

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**Криогенное оборудование. Ожижители, рефрижераторы, системы
отчистки**

Учебное пособие

САМАРА 2017

УДК 533

ББК 31.31

Составители: Д.А. Угланов

Криогенное оборудование. Ожижители, рефрижераторы, системы очистки: учебное пособие / Самарский университет; Д.А. Угланов; Самара, 2017. – 54 с.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по следующим направлениям подготовки бакалавра: 13.03.03 – Энергетическое машиностроение, 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств. 15.03.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 – Двигатели летательных аппаратов; по специальности 24.05.02 – Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок, по направлению подготовки магистров 24.04.05 - Двигатели летательных аппаратов, а также может быть полезно слушателям курсов, аспирантам и специалистам. Разработано на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского университета.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Теоретические основы сжижения газов	3
1.1 Общие сведения. Теплофизические свойства некоторых криоагентов	3
1.2 Испарительное охлаждение жидкостей.....	5
1.3 Охлаждение газов и жидкостей при дросселировании	12
1.4 Расширение газов с совершением внешней работы	19
1.5 Охлаждение газов при истечении из постоянного объема.....	25
1.6 Другие способы получения низких температур.....	29
1.7 Использование каскадного охлаждения и регенеративного теплообмена в процессах получения низких температур.....	33
1.8 Разделение газовых смесей методом низкотемпературной ректификации	41
2 Проектирование процесса ожижения азота	46
2.1 Модифицированный цикл Клода для ожижителя азота	46
2.2 Шаги расчета процесса	47

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СЖИЖЕНИЯ ГАЗОВ

1.1 Общие сведения. Теплофизические свойства некоторых криоагентов

Первые успехи в достижении весьма низких температур пришли вместе с покорением «постоянных» газов. Причина столь высокой сопротивляемости этих веществ ожижению заключалась в необычайно низких значениях их критических температур. Так, для конденсации кислорода его температуру необходимо понизить до значения, меньшего чем 154,58 К- Критические температуры азота, водорода, неона и гелия (табл. 1.1) еще ниже, чем у кислорода, и, следовательно, для их ожижения требуется еще более глубокое охлаждение.

Вот почему так называемые постоянные газы не проявляли (и не могли проявить) признаков ожижения даже при фантастических по тем временам давлениях, превышающих атмосферное в 2—3 тыс. раз, поскольку их сжатие проводилось при температурах выше критических. Наконец, удалось найти способы получения температур, существенно более низких по сравнению с достигнутыми. К тому времени проблема ожижения газов была окончательно решена. Рассмотрению этих способов, позволяющих получить криотемпературы (ниже 120 К), и посвящена настоящая глава. Но сначала несколько замечаний о теплофизических свойствах некоторых криоагентов, используемых в технике низких температур.

Криоагентами называются рабочие тела (вещества), используемые в установках для получения температур ниже 120 К- Наибольшее распространение в криогенной технике получили азот, кислород, водород и гелий. Криоагенты применяются в газообразном, жидком и твердом состояниях. Температурные области применения тех или иных веществ определяются в основном их теплофизическими свойствами. Разумеется, в установках для получения криотемператур криоагенты находятся, как правило, одновременно в различных фазовых состояниях.

В табл. 1.1 приведены теплофизические свойства некоторых криоагентов.

Для отвода теплоты от охлаждаемого или криостатируемого объекта чаще всего предпочитают использовать ожиженные газы, так как в этом случае достигается наибольшая интенсификация теплообмена. С помощью жидкости легко поддерживать и регулировать температуру криостатирования. Действительно, с изменением давления насыщенного пара (см. табл. 1.1) меняется и температура кипения жидкости. Таким образом, достаточно сконденсировать газ, а затем поддерживать неизменным давление насыщенного пара, чтобы получить соответствующую постоянную температуру. Регулировать температуру жидкости этим способом можно в диапазоне от критической до температуры тройной точки. Допустимый интервал изменения температуры жидкости зависит от свойства вещества. Общая закономерность для сжиженных газов такова, что с понижением критической температуры вещества уменьшается и область существования жидкости. Однако кислород и инертные газы выпадают из этой закономерности. Температуру жидкого кислорода можно изменять (табл. 1.1) почти на 36 К. Для инертных (Аг, Ne) газов характерна узкая температурная область существования жидкости — «сего около 3,5 К». Понижение температуры жидкости уменьшением давления равновесного пара нашло широкое практическое применение.

Таблица 1.1 - Теплофизические свойства некоторых криоагентов.

Вещество	Атомная или молекулярная масса	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)	Температура кипения жидкости в зависимости от давления насыщенного пара, К		Плотность газа при атмосферном давлении, $T = 273,15$ К, кг/м ³ *	Плотность жидкости при атмосферном давлении, кг/м ³	Теплота парообразования при атмосферном давлении, кДж/кг	Критические параметры	
			при атмосферном давлении*	при давлении тройной точки**				$P_{кр}$, МПа	$T_{кр}$, К
Азот	28,013	296,8	77,36	63,15 (0,01253)	1,25046	804	199,4	3,59906	126,25
Аргон	39,948	208,2	87,29	83,81 (0,06906)	1,78394	1393	161,7	5,42694	150,65
Водород:									
нормальный (75% о-Н ₂ и 25% p-Н ₂)	2,0159	4124,2	20,38	13,95 (0,0072)	0,089988	70,80	449,8	1,31198	33,19
параводород	—	—	20,2	13,81	—	—	—	—	—
Воздух	28,96	287	78,8	—	1,2928	873	205,2	~3,7743	132,42
Гелий-4	4,0026	2078	4,215	—	0,17846	125	0,229	0,229	5,2
Гелий-3	3,0160	—	3,191	—	0,1345	58,9	8,4	0,115	3,3105
Кислород	31,998	259,8	90,188	54,352 (0,00015)	1,42895	1142	212,8	5,04598	154,58
Метан	16,04	518,8	111,67	90,66 (0,0117)	0,7168	426	510	4,62042	190,6
Неон	20,183	411	27,102	24,54 (0,0433)	0,8999	1206	86	2,65269	44,6
Фтор	37,997	219	84,95	53,48 (0,00025)	1,635	1500	165,9	5,21824	144,31

При давлении в тройной точке и ниже получают криоагент в твердом состоянии*

Криоагенты удобно хранить и транспортировать в конденсированном состоянии. Из табл. 1.1 видим, что плотность жидкостей в 600—1000 раз больше плотностей соответствующих газов при том же давлении. Поэтому системы для хранения и перевозки жидкостей получаются более компактными и легкими, чем для газообразных веществ.

Часто в тех случаях, когда требуется сравнительно кратковременное охлаждение или необходимо отвести небольшие количества теплоты, криоагенты для этих целей привозят со стороны в специальных изолированных от внешнего теплопритока сосудах.

Для отвода больших количеств теплоты и особенно когда системы работают непрерывно, установки для получения и использования криотемператур объединяются в общие системы. Некоторые из таких систем мы рассмотрим в последующих параграфах.

1.2 Испарительное охлаждение жидкостей

Простой и надежный способ охлаждения жидкости уменьшением давления равновесного пара (вакуумирования парового пространства) с давних пор широко применяется как в исследовательских лабораториях, так и в промышленности. Еще М. Фарадеем в 1840 г. использовался метод вакуумирования для понижения температуры смеси, состоящей из спирта или эфира и льда двуокиси углерода. Эта смесь при температуре приблизительно — 110°C использовалась им для охлаждения различных газов с целью их ожижения. Так были ожижены этилен, фосфористый водород и другие газы.

Этот же метод блестяще применили в 1883 г. К. Ольшевский и З. Вроблевский для охлаждения жидкого этилена, который в свою очередь использовался для ожижения кислорода*

Позже, в 1898—1900 гг. охлаждение вакуумирования парового пространства широко применялось Дж. Дьюаром в процессах получения жидкого и твёрдого водорода. При попытке получить твердый гелий Г.

Камерлинг-Оннес в 1909 г. достиг вакуумированием парового пространства температуры жидкого гелия всего на один градус выше абсолютного нуля.

Этот метод широко используется и в настоящее время. Вакуумированием понижают температуру жидкого азота, служащего для предварительного охлаждения потока газа в водородных или гелиевых ожижителях и рефрижераторах; его применяют также для получения твердых азота, водорода и других криоагентов.

Рассмотрим причину понижения температуры конденсированных газов при вакуумировании парового пространства.

Между жидкостью и ее паром, находящимися в закрытом сосуде при постоянной температуре, устанавливается динамическое равновесие. Это означает, что в каждый момент количества молекул, перешедших из жидкости в пар и из пара в жидкость, равны. Давление пара в этом случае для чистого вещества зависит только от температуры. Чем выше температура, тем больше давление, и наоборот, чем ниже температура, тем меньше равновесное давление.

Нарушение динамического равновесия приводит к процессам, стремящимся восстановить его вновь. Так, если понизить давление пара над жидкостью, уменьшится и ее температура. Самопроизвольно установившееся равновесие будет соответствовать теперь меньшим значениям давления и температуры. Этот процесс можно объяснить так. Для испарения жидкости, как известно, требуется подводить, а для конденсации пара, наоборот, отводить теплоту, равную теплоте фазового перехода. Поскольку в условиях динамического равновесия температура и соответствующее ей давление пара в сосуде остаются неизменными, той теплоты фазовых переходов при испарении и конденсации равны. Следовательно, для поддержания динамического равновесия не требуется подводить к сосуду или отводить от него какое-либо количество теплоты. Динамическое равновесие в закрытом сосуде устанавливается самопроизвольно.

Другая картина наблюдается при искусственном нарушении этого равновесия. Если, например, из сосуда начать откачивать пар, его давление будет понижаться и Количество молекул, переходящих в единицу времени из жидкости в пар, будет больше, чем из пара в жидкость. Следовательно, и количество теплоты, поглощённой в каждый момент испаряющейся жидкостью, будет больше количества теплоты, выделенной конденсирующимся паром. Разница в количествах поглощенной и выделенной в каждый момент теплоты и приводит к охлаждению остающейся в сосуде жидкости в течение всего времени откачивания пара.

Таким образом, если в сосуде при откачке непрерывно понижается давление, то и температура жидкости уменьшается вплоть до достижения тройной точки.

С момента появления первого кристалла льда давление в сосуде при дальнейшей откачке остается неизменным, а в жидкости начинают образовываться - все новые и новые кристаллы. Так будет продолжаться до тех пор, пока жидкость полностью не затвердеет. После этого давление пара начнет снова понижаться и соответственно будет понижаться и температура льда, стремясь в пределе к абсолютному нулю. Однако снижение температуры льда в реальных условиях быстро прекращается вследствие ограниченных технических возможностей понижения давления.

Отвод пара возможен и без уменьшения давления и соответственно температуры жидкости. Но в этом случае необходимо подводить к ней такое количество теплоты, которое бы обеспечивало равенство масс испаряемого и отводимого в виде пара вещества. Так, например, происходит с кипящей водой в открытом сосуде, пар которой непрерывно отводится; температура жидкости при этом остается постоянной. Достаточно изменить количество подведенной теплоты, как тут же самопроизвольно меняется масса отводимого пара.

Нас будет интересовать только первый случай, когда сосуд изолирован и при откачке пара температура жидкости непрерывно понижается. Это понижение температуры можно легко вычислить аналитически.

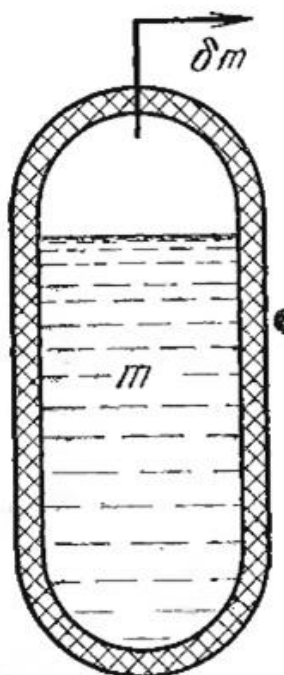


Рисунок 1.1 – Охлаждение жидкости вакуумированием парового пространства

Пусть в сосуде с идеальной тепловой изоляцией (рис. 1.1) находится масса m жидкости. При откачке пара, находящегося с ней в равновесии, давление и соответственно температура жидкости понижаются.

Если за бесконечно малое время δt удалить δm пара, то температура оставшейся жидкости понизится на δT градусов. Тогда из уравнения энергетического баланса системы (рис. 1) можно записать:

$$m c_s \delta T = \delta m r \quad (1)$$

где c_s — теплоемкость жидкости на линии насыщения; r — теплота парообразования.

Левая часть уравнения (1) представляет собой количество теплоты, отведенной за время δt от оставшейся в сосуде жидкости; правая —

количество теплоты, отведённой за это время из системы вместе с откачанным паром.

Преобразуя уравнение (1), получаем:

$$\frac{\delta m}{m} = \frac{c_s}{r} \delta T \quad (2)$$

За конечное время τ из сосуда будет откачано $\Sigma \delta m$ пара, что приведет к понижению температуры оставшейся жидкости на $\Sigma \delta T$ градусов. С учетом этого уравнение (2) примет вид:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta m}{m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_s}{r} \delta T \quad (3)$$

где n — число интервалов, на которые разбивается процесс откачки. Из уравнения (3) легко определить понижение температуры жидкости, задавшись количеством откачанного пара и зная зависимость от температуры c_s и r .

Для большинства криогенных жидкостей зависимости теплоемкости и теплоты парообразования от температуры с погрешностью, не превышающей 5%, можно принять линейными или считать эти величины постоянными. Значения c_s и r принимаются по справочным Данным.

На рис. 1.2 показана зависимость температуры некоторых криогенных веществ от количества откачанного 2—1005 пара, рассчитанная по уравнению (3) и определенная экспериментально для адиабатных и неадиабатных условий. С погрешностью, не превышающей 5%, экспериментальные данные соответствуют теоретическим значениям, найденным по уравнению (3). Точкой 1 на графике обозначена исходная температура криогенной жидкости, соответствующая её насыщению при атмосферном давлении.

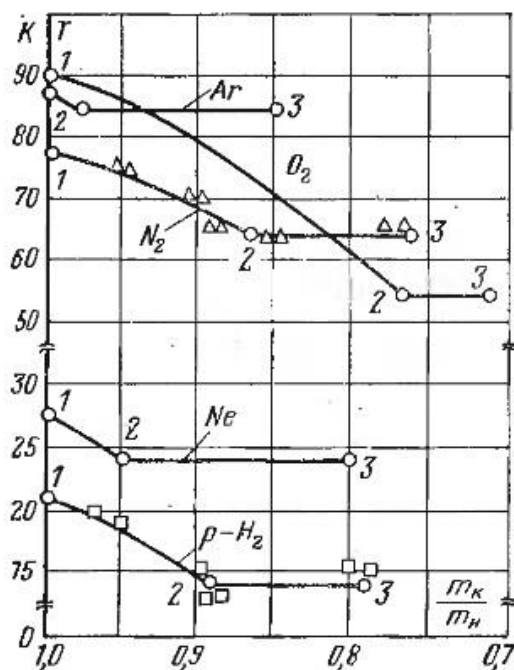


Рисунок 1.2 – Зависимость температуры криогенных веществ от количества откаченного пара. m_k – масса оставшегося в сосуде криогента в конце прогресса откачки; m_n – масса исходной жидкости при температуре насыщения; Δ , \square – экспериментальные точки.

Когда температура жидкости достигнет тройной точки 2, при дальнейшей откачке начнется образование кристаллов. Поскольку наиболее холодная зона находится на границе раздела паровой и жидкой фаз, то образование кристаллов начинается на поверхности жидкости. Для этого процесса можно записать следующее уравнение:

$$(m'_2 - m''_2) x r_{пл} = r_{тт} m''_2 \quad (4)$$

где m'_2 – масса жидкости при температуре тройной точки перед образованием первого кристалла; m''_2 – масса откачанного пара; x – доля твердой фазы; $r_{пл}$, $r_{тт}$ — соответственно теплоты плавления и парообразования при температуре тройной точки.

Уравнение (4) составлено для адиабатных условий процесса замораживания. Пользуясь этим уравнением, можно определить необходимую массу m''_2 пара, которую потребуется удалить из системы для

получения заданной доли x твердой фазы при условии, что жидкость перед замораживанием находилась при температуре тройной точки.

На рис. 1.2 горизонтальными линиями показаны зависимости доли твердой фазы от относительной величины оставшегося в сосуде криоагента, рассчитанные с использованием уравнений (3) и (4). Точка 2 соответствует появлению первого кристалла (тройной точке), точка 3 — 100% твердой фазы. Масса криоагента, находящегося в паровом пространстве сосуда, в расчет не принималась. Кружками обозначены значения, полученные экспериментально. Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных теоретически также не превышает 5%.

Пользуясь графиком на рис. 1.2, можно легко определить количество пара, которое необходимо откачать для получения криоагента в заданном состоянии. Пусть, например, требуется получить твердый неон при температуре тройной точки (точка 3). Опустив из точки 3 перпендикуляр на ось абсцисс, получим $m_k/m_n=0,8$. Следовательно, для полного замораживания жидкого неона, находящегося при нормальной температуре кипения, требуется откачать в виде пара 20% его начальной массы.

Если требуется охладить жидкий неон до температуры тройной точки, то, проделав аналогичные операции, получим, что для этого необходимо откачать всего 5% исходной массы и т. д.

Вакуумирование парового пространства применяется и для получения веществ, находящихся в так называемом шугообразном состоянии. Под шугой понимают в этом случае смесь жидкой и твердой фаз одного и того же вещества.

Но охлаждение вакуумированием парового пространства обладает и существенным недостатком, поскольку в этом процессе удаляется из системы в виде пара значительная доля первоначального запаса вещества. Поэтому такой метод охлаждения применяют там, где на первый план выступает требование простоты и надежности.

1.3 Охлаждение газов и жидкостей при дросселировании

Если на пути газа или жидкости, протекающих по трубопроводу, встречается какое-нибудь местное сопротивление, суживающее сечение потока, то давление среды после этого устройства всегда оказывается меньшим, чем до него. Такое явление называется дросселированием. Оно происходит, например, при прохождении потока через полуоткрытые вентили, задвижки, различные диафрагмы или другие устройства, установленные в трубопроводе, и сопровождается не только понижением давления, но и, как правило, изменением температуры дросселируемой среды, что и позволяет в ряде случаев использовать дросселирование для получения низких температур.

Этот эффект был открыт в 1852 г. Д. Джоулем и Томсоном (Кельвином) при изучении свойств реальных газов.

Исследователи пропускали с небольшой скоростью сжатый газ через пористую пробку, сделанную из ваты и размещенную в трубе. При этом давление снижалось от p_1 до p_2 и происходило изменение температуры, что фиксировалось установленными в трубопроводе термометрами.

Рассмотрим причины, вызывающие изменение температуры газа в процессе дросселирования. Пусть в трубе 1 (рис. 1.4), одинаковой по всей длине по диаметру и идеально изолированной от теплопритока извне, установлена пористая пробка 2. До пробки 2 и после нее давления среды поддерживаются постоянными и равными соответственно p_1 и p_2 . Для того, чтобы переместить газ вдоль трубы, необходимо затратить работу. Предположим, что эта работа прикладывается к воображаемому поршню I, перемещающему газ по направлению к пористой пробке, В действительности таким поршнем служит сама рабочая среда, проталкиваемая по трубе, например, компрессором.

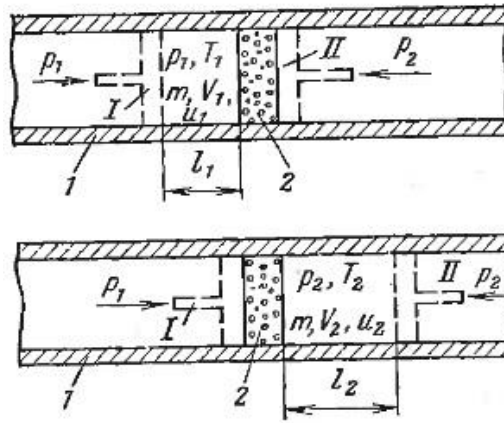


Рисунок 1.3 – Схема процесса дросселирования

Если поршень 1 переместить на расстояние l_1 , то он протолкнет через пористую пробку массу газа m , имеющую объем V_1 . При этом работа, отданная поршнем, будет равна:

$$L_1 = p_1 s l_1 = p_1 V_1 = p_1 m v_1 \quad (5)$$

где s — площадь поршня; v_1 — удельный объем газа.

Газ, прошедший пористую пробку, переместит воображаемый поршень II на расстояние l_2 . В процессе прохождения через препятствие давление газа снизится с p_1 до p_2 . При этом за пористой пробкой газ произведет работу, равную

$$L_2 = p_2 s l_2 = p_2 V_2 = p_2 m v_2 \quad (6)$$

где v_2 — удельный объем газа, прошедшего пористую пробку.

Будем считать, что скорость потока до дроссельного устройства и после него одинакова и неизменна. Тогда по закону сохранения энергии можно записать уравнение

$$m u_1 + m p_1 v_1 = m u_2 + m p_2 v_2 \quad (7)$$

или для единицы массы газа

$$u_1 + p_1 v_1 = u_2 + p_2 v_2 \quad (8)$$

где u_1 и u_2 — соответственно внутренняя энергия газа до дросселирования и после него.

Из уравнения (8) получаем:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2 \quad (9)$$

Внутренняя энергия идеального газа не зависит от давления и объема, поэтому при дросселировании, как это следует из правой части уравнения (9), $\Delta u = 0$. Из уравнения (9) также получаем $p_1 v_1 = p_2 v_2$, т.е. работа, переданная поршнем I газу до дросселирования, равна работе, отданной газом поршню II после дросселирования. Отсюда по закону Клапейрона следует, что температура идеального газа при дросселировании не меняется.

В отличие от идеальных газов, внутренняя энергия которых зависит только от температуры или, другими словами, от кинетической энергии молекул, в реальных газах внутренняя энергия складывается из двух составляющих: кинетической энергии отдельных молекул или их ассоциаций и потенциальной составляющей.

Потенциальная энергия связана с силами межмолекулярного взаимодействия. Эти силы обусловлены в основном электрическими факторами.

Простейшая молекула одноатомного газа представляет собой диполь, поэтому межмолекулярное взаимодействие носит сложный характер. Оно обуславливается как силами притяжения разноименных зарядов, так и силами отталкивания одноименных зарядов. То же самое происходит и с группами или ассоциациями молекул.

Расширение реального газа направлено против сил взаимного притяжения молекул и поэтому ведет всегда к уменьшению внутренней энергии, а, следовательно, и температуры. Но одновременно действуют и другие факторы.

Взаимное отталкивание молекул и расширение газа направлены в одну сторону. Оба фактора ведут к увеличению расстояния между молекулами

газа и, следовательно, к уменьшению потенциальной энергии. Но силы отталкивания при расширении как бы ускоряют молекулы газа и поэтому потенциальная составляющая внутренней энергии, связанная с этими силами, переходит в кинетическую, что и ведет к повышению температуры.

Силы межмолекулярного взаимодействия зависят от расстояния между молекулами. Если расстояние между молекулами соизмеримо с размерами самих молекул, то преобладают силы отталкивания.

По мере увеличения расстояния силы отталкивания резко уменьшаются. Уменьшаются также и силы взаимного притяжения, но в значительно меньшей степени. Следовательно, с какого-то определенного момента, начинают преобладать силы взаимного притяжения молекул. При дальнейшем увеличении расстояния силы межмолекулярного взаимодействия уменьшаются настолько, что реальный газ практически не отличается от идеального.

Преобладание тех или иных сил межмолекулярного взаимодействия сказывается на конечном температурном эффекте дросселирования.

Если перед расширением газ находится в таком состоянии, что преобладают силы взаимного притяжения молекул, то в процессе дросселирования происходит понижение температуры; если преобладают силы отталкивания, то температура повышается.

Кроме рассмотренных выше факторов, на температурный эффект дросселирования оказывает влияние трение газа о каналы дроссельного устройства. Теплота трения полностью переходит в кинетическую составляющую внутренней энергии газа, что ведет также к повышению его температуры. Однако нагревание, связанное с трением потока, обычно невелико и не вносит решающего вклада в окончательный температурный эффект дросселирования.

Проведем оценку влияния реальности газа на температурный эффект дросселирования.

Приближенно свойства реальных газов могут быть описаны известным уравнением Ван-дер Ваальса.

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (10)$$

В этом уравнении силы взаимного притяжения молекул учитываются поправкой $\frac{a}{v^2}$, а конечный объем молекул, пропорциональный силам отталкивания, — величиной b .

Величины a и b — постоянные, определяются из эксперимента и зависят только от природы вещества. При $a=b=0$ уравнение Ван-дер-Ваальса превращается в уравнение Клапейрона для идеальных газов.

С помощью уравнения Ван-дер-Ваальса можно приближенно оценить, в каких случаях следует ожидать охлаждения или нагревания газа в процессе дросселирования. Так, если силы взаимного притяжения между молекулами малы и ими можно пренебречь, то уравнение Ван-дер-Ваальса примет вид:

$$p(v - b) = RT \quad (11)$$

Подставив значение pv из (11) в (9), получим:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2 = R(T_1 - T_2) + b(p_2 - p_1) \quad (12)$$

Как показывают опыты, проведенные с реальными газами, во всех случаях при дросселировании изменение температуры значительно менее интенсивно, чем давления. Поэтому независимо от знака $T_2 - T_1$ величина Δu будет положительна. Это означает, что в процессе дросселирования реального газа, у которого силы взаимного притяжения молекул невелики, внутренняя энергия u , а, следовательно, и температура T возрастают.

Поскольку расширение газа всегда уменьшает силы межмолекулярного взаимодействия, а, следовательно, и потенциальную энергию, то можно утверждать, что в рассмотренном выше случае произошло преобразование потенциальной энергии в кинетическую.

Если в уравнении Ван-дер-Ваальса пренебречь величиной b и провести аналогичные преобразования, как это было сделано в предыдущем случае, то получим:

$$\Delta u = u_1 - u_2 = p_1 v_1 - p_2 v_2 = R(T_1 - T_2) + a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right) \quad (13)$$

Пренебрегая в первом приближении (независимо от знака ΔT) в правой части (13) первым слагаемым, находим, что Δu отрицательно. Следовательно, газ в процессе дросселирования охлаждается. В этом случае силы притяжения тормозят движение молекул при их удалении друг от друга. Таким образом, если силы притяжения между молекулами имеют большее значение, чем конечный объем молекул, то в процессе дросселирования наступает охлаждение газа.

В реальных случаях при дросселировании на эффект изменения температуры одновременно влияют как силы взаимного притяжения, так и силы взаимного отталкивания молекул. Следовательно, можно найти такие начальные условия (p, v), когда оба рассмотренных фактора влияют на процесс дросселирования в одинаковой степени, но, естественно, с разным знаком. Отклонение от этих условий в ту или иную сторону приводит соответственно к повышению или понижению температуры в процессе дросселирования.

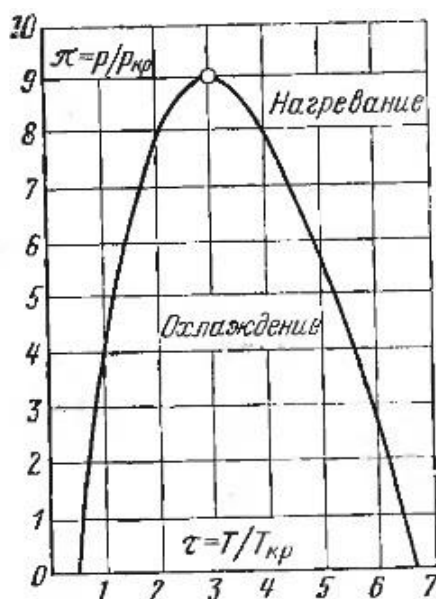


Рисунок 1.4 – График инверсионной кривой

Начальная температура, при которой меняется знак эффекта дросселирования, называется температурой инверсии. Выше этой температуры дросселирование сопровождается повышением температуры газа, ниже — соответственно понижением. Для газов при одном и том же давлении существуют две температуры инверсии: верхняя, которая находится в области сравнительно более высоких температур, и нижняя, соответствующая, как правило, конденсированному состоянию.

Ориентировочно верхнюю температуру инверсии можно найти, подставив значение p_1 из (10) в (9) и приняв газ в конце процесса расширения вследствие его большого объема за идеальный. Тогда после соответствующих преобразований получим:

$$T_1 \approx \frac{2a}{Rb} \quad (14)$$

откуда при известных коэффициентах a и b , а также газовой постоянной R определяется температура инверсии.

На рис. 1.4 показана в приведенных координатах инверсионная кривая для газов, подчиняющихся уравнению Ван-дер-Ваальса.

Внутренняя область, ограниченная кривой инверсии, соответствует охлаждению газов при дросселировании, наружная —нагреванию. Из графика легко определить по известным критическим параметрам ($p_{кр}$, $T_{кр}$) вещества (см. табл. 1), в каком диапазоне давлений и температур дросселирование приводит к понижению температуры.

Несмотря на то что изменение температуры газа с изменением давления при дросселировании невелико, этот процесс нашел из-за своей простоты широкое техническое применение. Так, используя дросселирование, К. Линде в 1895 г. построил первый промышленный ожижитель воздуха.

1.4 Расширение газов с совершением внешней работы

Направив сжатый газ подобно водяному пару высокого давления в турбину или цилиндр поршневой машины, получим в процессе его расширения работу. При этом газ сильно охлаждается. Изменение температуры в таком процессе существенно больше, чем в случае дросселирования при одинаковом перепаде давления.

Машины, предназначенные для расширения газа с отдачей работы, называются детандерами. Слово «детандер» происходит от французского *detente* - расширение.

Рассмотрим процесс расширения газа на примере идеального (без потерь) поршневого детандера. Детандер (рис. 1.5) состоит из цилиндра 1, поршня 2, впускного 3 и выпускного 4 клапанов. Работа расширения газа передается поршню 2, от которого она может быть отведена дальше тем или иным способом.

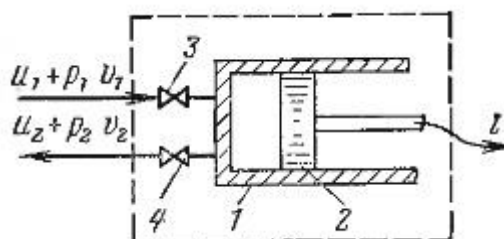


Рисунок 1.5 – Схема расширения газа в детандере

Процесс расширения происходит следующим образом. Когда поршень 2 находится в крайнем левом положении, открывается впускной клапан 3 и газ высокого давления начинает заполнять цилиндр. При этом поршень перемещается вправо. Работу $p_1 v_1$ наполнения цилиндра совершает компрессор, проталкивая газ по трубопроводу к детандеру. После того, как в цилиндр детандера войдет определенная масса газа, клапан 3 закрывается. Вошедший газ расширяется, отдавая работу поршню.

Когда давление в цилиндре снизится с p_1 до p_2 , открывается выпускной клапан 4, а поршень начинает перемещаться справа налево, сообщая газу работу выталкивания, равную $p_2 v_2$.

Таким образом, поршню отдается работа $p_1 v_1$ наполнения и работа расширения газа, а поршень в свою очередь совершает работу над газом, равную $p_2 v_2$.

Если отсутствует теплообмен с окружающей средой и если пренебречь изменением кинетической энергии газа аналогично тому, как это делалось при рассмотрении дросселирования, то для контура (см. рис. 1.5), ограниченного штриховой линией, можно составить следующее уравнение энергетического баланса:

$$u_1 + p_1 u_1 = u_2 + p_2 u_2 + l \quad (15)$$

или

$$\Delta u = u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2 - l \quad (16)$$

где l - работа, отведенная от единицы массы расширяющегося газа. Сопоставив полученное уравнение (16) с (9), нетрудно заметить, что в последнем случае будет всегда со знаком минус, т. е. будет всегда происходить охлаждение газа. Действительно, работа l по абсолютной величине больше нуля, а из (16) следует, что и при равенстве $p_1 v_1$ и $p_2 v_2$ значение $\Delta u < 0$. Значит, и расширение идеального газа с отдачей внешней работы приведет к его охлаждению.

Температуру T_2 в конце процесса расширения для рассмотренных выше условий можно легко определить, используя уравнение адиабаты

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = idem \quad (17)$$

и уравнение Клапейрона

$$p v = R T \quad (18)$$

Подставив значение v из (18) в (17), для начальных и конечных условий процесса получим:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (19)$$

Аналогичным образом можно вычислить температуру в конце адиабатного расширения реального газа. Но так как уравнение состояния реального газа более сложно, чем (18), то и выражение для T_2 будет более громоздким. Обычно для вычисления T_2 пользуются таблицами или диаграммами состояния реального газа, откуда по известным p_1, v_1, p_2 и $S_1=S_2$ легко определить все параметры в конце процесса расширения.

Сопоставим эффекты понижения температуры воздуха при его дросселировании и расширении в детандере. Пусть воздух перед расширением имеет $p_1=20$ МПа, $T_1=300$ К, после расширения $p_2=0,5$ МПа. Процесс расширения в обоих случаях происходит без теплообмена с окружающей средой.

Используя T, s -диаграмму состояния воздуха, получаем, что в случае дросселирования конечная температура T_2 составит 267 К, а при расширении в детандере—100 К.

Таким образом, применив детандер вместо дросселя, можно получить существенно более низкую при прочих равных условиях температуру, чем в случае дросселирования. Однако этот теоретически весьма эффективный и на первый взгляд простой способ понижения температуры оказался чрезвычайно трудно реализовать на практике.

Первые поршневые воздушные машины для получения низких температур были построены в 1840—1850 гг. Но более существенного по сравнению с другими известными способами понижения температуры достигнуть в них тогда не удалось. Этому препятствовал ряд технических трудностей, о которых рассказывается ниже.

В 1857 г. Сименс предложил оригинальную схему ожижения с использованием поршневого детандера. Эта схема (рис. 1.6) заслуживает более подробного рассмотрения. Сжатый газ по центральной трубе 1

поступает в цилиндр поршневого детандера 2, расширяется с отдачей работы на поршень, охлаждается и идет по трубе 3 противотоком прямому потоку.

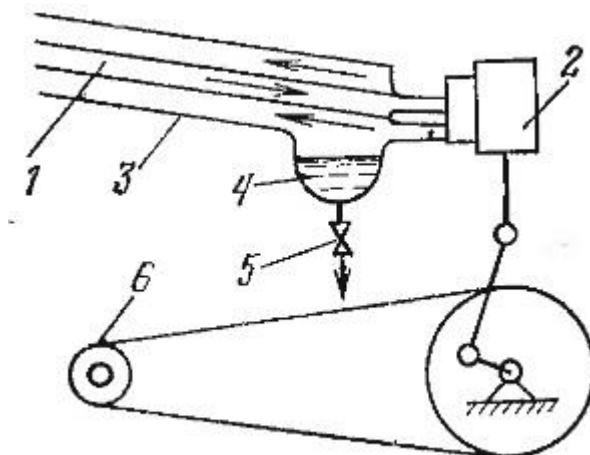


Рисунок 1.6 – Схема охладителя Сименса

Сконденсировавшаяся часть собирается в отделителе жидкости 4, откуда может быть слита через вентиль 5. Обратный поток служит для охлаждения сжатого газа, поступающего в цилиндр машины. Работа, получаемая при расширении, используется для привода электродвигателя 6.

В схеме Сименса сочетаются две блестящие идеи: применение машины (пневмодвигателя) для производства холода и использование полученного холода для понижения температуры поступающего газа. И все же Сименсу не удалось понизить температуру воздуха настолько, чтобы произошла его конденсация.

Казалось, технические трудности, возникающие на пути использования детандера, делают его применение бесперспективным. Вот что писал по этому поводу в 1896 г. известный ученый, построивший первый в мире промышленный охладитель воздуха, профессор Мюнхенского университета К. Линде: «Практическое осуществление этого процесса (теоретически неоспоримого) является сомнительным по следующим причинам. Предположим, что в этом процессе был бы применен атмосферный воздух при той температуре, которая нужна для его охижения; при этой температуре все вещества, содержащиеся в воздухе в качестве примесей:

вода, двуокись углерода и т. п., так же, как и остатки применяемых смазывающих материалов, перешли бы в твёрдое состояние. В этих условиях стала бы невозможной работа цилиндра расширения и его распределительных механизмов. Те лица, которым приходилось работать при таких низких температурах, знают по опыту, насколько трудно в этих условиях управление даже простым вентилем. Вместе с тем было бы чрезвычайно трудно или даже невозможно защитить с необходимой для этих низких температур тщательностью как сам цилиндр расширения, так и его механизмы от влияния внешнего тепла, и, следовательно, этот способ совершенно непригоден для достижения этих низких температур».

Не прошло и шести лет после такого категоричного высказывания, как воздух стали ожижать в промышленных масштабах в установках с использованием детандера. Впервые это осуществил в 1902 г. Ж. Клод. После ряда лет поисков ему удалось достаточно полно очистить воздух от примесей воды и двуокиси углерода. Оказалось также, что поршень в цилиндре можно эффективно уплотнять с помощью специальных манжет из обезжиренной кожи, которая при низких температурах не затвердевает и не требует смазки. Теплоприток из окружающей среды оказался не столь существенным, как предполагал Линде, и не мог решающим образом повлиять на эффективность детандера. Клоду удалось также весьма удачно видоизменить схему Сименса, и получение жидкого воздуха в установке с использованием поршневого детандера стало технически более простым и эффективным.

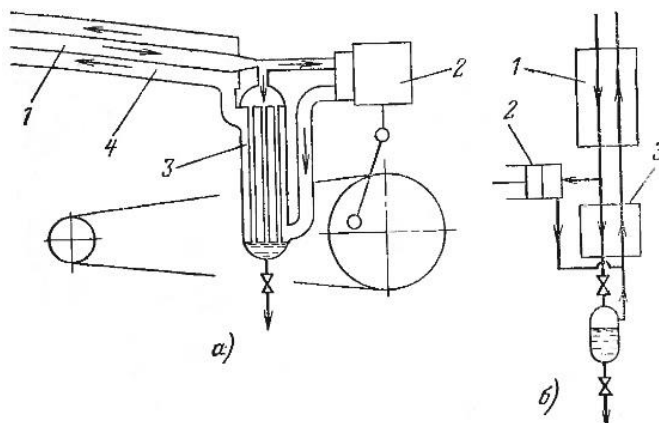


Рисунок 1.7 – Использование поршневого детандера в ожижителе Клода.

а – ожижение воздуха под давлением, б – ожижение воздуха с использованием детандера и эффекта Джоуля-Томсона.

Схема установки Клода показана на рис. 1.7,а. Сжатый воздух проходит по внутренней трубе 1, охлаждается обратным потоком и поступает в детандер 2. Расширенный и охлажденный до еще более низкой температуры воздух поступает в межтрубное пространство теплообменника 3, где нагревается, охлаждая воздух и трубки, и идет противотоком по кольцевому зазору, образованному трубами 1 и 4. В трубках теплообменника 3 воздух находится под давлением прямого потока. Если это давление не превышает критическое, то в общем случае, чем оно выше, тем при более высокой температуре будет происходить конденсация. Поэтому по схеме Клода не обязательно было доводить воздух до состояния конденсации уже в цилиндре детандера. В детандере достаточно было получить такую температуру, при которой могла бы произойти конденсация воздуха, находящегося в трубках под повышенным давлением.

С целью улучшения условий работы поршневого детандера Ж. Клод подверг схему дальнейшему усовершенствованию. Его новая схема (рис.1.7,б) сочетала в себе уже два способа охлаждения: расширение в детандере и дросселирование. Эта схема оказалась настолько удачной, что ее стали успешно применять не только для ожижения воздуха, но и с небольшими изменениями (с использованием дополнительного охлаждения прямого потока) для ожижения других газов, таких как, например, водород, гелий и т. д.

В новой схеме Клода (рис. 1.7,б) прямой поток проходит теплообменник 1 и делится, как и в предыдущем случае (рис. 1.7,а), на две части. Одна поступает в детандер 2 охлаждается при расширении и идет противотоком в теплообменники 3 и 1. Другая часть прямого потока проходит теплообменник 3, где дополнительно охлаждается, и поступает на дросселирование. При дросселировании давление и температура воздуха понижаются и происходит его конденсация. Теперь в детандере не

обязательно получать даже такую температуру, которая обеспечила бы конденсацию прямого потока в теплообменнике 3. Другими словами, в теплообменнике 3 теперь не обязательно добиваться конденсации воздуха прямого потока, а необходимо только охладить его до такой температуры, чтобы при последующем дросселировании наступила конденсация.

Так, остроумно используя сочетание различных способов охлаждения, Ж. Клоду удалось построить высокоэффективную схему ожижения.

Из рассмотрения схем на рис. 1.7 становится ясной важность включения противоточного теплообменника.

Интересно отметить, что идея использования турбины для охлаждения газа, высказанная еще в 1898 г. Рэлеем и Труппом, была реализована только в 30-х годах нашего столетия. Наиболее удачный турбодетандер разработал в 1938 г. академик П. Л. Капица.

1.5 Охлаждение газов при истечении из постоянного объема

В декабре 1877 г. С. Канете проводил опыты по ожижению ацетилена. Этот газ он выбрал, вероятно, потому, что ацетилен мог быть сравнительно легко ожижен известными к тому времени способами. Критическая температура ацетилена равна $+37^{\circ}\text{C}$. Поэтому для его ожижения даже при температуре окружающей среды достаточно было повысить давление всего до 6,8 МПа.

Задача Канете состояла в том, чтобы многократно повторить опыты с одной и той же порцией газа.

Для этой цели он разработал экспериментальную установку (рис. 1.8,а), аналогичную тем, которые использовались его предшественниками. Установка состояла из гидравлического пресса соединенного с помощью трубопровода 2 с толстостенной стеклянной трубкой 3, запаянной с одного конца. Внутренняя полость трубки заполнялась исследуемым газом; снаружи трубка могла охлаждаться смесью 5.

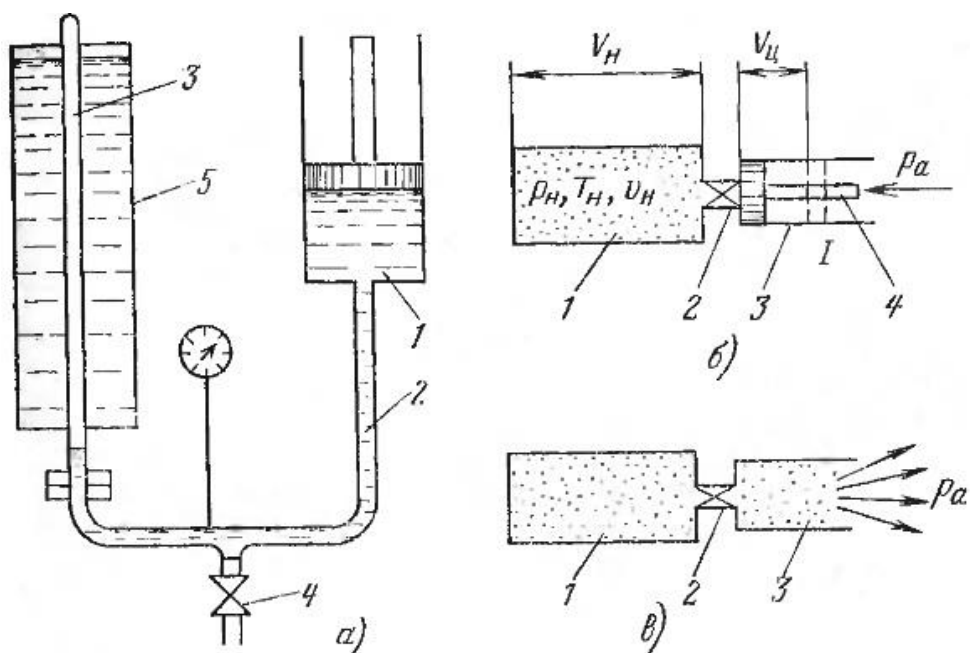


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема Кайете

Для того чтобы вернуть сжатый газ в исходное состояние, в схеме был предусмотрен кран 4, позволяющий выпускать из системы часть жидкости, с помощью Которой производилось сжатие.

В одном из экспериментов, когда давление в системе не достигло еще значения, достаточного для ожижения ацетилена, случайно был открыт кран 4. При этом давление резко понизилось, и Канете успел заметить помутнение содержимого трубки 3. Сначала он предположил, что на стенке трубки сконденсировались примеси влаги или какого-то другого вещества, находящегося в ацетилене. После повторения опыта с заведомо чистым газом было однозначно установлено, что в процессе резкого расширения ацетилена наступает сильное охлаждение, приводящее к его конденсации.

Так был обнаружен весьма эффективный способ охлаждения, представляющий собой расширение газа в процессе его истечения из сосуда постоянного объема. Канете применил этот способ для ожижения газов, считавшихся в то время «постоянными». Результаты не замедлили сказаться. Первыми были ожижены метан, окись углерода и кислород. Затем ожижению подвергся и азот.

Рассмотрим теперь несколько подробнее причину, вызывающую охлаждение газов при их истечении из сосудов постоянного объема. Для этой цели установку Кайете изобразим в несколько ином виде. Стеклянную трубку заменим сосудом 1 (рис. 1.8,в), в котором находится сжатый газ с начальными параметрами p_H, v_H, T_H . Этот сосуд соединим с помощью вентиля 2 с цилиндром 3, в котором поддерживается поршнем 4 постоянное давление p_a , равное атмосферному.

Если открыть вентиль 2, то газ в сосуде 1 будет расширяться до тех пор, пока давление p_H не станет равным p_a . При этом газ, вытекающий из сосуда в цилиндр, перетолкнет поршень вправо. Пусть поршень остановится в положении I, отмеченном штриховыми линиями. Объем, занятый газом в конце расширения, будет равен:

$$V_k = V_H - V_u \quad (20)$$

В процессе расширения газ совершит работу, которую можно определить из уравнения

$$L = p_a (V_k - V_H) \quad (21)$$

Если отсутствует теплообмен с окружающей средой, то совершаемая газом работа осуществляется за счет уменьшения его внутренней энергии. Поэтому для случая, когда температура в рассматриваемой системе (сосуд — цилиндр) после расширения по истечении некоторого времени выровняется, можно записать для 1 кг массы газа следующее уравнение:

$$u_k - u_H = p_a (v_k - v_H) \quad (22)$$

Заменив внутреннюю энергию через энтальпию по уравнению

$$i = u + pv \quad (23)$$

получим:

$$\Delta i = i_H - i_k = p_H v_H \left(1 - \frac{p_a}{p_H}\right) \quad (24)$$

Уравнение (24) справедливо для любого газа и описывает эффект охлаждения всей массы вещества в рассмотренном процессе.

Пользуясь таблицами или диаграммами состояния реальных веществ, можно легко определить из (24) изменение энтальпии, а, следовательно, и температуры.

Для идеального газа, заменив $p_k v_H$ на RT_H и подставив в (24) вместо Δi произведение $c_p \Delta T$ получим:

$$\Delta T = T_H - T_K = \frac{k-1}{k} T_H \left(1 - \frac{p_a}{p_H}\right) \quad (25)$$

Если расширение производилось не до атмосферного давления, а до какого-либо произвольного конечного давления p_k то и уравнениях (24) и (25) p_a следует заменить на p_k .

Мы рассмотрели процесс, в котором после расширения установилось равновесное состояние во всей массе газа. В течение процесса расширения, который происходит довольно быстро и поэтому иногда называется выхлопом, изменение температуры в сосуде и цилиндре идет неодинаково. Действительно, в момент открывания вентиля 2 в цилиндр выталкивается первая бесконечно малая порция газа с температурой, близкой к T_H . Освободившееся в результате выхода первой порции газа место в сосуде занимает оставшийся в нем газ. При этом он расширяется и его температура понижается. Это расширение происходит с совершением работы по выталкиванию выходящего из сосуда газа. Поэтому каждая последующая порция, поступающая из сосуда в цилиндр, будет иметь более низкую температуру, чем предыдущая. И только самая последняя порция поступит в цилиндр практически с температурой газа, оставшегося в сосуде. Эта температура — наинизшая температура T_K процесса. Поскольку в цилиндр поступали порции газа с различной температурой, то в конце процесса в нем образуется смесь с температурой $T_{см}$, значительно большей T_K . А весь газ, оставшийся в сосуде будет иметь температуру T_K , которую для адиабатных условий проведения процесса можно определить по уравнению (19).

Разумеется, если смешать газ, оставшийся в сосуду с тем, который поступил в цилиндр, то получим эффект, описываемый уравнениями (24) и (25).

Если теперь исключить из системы поршень (рис. 1.8,в), то легко можно увидеть, что газ, находящийся в сосуде 1, будет вести себя при расширении точно так же, как и в случае с поршнем. Другими словами, газу в сосуде 1 «безразлично», имеется ли в цилиндре поршень с противодавлением p_a или находится какая-либо другая среда с тем же противодавлением.

Теперь становится понятным, что Канете сначала случайно, а затем и сознательно использовал один из самых эффективных способов охлаждения.

Простота и эффективность этого способа позволили позже Ф. Симону использовать его для ожижения наиболее трудно ожижаемого газа — гелия. Такой ожижитель был построен им в 1932 г., а с 1958 г. этот способ охлаждения нашел также применение в широко известных криогенных установках, называемых машинами Гиффорда — Мак-Магона.

1.6 Другие способы получения низких температур

В предыдущих разделах мы рассмотрели способы получения низких температур, которые нашли наиболее широкое применение в холодильной и криогенной технике. Но имеются еще и другие пути снижения температуры, реализуемые по тем или иным причинам или только в лабораторных условиях, или в сравнительно небольших масштабах в промышленности. Вот некоторый из них.

В 1834 г. Ж. Пельтье установил, что при пропускании электрического тока через контур, состоящий из двух спаянных между собой по концам разнородных проводников, один из спаев охлаждается, а другой нагревается. Следовательно, на одном из спаев можно получить температуру ниже температуры окружающей среды. На этом принципе работают термоэлектрические холодильники. Широкого технического применения термоэлектрическое охлаждение пока не получило из-за низкого к. п. д. процесса. Чаще всего оно используется в небольших кондиционерах для

помещений; значительно реже — для домашних холодильников и других целей.

Эттингсхаузен открыл в 1886 г. эффект термомагнитного охлаждения, который заключается в следующем.

Если через проводник (рис. 1.9), размещенный в постоянном магнитном поле, пропустить электрический ток в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям, то в третьем перпендикулярном направлении в проводнике возникает градиент температур.

Наилучший проводник, на котором получен максимальный градиент температур, представляет собой сплав, состоящий из 97% Bi и 3% Sb . Теоретически на таком проводнике при $T=77\text{ K}$ можно получить $\Delta T=9\text{-}12\text{ K}$ при напряженности магнитного поля примерно 106 A/m .

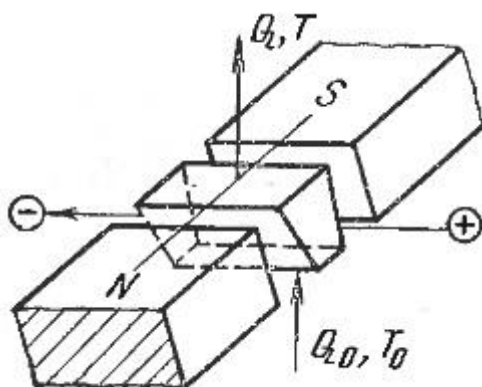


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема термомагнитного охлаждения

Охлаждающие устройства, основанные на термомагнитном эффекте, также не получили пока широкого применения из-за низкого к. п. д. Но они подкупают своей простотой и надежностью в работе, что в ряде случаев может оказаться решающим фактором при выборе способа охлаждения.

Чрезвычайно низкую температуру можно получить, используя охлаждение, возникающее при растворении жидкого ^3He в ^4He . Этот эффект был открыт в 1951 Г. Лондоном. С помощью рефрижераторов, использующих растворение ^3He в ^4He , удастся получать температуру вплоть

до 0,003 К. Однако начальная температура процесса не должна превышать 0,7 К. Наиболее удачный непрерывно действующий рефрижератор был разработан в 1965 г. Б. С. Негановым и др., а рекорд в достижении этим методом наинизшей температуры (0,003 К) принадлежит В. П. Пешкову.

Еще более низкие температуры получают в лабораторных условиях методом адиабатного размагничивания парамагнитных солей. Этот метод был разработан в 1926 г. независимо друг от друга В. Джиоком и П. Дебаем. Его сущность состоит в следующем. Ионы парамагнитных солей можно рассматривать как элементарные магнитик, хаотически расположенные относительно друг друга. При наложении магнитного поля большая часть ионов соли ориентируется вдоль магнитных силовых линий, что приводит к их упорядочению. Это упорядочение (снижение энтропии) идет с выделением теплоты, которую необходимо отводить в процессе намагничивания. Аналогом этого процесса служит изотермическое сжатие газа в компрессоре. Намагничивание осуществляется при температурах 1 — 1,5 К.

Если теперь для соли создать адиабатные условия и снять магнитное поле, то образец сильно охладится. Аналогом процесса адиабатного размагничивания служит расширение газа в детандере.

Наинизшая температура, полученная способом адиабатного размагничивания, составляет 0,001 К. Но и эта температура—не предел, достигнутый в лабораторных условиях. С помощью ядерного размагничивания достигнута кратковременно существующая температура 0,0000012 К. Идея понижения температуры при ядерном размагничивании была высказана К- Гортером и независимо от него Н. Кгорти и Ф. Симоном в 1931 г. В 1955 г. Кюрти осуществил эту идею на практике.

Некоторые элементы, такие как медь, кобальт и др. имеют существенный ядерный магнитный момент. Этот момент меньше, чем у ионов парамагнитных солей, примерно в 2000 раз. Поэтому малейшее тепловое движение нарушает ориентацию в магнитном поле ядерных осей

вращения. В связи с этим ядерное намагничивание удаётся производить только при температурах, значительно меньших, чем 1 К. Обычно исходная температура при ядерном намагничивании (размагничивании) равна 0,01 К. Такую низкую начальную температуру можно получить, например, размагничиванием парамагнитных солей. Следовательно, для того, чтобы получить понижение температуры в рассмотренных последних процессах, необходимо каким-либо другим способом обеспечить крайне низкую исходную (начальную) температуру. Так, для растворения ^3He в ^4He для размагничивания требуется исходная температура на 1—1,5 К выше абсолютного нуля. При ядерном размагничивании исходная температура лежит еще ниже и составляет 0,01 К. Конечно, такие низкие температуры не нашли еще промышленного применения, да и получить их удастся далеко не в каждой лаборатории, но они представляют огромный интерес для различного рода физических исследований.

Кроме этих способов получения низких температур имеются и такие, как десорбционное охлаждение, охлаждение, основанное на эффекте Номеранчука, намагничивание сверхпроводников. Они также используются пока редко даже в лабораторной практике. Желающих с ними познакомиться мы отошлем к специальной литературе.

В последнее время в холодильной технике все чаще начинают применяться вихревые трубы, в которых охлаждение газов основано на эффекте, открытом Ж. Ранком в 1931 г. Этот способ получения низких температур и перспективы его использования подробно рассмотрены в популярной книге А.В. Мартынова и В. М. Бродянского, к которой мы и отсылаем читателей, интересующихся вихревым эффектом.

Рассмотренные способы понижения температуры относятся к внутреннему охлаждению рабочего тела. Понижение температуры при их осуществлении вызвано изменением (уменьшением) таких параметров, как, например, давление или напряженность магнитного поля. При этом происходит как бы самоохлаждение рабочего тела.

Понизить температуру рабочего тела можно также отводом от него теплоты к среде, имеющей более низкую температуру. Так, например, осуществляется охлаждение водой сжатого воздуха в холодильниках после компрессора, охлаждение горячих деталей в воде или масле при их закаливании. Однако среды, к которой можно было бы отвести тепловой поток при достаточно низких температурах в естественных наземных условиях, не существует. Выход находят, создавая ее искусственным путем, используя один из методов внутреннего охлаждения. Так, например, одно из рабочих тел, подвергшихся внутреннему охлаждению, можно использовать для внешнего охлаждения другого рабочего тела.

Внешнее охлаждение чаще всего реализуется двумя способами: каскадным способом понижения температуры и регенеративным теплообменом.

1.7 Использование каскадного охлаждения и регенеративного теплообмена в процессах получения низких температур

Достигнуть желаемой низкой температуры, особенно криогенной, обычно непосредственно не удастся ни одним из рассмотренных выше способов, если ее исходное значение находилось на уровне температуры $T_{0.c.}$ окружающей среды. При такой высокой стартовой температуре охлаждение или в принципе невозможно (например, адиабатическое размагничивание, дросселирование газов, обладающих при $T_{0.c.}$ отрицательным дроссель-эффектом), или крайне неэффективно по технико-экономическим соображениям. Так, если бы мы захотели использовать дросселирование для охлаждения водорода или гелия при начальной температуре $T_{0.c.}$, то получили бы обратный эффект, т. е. нагревание этих газов.

Получение криотемператур при расширении водорода или гелия в детандере от начальной температуры $T_{0.c.}$; теоретически возможно, но неэффективно по технико-экономическим соображениям, поскольку требует высокого исходного давления, трудно реализуемого на практике.

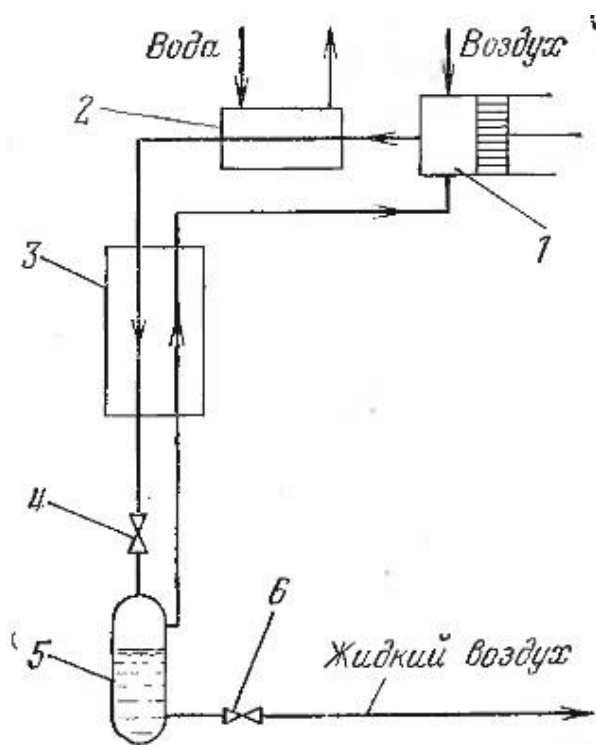


Рисунок 1.11 – Схема Линде

Принципиальная схема двухступенчатого каскадного охлаждения показана на рис. 1.10. Газ А сжимается в компрессоре 1 и охлаждается при температуре, близкой к $T_{0.c}$. Охлаждение до $T_{0.c}$ обычно осуществляется водой или воздухом. Далее через расширительный вентиль 2 охлажденный газ попадает в сосуд 3, в котором поддерживается более низкое давление, например давление всасывания компрессора 1, и температура жидкости становится ниже $T_{0.c}$.

Газ В, сжатый в компрессоре 4, проходит по змеевику через сосуд 3, охлаждается, конденсируется при температуре $T < T_{0.c}$ и собирается в сборнике 5. При прохождении через дроссельный вентиль 6 снижается давление и соответственно температура жидкости. Таким образом, температура жидкости в сосуде 5 становится ниже, чем в сосуде 3. Для достижения еще более низкой температуры количество ступеней каскадов можно увеличить.

В своих опытах по ожижению кислорода Пикте использовал для предварительного охлаждения сжатого газа двухкаскадную установку, работающую соответственно на сернистом газе и двуокиси углерода.

Позже каскадный метод охлаждения был значительно усовершенствован работами Камерлинг-Оннеса и Дьюара. В частности, используя принцип предварительного каскадного охлаждения, Дьюар в 1898 г. впервые ожижил водород, а Камерлинг-Оннес в 1908 г. впервые ожижил гелий.

Каскадный способ ожижения газов в сочетании с другими способами широко используется и в настоящее время. Его главное преимущество заключается в простоте и надежности. Эта надежность обусловлена отсутствием (в схемах без детандеров) движущихся деталей, работающих при низких температурах.

Регенеративный теплообмен занимает особое место в процессах получения низких температур. С его ролью мы уже познакомились при рассмотрении ожижителя Сименса. В этой схеме (см. рис. 1.6) обратный поток служит для предварительного охлаждения следующих порций газа, поступающих в детандер. Охлаждение производится в противоточном теплообменнике. Таким образом, начальная температура перед расширением газа в детандере (внутренним охлаждением) может быть понижена вплоть до конденсации прямого потока, что и использовал Ж. Клод в одной из своих первых установок.

Используя регенеративный теплообмен, К. Линде, как уже упоминалось, построил в 1895 г. первый промышленный ожижитель воздуха, в котором внутреннее охлаждение осуществлялось дросселированием. Схема этой установки показана на рис. 1.11. Сжатый до давления 20 МПа в компрессоре 1 воздух охлаждается сначала в холодильнике 2 водой, а затем обратным потоком в теплообменнике 3.

При прохождении через дроссельный вентиль 4 часть потока обижается и собирается в сборнике 5, откуда через сливной вентиль в отводится к потребителю. Неожигенная часть воздуха направляется в теплообменник 3 для охлаждения прямого потока.

Пусковой период осуществляется следующим образом. Первые порции сжатого в компрессоре воздуха поступают на дроссельный вентиль при температуре окружающей среды $T_{0.c}$. В процессе дросселирования температура воздуха понижается. Однако этого понижения еще недостаточно для ожижения воздуха, и поэтому охлажденный поток целиком направляется в теплообменник. Следующие порции воздуха прямого потока, поступающие на дроссельный вентиль, будут уже охлаждены в теплообменнике 3 обратным потоком и при дросселировании охладятся до более низкой температуры и т. д.

Охлаждение будет продолжаться до тех пор, пока температура прямого потока не снизится до значения, достаточного для того, чтобы при дросселировании образовывалась парожидкостная смесь. После этого начинается накопление жидкости в сборнике 5.

Сочетанием регенеративного теплообмена с внутренним охлаждением можно технически просто осуществить процесс ожижения любого газа.

Понятно, что регенеративный теплообмен в таких установках был бы невозможен без осуществления внутреннего охлаждения, поскольку не было бы источника холодного потока, понижающего температуру газа, поступающего на ожижение. Но возможности регенеративного теплообмена также ограничены. Дело в том, что сжатый охлаждаемый газ имеет почти всегда более высокую теплоемкость, чем обратный расширенный (охлаждающий) поток.

В процессе теплообмена от охлаждаемого потока отводится количество теплоты, равное

$$Q_{np} = m_{np} c_p^{np} \Delta T_{np} \quad (26)$$

где m_{np} , c_p^{np} — соответственно масса и теплоемкость прямого потока; ΔT_{np} — изменение температуры прямого потока при прохождении через теплообменник.

Это количество теплоты Q_{np} воспринимается обратным потоком, что и приводит к его нагреванию:

$$Q_{обр} = m_{обр} c_p^{обр} \Delta T_{обр} \quad (27)$$

где $m_{обр}$, $C_{робр}$ — масса и теплоемкость обратного потока;
 $\Delta T_{обр}$ - изменение температуры обратного потока при прохождении через теплообменник.

Так как $Q_{пр}=Q_{обр}$ можно записать:

$$m_{пр} c_p^{пр} \Delta T_{пр} = m_{обр} c_p^{обр} \Delta T_{обр} \quad (28)$$

Поскольку для газов, используемых в криогенной технике, как правило, $C_{рпр} > C_{робр}$, то из уравнения (28) при равенстве масс прямого и обратного потоков получаем, что $\Delta T_{пр} < \Delta T_{обр}$.

Следовательно, выходящий из теплообменника газ прямого потока будет всегда иметь более высокую температуру, чем входящий в него обратный поток. Другими словами, при регенерации прямой поток не достигает той минимальной температуры, которую имеет обратный поток. Неравенство в изменении температур прямого и обратного потоков увеличивается в еще большей степени при ожижении газов. Действительно, в случае ожижения части прямого потока и вывода из системы продукта в виде жидкости через теплообменник пойдет обратным потоком только оставшаяся неожиженная часть. При этом $m_{обр} < m_{пр}$, что наряду с неодинаковыми теплоемкостями потоков приведет к еще большим различиям в ΔT .

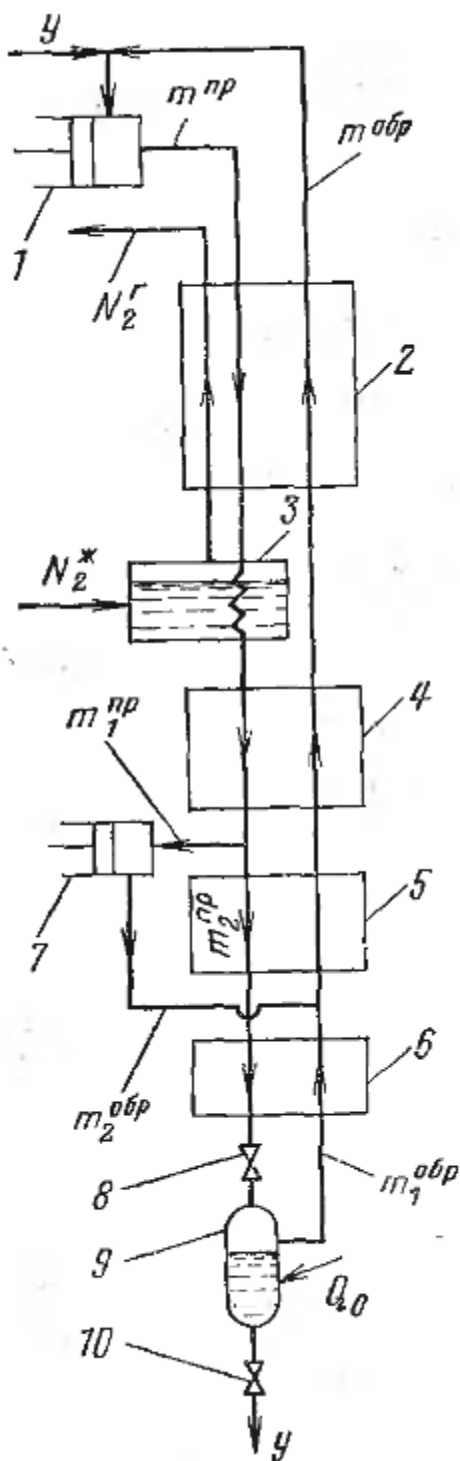


Рисунок 1.12 - принципиальная схема гелиевого ожижителя

По этим причинам одной регенерации часто бывает недостаточно, чтобы понизить температуру прямого потока до нужного значения перед его расширением (внутренним охлаждением). Тогда наряду с регенерацией прибегают к дополнительному (промежуточному) охлаждению прямого потока. Оно производится чаще всего или посторонним источником холода,

или расширением и, следовательно, охлаждением части прямого потока с использованием полученного холода для понижения температуры оставшейся части. Необходимо помнить, что посторонний источник холода в свою очередь создаётся с применением какого-либо способа внутреннего охлаждения.

Наилучшей иллюстрацией применения способов внутреннего и внешнего охлаждения в реальных установках служит принципиальная схема гелиевого ожижителя, предложенная П. Л. Капицей в 1934 г. Эта схема показана на рис. 1.12. Гелий, сжатый в компрессоре 1 поступает в теплообменник 2, где охлаждается, отдавая теплоту обратным потокам. Дополнительное охлаждение прямого потока производится в аппарате 3, в котором теплота от прямого потока отводится к кипящему жидкому азоту, подаваемому из отдельно расположенной криогенной системы.

В теплообменнике 4 охлаждение прямого потока осуществляется только обратным потоком.

Второе дополнительное охлаждение реализуется в теплообменнике 5, где к обратному потоку $m_{1обр}$ присоединяется масса $m_{2обр}$, отведенная через детандер 7 из прямого потока. При расширении газа в детандере происходит его внутреннее охлаждение, и потоки $m_{2обр}$ и $m_{1обр}$ соединяются перед поступлением в теплообменник 5. В этом теплообменнике благодаря отводу части прямого потока на детандер достигается превышение массы обратного потока над прямым. Это компенсирует большую $C_{рпр}$, и следовательно, можно получить в теплообменнике 5 $\Delta T_{пр} > \Delta T_{обр}$. Таким образом, используя внутреннее охлаждение части $m_{1пр}$ газа, в детандере удастся получить холод, используемый для дополнительного понижения температуры оставшейся части прямого потока.

Дальнейшее внешнее охлаждение прямого потока происходит и теплообменнике 6. После этого теплообменника через вентиль 8 гелий поступает на дросселирование, в процессе которого происходит его дальнейшее (теперь внутреннее) охлаждение и частичная конденсация.

Жидкость в количестве u отводится из сборника 9 через сливной вентиль 10; отведенная масса гелия компенсируется дополнительной подачей такого же количества газа на всасывание в компрессор. Так осуществляется ожижение гелия. Существуют и более сложные схемы, но принципы понижения температуры рабочего тела остаются одинаковыми.

По такому же принципу работают и низкотемпературные рефрижераторы—установки, предназначенные для отвода теплоты от охлаждаемого или термостатируемого объекта. Их основное отличие от ожижителей заключается в том, что в рефрижераторах нет вывода из системы сконденсированного газа. Следовательно, в рефрижераторах массы прямого и обратного потоков равны, благодаря чему достигается более эффективное охлаждение прямого потока.

Теоретически для того, чтобы превратить ожижитель в рефрижератор, достаточно прекратить слив сконденсированного газа, а к сборнику жидкости подвести тепловой поток Q_0 от охлаждаемого или термостатируемого объекта (см. рис. 1.13). Конечно, реальная установка при таком переводе с одного режима на другой требует соответствующего регулирования.

В некоторых рефрижераторах рабочее тело вообще не доводят до конденсированного состояния, а отвод теплоты осуществляют охлажденным газом. Примером такого рефрижератора может служить оригинальная установка, работающая по обратному циклу Стирлинга.

На практике часто используют универсальные установки—ожижители-рефрижераторы. Такое комбинирование существенно расширяет возможности использования криогенных установок.

1.8 Разделение газовых смесей методом низкотемпературной ректификации

Особое место занимают установки для разделения газовых смесей методом низкотемпературной ректификации. В них сочетаются различные способы получения низких температур непосредственно с ректификацией (разделением).

Разделение основано на использовании различия в температурах кипения компонентов, входящих в смесь. Поэтому перед разделением смесь должна быть ожижена. Однако в реальных установках часто процессы ожижения и разделения осуществляются одновременно, так что бывает невозможно выделить тот или иной процесс в «чистом» виде.

Низкотемпературная ректификация в принципе не отличается от высокотемпературной. Последовательное испарение и конденсация с соответствующим отводом продуктов разделения приводят в итоге к разделению относительно легко кипящих (имеющих более низкую температуру кипения) компонентов от тяжело кипящих (кипящих при более высокой температуре).

Для осуществления процесса ректификации необходим как подвод теплового потока (в процессе испарения), так и отвод (в процессе конденсации). В этом смысле имеется существенная разница в проведении низкотемпературной и высокотемпературной ректификации.

Если при температурах выше $T_{0.c.}$ осуществить испарение смеси сравнительно легко и просто подводом теплоты, например паровым или электрообогревом и т. д., а отвести теплоту (при конденсации) в окружающую среду также не представляет труда, то при $T < T_{0.c.}$ для этих целей необходимо прибегать к специальным приемам, сочетать ректификацию с низкотемпературными циклами. Поскольку получение и поддержание низких температур обходится сравнительно дорого, то при низкотемпературной ректификации предъявляются повышенные требования к рациональному использованию тепловых потоков.

Примером сочетания различных способов получения низких температур и разделения газовой смеси может служить воздухоразделительная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1.13.

Воздух, сжатый в компрессоре 1 и очищенный от примесей в аппарате 2, поступает в теплообменник 3, где охлаждается обратными потоками

продуктов разделения. После теплообменника 3 поток воздуха делится на две части: одна поступает в детандер 4, а вторая — в теплообменник 5. Благодаря отводу части прямого потока на детандер в «теплой зоне» теплообменника 5 идет охлаждение оставшейся части до более низкой температуры, чем это было бы в случае прохождения через эту зону всего количества воздуха. Включением детандера достигается тот же эффект, что и в рассмотренном выше ожижителе гелия, т. е. достигается превышение массы обратных потоков над прямым. Однако в случае воздуходелительной установки направлять холодный воздух после детандера в обратный поток целесообразнее только после его разделения на компоненты. Строго говоря, в этом случае в обратный поток направляется не воздух, а продукты его разделения, и таким образом в установке реализуется холод, полученный в детандере.

После детандера расширенный воздух доохлаждается в «холодной» зоне теплообменника 5 и вместе с другой частью поступает в нижнюю ректификационную колонну 6, причем поток, имеющий более высокое давление, дросселируется и частично ожижается. Для простоты рассмотрения процесса разделения воздуха примем, что он состоит из двух компонентов — азота и кислорода.

При атмосферном давлении температура кипения азота примерно на 13 К ниже, чем у кислорода (см. табл. 1), и поэтому азот будет легкокипящим по сравнению с кислородом газом. Поднимаясь по колонне 6 вверх, пар последовательно барботирует через слои жидкости, находящейся на тарелках. В результате тепломассообмена поднимающийся пар постепенно обогащается легкокипящим компонентом — азотом. Жидкость, стекающая с вышележащих тарелок на нижележащие, обогащается в результате контакта с паром тяжелокипящим компонентом — кислородом. Таким образом, концентрация легкокипящего компонента в паре по мере движения вверх увеличивается, а его температура уменьшается; температура стекающей вниз жидкости увеличивается.

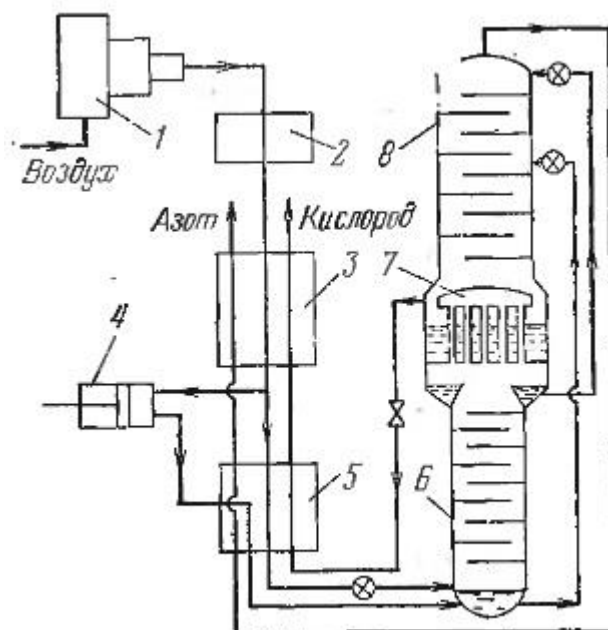


Рисунок 1.13 – Схема воздухоразделительной установки

В конденсаторе 7 происходит конденсация пара легкокипящего компонента и жидкость частично сливается снова в колонну 8, а частично подается на орошение верхней колонны. Так в нижней колонне происходит частичное разделение воздуха на азот, используемый в дальнейшем для осуществления процесса ректификации в нижней и верхней колоннах, и обогащенный кислородом воздух. Этот воздух в жидком виде собирается в нижней части (в кубе) нижней колонны и затем подается на разделение в верхнюю колонну.

В верхней колонне 8 происходит дальнейшее разделение обогащенного кислородом воздуха на азот и кислород. Жидкий кислород, стекающий с нижней тарелки в межтрубное пространство конденсатора, используется для отвода теплоты от конденсирующегося азота. В результате кислород испаряется и частично поступает в верхнюю колонну для осуществления процесса ректификации, а частично выводится из колонны в виде продукта. Окончательно продукты разделения отводятся в газообразном виде и поступают обратным потоком в теплообменные аппараты 5 и 3 для охлаждения прямого потока.

Процесс низкотемпературной ректификации построен так, что испарение и конденсация осуществляются с использованием внутренних тепловых потоков. Для осуществления этого процесса не требуется дополнительных внешних источников теплоты или охлаждения. Так, конденсатор нижней колонны служит одновременно испарителем для верхней. Для отвода теплоты при конденсации легко кипящего компонента (азота) тяжелокипящим (кислородом) необходимо, чтобы кислород имел более низкую температуру, чем азот. Известно, что температура конденсации (кипения) зависит от давления. Поэтому, чтобы сконденсировать азот кипящим кислородом, в колоннах поддерживают различные давления.

Для установки, показанной на рис. 1.13, давление в нижней колонне должно быть больше, чем в верхней. Так как разность температур между конденсирующимся азотом и кипящим кислородом поддерживают в пределах 1,5—2,5, то давление в верхней колонне устанавливается меньше, чем в нижней, на 0,3—0,4 МПа. Обычно давление в верхней колонне воздухоразделительных установок составляет около 0,13 МПа, а в нижней — соответственно 0,5—0,6 МПа.

Мы рассмотрели процесс низкотемпературной ректификации на примере сравнительно простой схемы. По такой схеме делаются воздухоразделительные установки среднего давления (до 4 МПа) и небольшой производительности. Для крупных установок применяются более сложные схемы низкого давления.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЖИЖЕНИЯ АЗОТА

2.1 Модифицированный цикл Клода для ожижителя азота

Модифицированный цикл Клода рассматривается при проектировании ожижителя азота для использования преимуществ как турбодетандера, так и дросселя. Вместо трех теплообменников как в цикле Клода, в данном цикле используются два. Последние два теплообменника в цикле Клода объединяются в один теплообменник.

Азотный ожижитель с турбодетандером состоит из следующих частей:

- Компрессор
- Теплообменники
- Турбодетанден
- Дроссельный клапан
- Сепаратор
- Холодильный шкаф
- Трубопровод
- Контрольно-измерительный приборы

Винтовой компрессор устанавливается для обеспечения сжатым азотом. Теплообменники являются важной частью любого криогенного рефрижератора. Для переноса тепла используются пластинчато-ребристые теплообменники. Турбодетандер является самой важной частью ожижителя и он используется для адиабатного понижения температуры до необходимого значения. Дроссельный клапан используется для изохнтального расширения. Сепаратор используется для отделения жидкого азота от газообразного. Трубопроводы и контрольно-измерительная аппаратура используются необходимы для соединения и управления системой. Целиком установка располагается в холодильном шкафу.

Рисунок 2.1 показывает схему процессов в ожижителе азота. При атмосферной температуре и давлении 1.1 бар чистый азот подается в

винтовой компрессор и сжимается до 8 бар. Сжатый газ проходит через первый теплообменник НХ1. Затем, часть массы отводится в турбодетандер, а вторая проходит во второй теплообменник НХ2 для ожижения. Для облегчения расчета теплообменник НХ2 разделен на две части НХ2а и НХ2б. После теплообменника НХ2 происходит изоэнтальпное расширение в дроссельном клапане, после чего образуется жидкий азот. Жидкий азот отбирается и оставшийся газообразный азот смешивается с азотом, расширенным на турбодетандере и направляется обратно в теплообменники НХ1 и НХ2 и затем в винтовой компрессор.

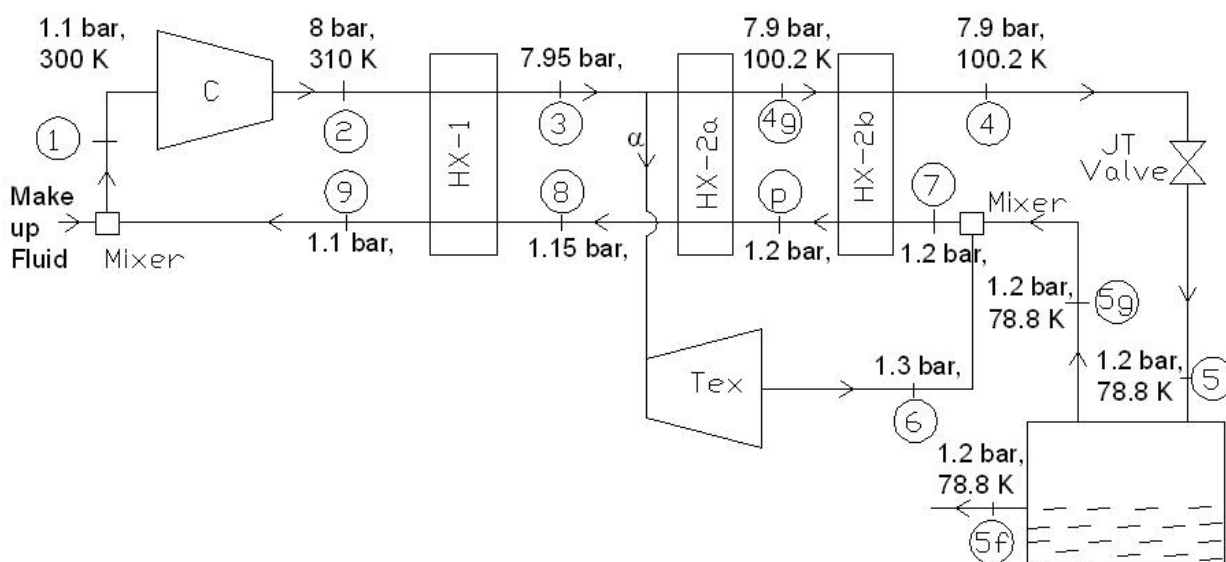


Рисунок 2.1 – Диаграмма процесса ожижения азота

2.2 Шаги расчета процесса

А. Определение известных величин

Чистый азот нагнетается в винтовой компрессор при температуре 300 К и давлении 1.1 бар. Предполагается изотермическое сжатие, но в реальных случаях температура растет. Предположим, что температура возрастает до 310 К, а давление достигает 8 бар.

В основном максимальное падение давления в обоих теплообменниках принимается равным 0,05 бар. Поэтому давление после первого теплообменника принимается равным 7,95 бар. Аналогично, после второго

теплообменника давление принимается равным 7,9 бар. Проходя через теплообменник NH₂ азот в контуре высокого давления переходит в двухфазное состояние. Температура кипения при давлении в 7,9 бар составляет 100,13 К.

Давление внутри сепаратора должно быть немного большим атмосферного, как и давление жидкости, проходящей через сепаратор. Поэтому принимаем давление в сепараторе равным 1,2 бар. Температура кипения азота при давлении в 1,2 равна 78,8 К. Между теплообменником NH₂ и сепаратором расположен дроссельный клапан для изохнтального расширения от давления 7,9 до 1,2 бар.

Часть азота расширяется в турбодетандере до давления 1,3 бар, что дает отношение давлений, равное 6. В этом случае поток внутри турбодетандера не должен достигнуть скорости звука.

Затем смесь нагнетается при давлении 1,2 бар и возвращается в компрессор при давлении 1,1 бар при падении давления 0,05 бар на каждом теплообменнике. Разница давлений обеспечивается на всех элементах установки, так что поток происходит циклически.

В. Варьируемые параметры

Параметры, изменение значения которых влияет на расход жидкого азота на выходе и путем изменения которых будет оптимизироваться процесс:

- 1) Эффективность теплообменника ϵ_1
- 2) минимальный температурный напор в теплообменнике $2 p$
- 3) Эффективность турбодетандера
- 4) Отношение массовых расходов в турбодетандере α

С. Неизвестные переменные

Ниже представлен список переменных, чьи значения необходимо определить

- 1) Энтальпия на выходе из первого теплообменника h_3 ;
- 2) Энтальпия на выходе из второго теплообменника h_4 ;
- 3) Энтальпия на выходе из дроссельного клапана, h_5 ;
- 4) Энтальпия на выходе из турбодетандера, h_6 ;
- 5) Энтальпия на выходе из турбодетандера при изоэнтропном расширении, h_{6s} ;
- 6) Энтальпия после смешения потоков после сепаратора и после выхода из турбодетандера h_7 ;
- 7) Энтальпия на входе во второй теплообменник h_8 ;
- 8) Энтальпия на входе в первый теплообменник h_9 ;
- 9) Степень сухости в сепараторе x_5 ;
- 10) Доля массы жидкого азота к массе сжатого газа, y ;
- 11) Энтальпия в точке минимального температурного напора в теплообменнике в потоке низкого давления h_p

D. Анализ компонентов

Необходимо принять некоторое начальное значение расхода жидкого азота y и энтальпию потока низкого давления на выходе из теплообменника НХ1, $h_9 = \epsilon_1 h_2$.]

Определение точки минимального температурного напора в теплообменнике

Разделим теплообменник 2 на две части. Первой частью будет та часть, где теплый газообразный азот охлаждается до температуры конденсации (100.13 К), а второй частью – часть, где осуществляется конденсация. Точкой минимального температурного напора будет та точка, где начинается конденсация.

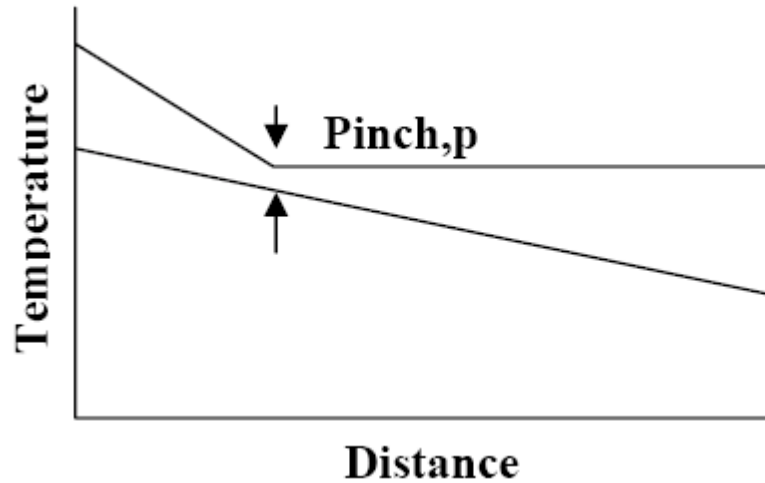


Рисунок 2.2 – определение точки минимального температурного напора теплообменника 2

Для заданного значения точки минимального температурного напора справедливо следующее:

$$T_{4g} - T_p = p,$$

$$T_p = T_{4g} - p$$

Отсюда можно вычислить значение энтальпии h_p при заданном значении температуры и давления.

Теплообменник-1

Для заданного значения эффективности теплообменника 1 и минимального температурного напора для теплообменника 2, значения h_8 , h_3 и h_9 можно посчитать из определения эффективности и энергетического баланса между горячим и холодным потоками для ТО1 и ТО2а.

Предположим, что

$$h_8 = \frac{[h_9(1-y)(1-\alpha) - h_2(1-\alpha) + h_{4g}(1-\alpha) - h_p(1-y)]}{[(-\alpha)(1-y)]}$$

$$h_3 = \frac{[h_{4g}(1-\alpha) + (1-y)(h_8 - h_p)]}{(1-\alpha)}$$

$$h_9 = \varepsilon_1 h_2 + (1 - \varepsilon_1) h_8$$

Рассчитывается новое значение h_9 . Его необходимо сверить с предыдущим значением. Процесс происходит итерационным методом, пока оба значения не будут равны.

Расчет турбодетандера

Диаграмма процесса расширения показана на рисунке. Из него должно быть понятно, что 3-6s – это процесс изоэнтропного расширения, а 3-6 – процесс реального расширения. Значение энтропии для точки 3 может быть найдено из таблицы теплофизических свойств азота для давления p_3 и энтальпии h_3 .

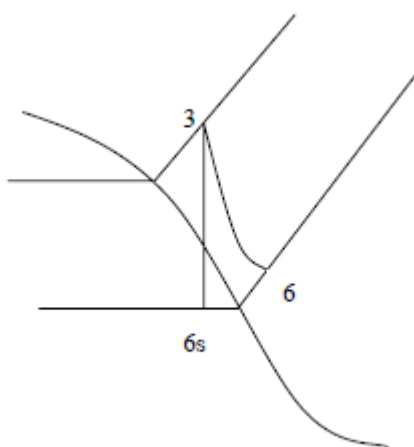


Рисунок 2.3 – Процесс расширения в турбодетандере

Можно определить энтальпию в конце процесса расширения, так как $s_{6s}=s_3$, а энтальпия h_{6s} может быть найдена по известным p_{6s} и s_{6s} .

$$h_6 = h_3 - \eta(h_3 - h_{6s}) \quad (3.6)$$

Расчет смесителя

Применяя уравнение энергетического баланса к смесителю можно найти величину энтальпии на выходе из смесителя

$$(1 - \alpha - y)h_{5g} + \alpha h_6 = (1 - y)h_7$$

$$h_7 = \frac{[\alpha h_6 + (1 - \alpha - y)h_{5g}]}{(1 - y)}$$

Расчет второго теплообменника

Энтальпию на выходе горячего потока можно найти из энергетического баланса между горячим и холодным потоками

$$h_4 = \frac{[h_3(1 - \alpha) - (1 - y)(h_8 - h_7)]}{(1 - \alpha)}$$

Расчет дроссельного клапана

Дросселирование – это процесс, происходящий при постоянной энтальпии. Приравнивая энтальпии до и после дросселирования

$$h_5 = h_4$$

$$x_5 = \frac{(h_5 - h_{f5})}{(h_{g5} - h_{f5})}$$

Расчет итогового массового расхода

Расчет жидкой фракции, получаемой на 1 кг газа, проходящего через дроссельный клапан равен

$$(1 - x_5).$$

Для $(1 - \alpha)$ кг газа, проходящего через дроссельный клапан равен

$$y = (1 - \alpha)(1 - x_5)$$

Проверяем снова рассчитанное значение y с предположенным и рассчитанное значение h_9 с предположенным. Заменяем их новыми

значениями и повторяем расчет до тех пор, пока величины предположенных значений не совпадут с расчетными.

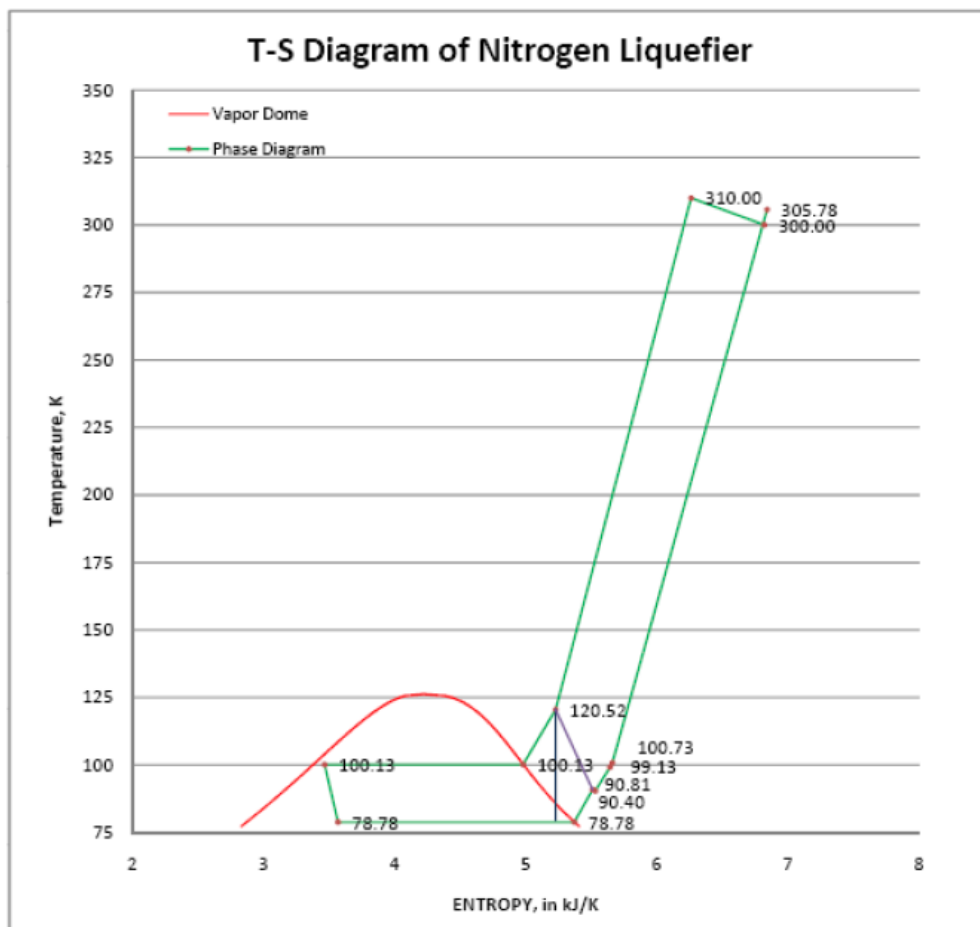


Рисунок 2.4 – T-s диаграмма ожижения азота