсасывающего вентилятора

$$V_{ОВ} = G_{АД} \cdot v_r,$$

где v_r - удельный объем газообразного азота в зоне предварительного охлаждения, м³/кг.

4) Количество газообразного азота $V'_{А.П.}$ (м³/с), движущегося в зоне предварительного охлаждения

$$V'_{А.П.} = F_{з.п.} \cdot \omega',$$

где $F_{з.п.}$ - живое сечение зоны предварительного охлаждения, м²;

ω' - скорость движения газообразного азота в зоне предварительного охлаждения, м/с.

5) Количество газообразного азота V'_{AB} ($\text{м}^3/\text{с}$), движущегося в зоне выравнивания температур

$$V'_{AB} = F_{з.в.} \cdot \omega'$$

где $F_{з.в.}$ - живое сечение зоны выравнивания температур для прохода газообразного азота, м^2 ;

ω' - скорость движения газообразного азота в зоне выравнивания температуры, $\text{м}/\text{с}$.

Затем подбираются циркуляционный и отсасывающий вентиляторы.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит криогенный аппарат для замораживания пельменей?
2. Порядок работы криогенного аппарата для замораживания пельменей?
3. Как монтируется изолированный корпус аппарата с наклонным расположением конвейера для замораживания неупакованных продуктов?
4. Из каких элементов состоит криогенный аппарат с наклонным расположением конвейера для замораживания неупакованных продуктов и как он работает?
5. Достоинства и недостатки криогенного аппарата с наклонным расположением конвейера для замораживания неупакованных продуктов.
6. Достоинства криогенных аппаратов с винтовыми конвейерами.
7. Из каких элементов состоит криогенный аппарат с наклонным винтовым конвейером для мелкоштучных продуктов и как он работает?
8. Особенности конструкции криогенного аппарата с вертикальным винтовым конвейером и принцип его работы.
9. Что представляет собой криогенный аппарат для замораживания крупнокусковых продуктов в среде газообразного азота и как он работает?
10. Из скольких зон состоит криогенный аппарат для замораживания крупнокусковых продуктов в среде газообразного азота?
11. Достоинства и недостатки криогенного аппарата для замораживания крупнокусковых продуктов в среде газообразного азота?
12. Для замораживания каких продуктов предназначен криогенный аппарат П-образной формы, из каких узлов состоит и как работает?
13. Как рассчитывается продолжительность пребывания продукта в грузовом отсеке криогенного аппарата с распылением жидкого азота?
14. Как рассчитывается емкость криогенного аппарата?
15. От чего зависит:
 - а) длина грузового конвейера?
 - б) длина изолированного контура?
 - в) ширина изолированного контура?

- г) высота изолированного контура?
16. К чему сводится тепловой расчет криогенных аппаратов?
 17. Как определяется тепловая нагрузка криогенного аппарата?

Рекомендуемая литература

1. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. – М.: Госэнергоиздат, 1971.
2. Буднева С.Ф. Процессы глубокого охлаждения. – М.: Машиностроение, 1977. – 230 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛЕКЦИЯ 1. Глубокое охлаждение	4
1.1. Основные понятия. Дроссельный эффект.....	4
1.2. Термодинамическое выражение дроссельного эффекта.....	6
1.3. Физическая сущность дроссельного эффекта.....	7
1.4. T-S диаграмма для воздуха.....	9
ЛЕКЦИЯ 2. Минимальная работа сжижения газов	11
ЛЕКЦИЯ 3. Циклы с расширением газа без отдачи внешней работы	15
3.1. Простой регенеративный цикл. Тепловой баланс цикла.....	15
3.2. Усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под давлением. Расчет цикла.....	18
3.3. Усовершенствованный регенеративный цикл с циркуляцией газа под высоким давлением и с предварительным охлаждением.....	20
ЛЕКЦИЯ 4. Циклы с расширением цикла и отдачей внешней работы	23
4.1. Цикл среднего давления с расширительной машиной и однократным расширением газа (Цикл Клода).....	23
4.2. Расчет цикла Клода.....	24
ЛЕКЦИЯ 5. Комбинированные циклы	27
5.1. Цикл высокого давления с расширительной машиной и однократным дросселированием (Цикл Гейландта). Расчет цикла Гейландта.....	28
5.2. Цикл низкого давления с турбодетандером (Цикл Капицы)....	30
5.3. Сравнительный анализ методов сжижения газов.....	32
ЛЕКЦИЯ 6. Методы разделения газовых смесей	34
6.1. Фракционированная конденсация.....	34
6.2. Ректификация.....	36
ЛЕКЦИЯ 7. Аппараты контактного замораживания. Иммерсионные аппараты	40
7.1. Классификация криогенных аппаратов.....	40
7.2. Иммерсионные аппараты: иммерсионный аппарат с зоной предварительного охлаждения продуктов в ванну с жидким азотом.....	41
ЛЕКЦИЯ 8. Криогенные аппараты с распылением жидкого азота. Основы расчета	45
8.1. Конструктивное исполнение криогенных аппаратов с распылением жидкого азота.....	45
8.2. Основы расчета аппаратов с распылением жидкого азота в грузовом отсеке.....	55

Основы криогенной техники

Курс лекций
по дисциплине «Основы криогенной техники»

Составитель *Кочнева С.В.*

Редактор *Дмитриенко К.М.*

Тех. Редактор *Аджиева Ч.Ж.*

Подписано к печати 01.10.2009 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.

Бумага офс. Печать офс. Объем 4 п.л. Тираж 50 экз. Заказ 99

Цена 53с

г.Бишкек, ул. Сухомлинова, 20, ИЦ "Текник" КГТУ, т.: 56-14-55, 54-29-43

E-mail: ict@ktu.aknet.kg, bekmur@mail.ru