

## ЛЕКЦИЯ 4

### Практическая реализация методов ожижения

# Конструкции ожижителей I

Рефрижератор компрессионного типа.

Принцип работы бытового холодильника.

Каскадный метод ожижения газов.

Ожижитель Гемпсона.

Ожижитель Линде.

Дроссели и теплообменники.

# Методы охлаждения

- Все газы могут быть сжижены. Для ожижения газов, которые при комнатной температуре нельзя перевести в жидкое состояние ни при каких повышенных давлениях, необходимо предварительное охлаждение.
- Для предварительного охлаждения обычно используются три метода (по отдельности или комбинированно):
  - испарение жидкости; эффект Джоуля-Томсона и адиабатическое расширение газа с совершением внешней работы.

- *Эффектом Джоуля – Томсона называется изменение температуры газа при его адиабатном расширении дросселированием от одного постоянного давления к другому.*

Изменение температуры неидеального газа в процессе Джоуля-Томсона объясняется тем, что при расширении газа увеличивается расстояние между молекулами и, следовательно, совершается **внутренняя работа** против сил взаимодействия между молекулами.

Для каждого газа имеется своя температура инверсии, при которой нагрев от изменения объемной энергии при дросселировании равен охлаждению от работы против межмолекулярных сил.

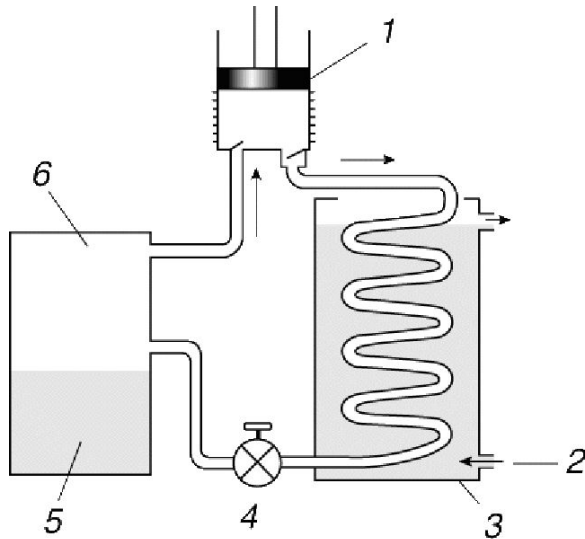
В идеальном газе сил взаимодействия между молекулами нет, поэтому и эффекта Джоуля-Томсона тоже нет.

- *При адиабатическом расширении газа с совершением **внешней работы** происходит **охлаждение газа**.* (например, когда он поднимает поршень).

Причиной охлаждения газа при совершении им внешней работы является уменьшение скоростей молекул при их ударах об удаляющийся от них поршень, которому они передают часть своей кинетической энергии.

Этот вывод в одинаковой мере относится к идеальным и реальным газам.

# Рефрижератор компрессионного типа



## ПАРОКОМПРЕССИОННЫЙ РЕФРИЖЕРАТОР

1 – компрессор; 2 – вода; 3 – бак системы  
водяного охлаждения; 4 – клапан;  
5 – жидкость; 6 – испаритель (криостат).

Сначала выбирается вещество (аммиак  $\text{NH}_3$ , диоксид серы  $\text{SO}_2$ , диоксид углерода  $\text{CO}_2$  или метилхлорид  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), которое можно сжимать при комнатной температуре (температуре водяной ванны) только за счет сжатия.

### Принцип действия

- 1) газ сжимается компрессором так, что превращается в жидкость в змеевике бака системы водяного охлаждения;
- 2) теплота сжатия отводится системой водяного охлаждения;
- 3) образовавшаяся жидкость пропускается через клапан в испаритель, где кипит при пониженном давлении (тепло, необходимое для испарения, отбирается у окружающей среды, возможностями такого отбора тепла определяется холодопроизводительность машины);
- 4) испарившийся газ поступает на вход компрессора и снова сжимается.

# Принцип работы бытового холодильника

1. Мотор - компрессор (1), засасывает газообразный фреон из испарителя, сжимает его, и через фильтр (6) выталкивает в конденсатор (7).
2. В конденсаторе нагретый в результате сжатия фреон остывает до комнатной температуры и окончательно переходит в жидкое состояние.
3. Жидкий фреон, находящийся под давлением, через отверстие капилляра (8) попадает во внутреннюю полость испарителя (5), переходит в газообразное состояние, в результате чего, отнимает тепло от стенок испарителя, а испаритель, в свою очередь, охлаждает внутреннее пространство холодильника.
4. Этот процесс повторяется до достижения заданной терморегулятором (3) температуры стенок испарителя.
5. При достижении необходимой температуры терморегулятор размыкает электрическую цепь и компрессор останавливается.
6. Через некоторое время, температура в холодильнике (за счет воздействия внешних факторов) начинает повышаться, контакты терморегулятора замыкаются, с помощью защитно-пускового реле (2) запускается электродвигатель мотор -компрессора и весь цикл повторяется сначала (пункт 1)

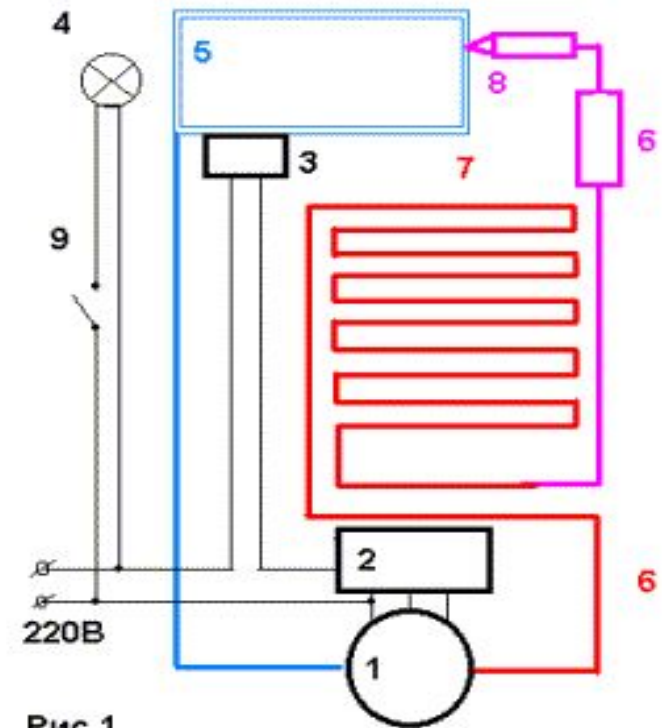


Рис.1

1. Мотор-компрессор
2. Защитно-пусковое реле
3. Терморегулятор
4. лампа освещения
5. Испаритель
6. Фильтр-осушитель
7. Конденсатор
8. Капилляр (дроссель)
9. Включатель лампы

# Каскадный метод охлаждения газов

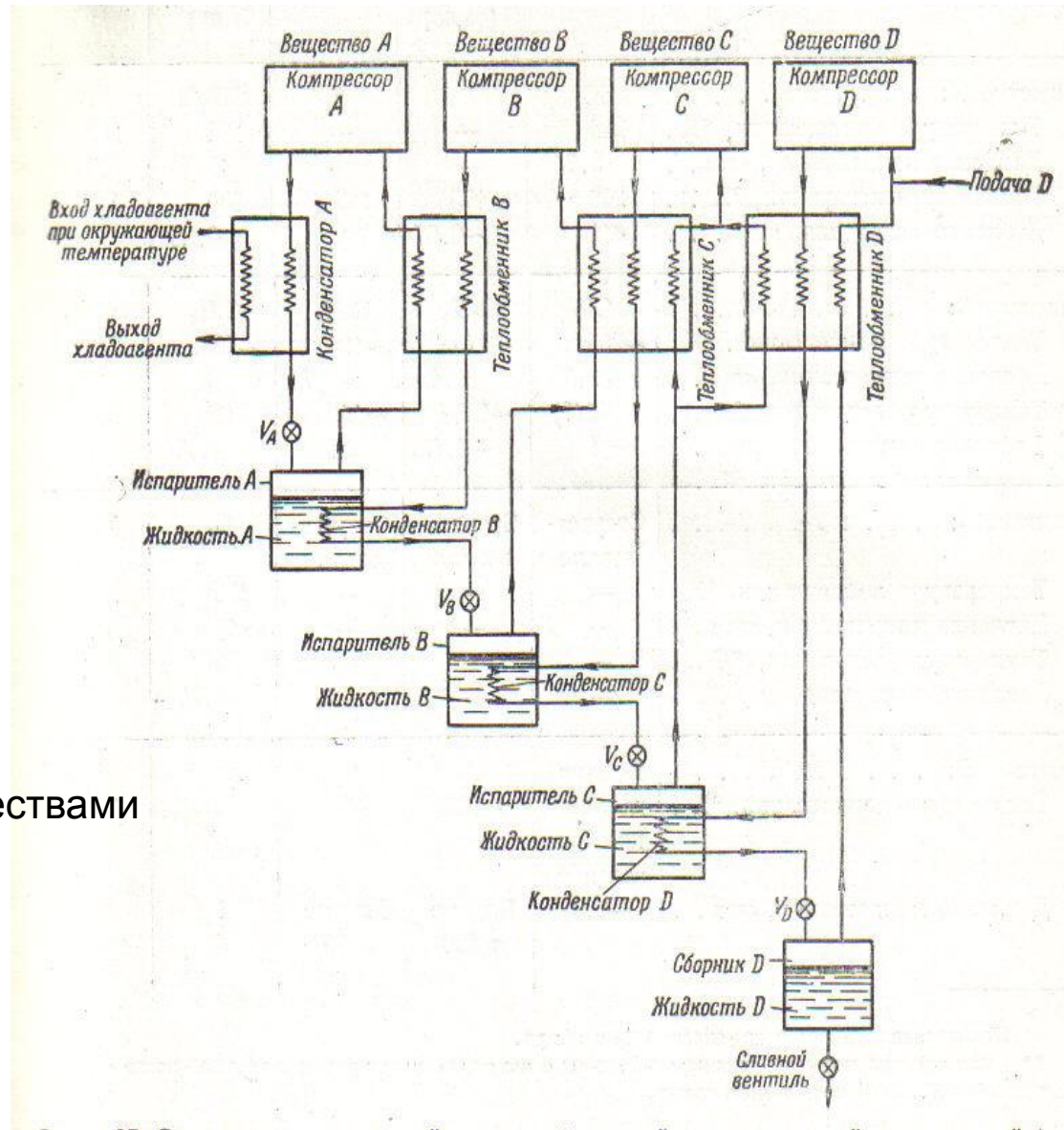
Более низких температур с помощью паровых компрессионных машин можно достичь используя несколько веществ.

Жидкость с низкой температурой кипения конденсируют под давлением с помощью охлаждения при испарении жидкости с высокой температурой охлаждения.

Швейцарским физиком Пикте был предложен **Каскадный метод**.

Суть каскадного метода в том, что температура понижается ступенями при помощи нескольких рефрижераторов компрессионного типа с разными рабочими веществами.

В **схеме Кеезома** рабочими веществами А, В, С, D были соответственно: аммиак ( $T_{\text{кип}}=240 \text{ K}$ ), ( $T_{\text{кр}}=405 \text{ K}$ ) этилен ( $T_{\text{кип}}=170 \text{ K}$ ), ( $T_{\text{кр}}=282 \text{ K}$ ) метан ( $T_{\text{кип}}=112 \text{ K}$ ), ( $T_{\text{кр}}=191 \text{ K}$ ) азот ( $T_{\text{кип}}=78 \text{ K}$ ), ( $T_{\text{кр}}=126 \text{ K}$ )



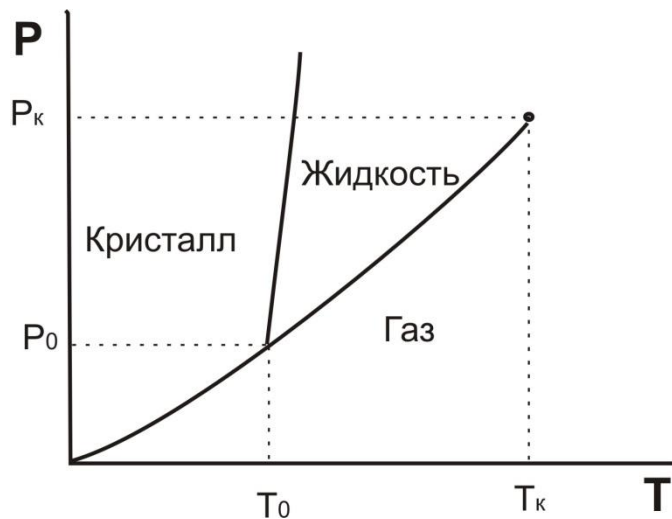
# Испарение жидкости

**Испарение** – переход жидкости в пар, происходящий на свободной поверхности жидкости.

При испарении молекула должна преодолеть силы межмолекулярного сцепления в жидкости. Работа против этих сил (работа выхода), а также против внешнего давления пара, совершается за счет кинетической энергии теплового движения молекул. Поэтому в результате испарения жидкость охлаждается.

При процессе обратном испарению – **конденсации пара** и образовании жидкости, происходит выделение теплоты конденсации и нагрев.

Испарение твердых тел называется возгонкой или **сублимацией**.



метод охлаждения за счет испарения жидкости принципиально ограничен температурами критической и тройной точек.



Газ	$T_k, K$	$P_k, атм$	$T_{тр}, K$	$T_{кип}, K$
He	5,21	2,26	-	4,2
Ne	44,44	25,9	24,57	27,3
Ar	151,1	48,0	83,9	87,4
Kr	210,1	54,0	104	121,3
Xe	289,75	58,2	133	164,0
H <sub>2</sub>	33,2	13,0	14,0	20,4
N <sub>2</sub>	126,1	33,5	63,1	77,3
O <sub>2</sub>	154,3	49,7	54,4	90,1
CO <sub>2</sub>	304	72,4	216	194,6
CH <sub>4</sub>	190,7	46,0	90,7	111,6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	282,4	58,9	104	169,5
NH <sub>3</sub>	405,5	111,5	195,5	239,8
SO <sub>2</sub>	430,3	77,7	200,3	263,1
CH <sub>3</sub> Cl	416,2	65,9	169,6	249,4

# Каскадная схема для ожижения воздуха

**Камерлинг-Оннес** применил трехступенчатый каскадный процесс для ожижения воздуха.

Рабочим веществом **первой ступени** был метилхлорид ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), **второй ступени** – этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ).

Первый испаритель служил для охлаждения входного сжатого этилена второй ступени.

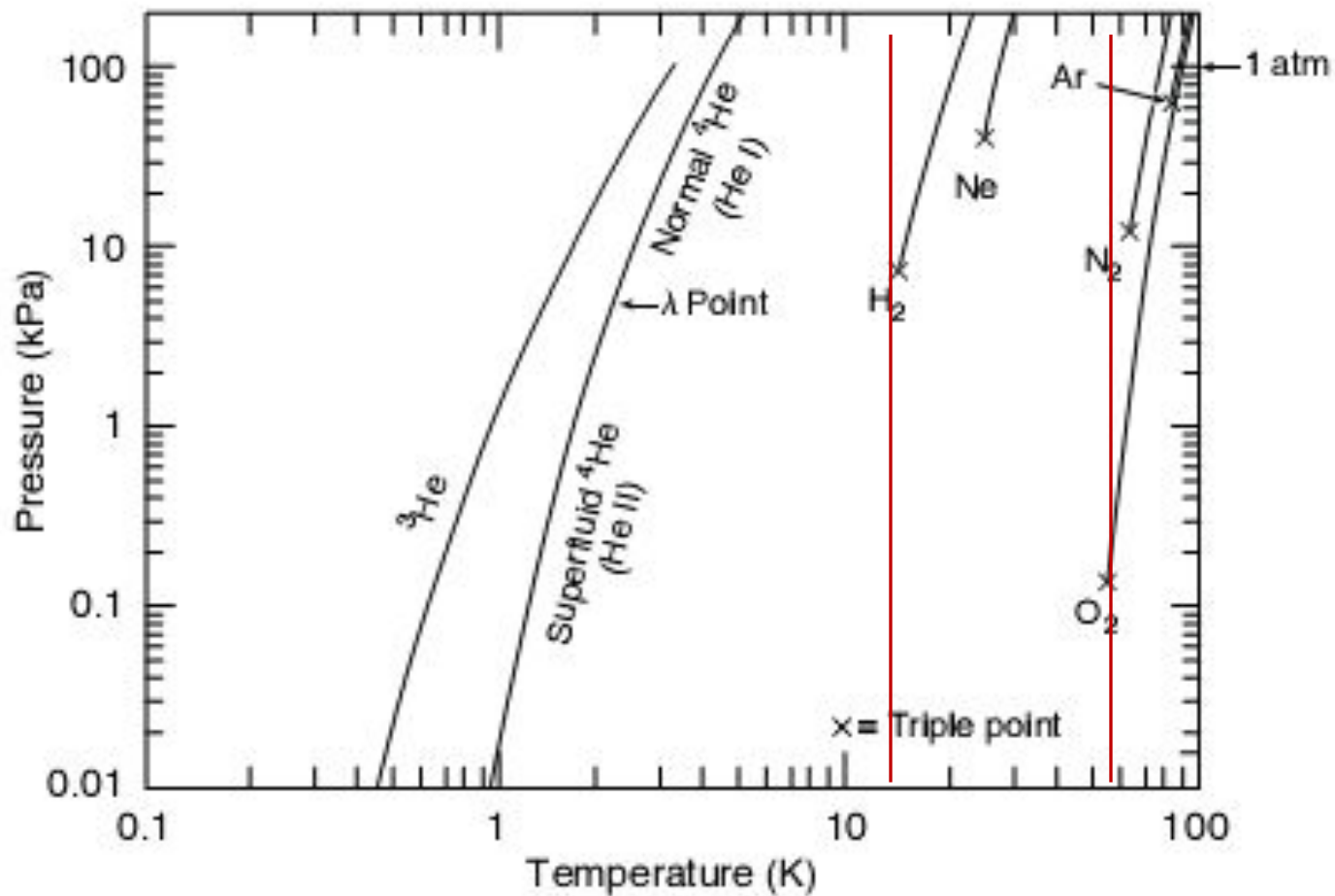
Этилен сжижался в змеевике, погруженном в жидкий метилхлорид (220 К). Испаритель второй ступени поддерживался при температуре около 125 К. В нем сжижался **сжатый воздух третьей ступени**.  
Температура кипения воздуха  $T \sim 80 \text{ К}$ .

**Каскадный процесс непригоден для ожижения водорода и гелия** - нет криогенной ванны, которая обеспечивала бы температуру испарителя, необходимую для ожижения водорода или гелия только путем сжатия. Минимальная температура каскадного процесса – 50-60 К.





# Испарение жидкости





# Ожижитель Гемпсона

В 1895 *У. Гемпсон* (Англия) и *К. фон Линде* (Германия) независимо друг от друга разработали новый метод ожижения воздуха.

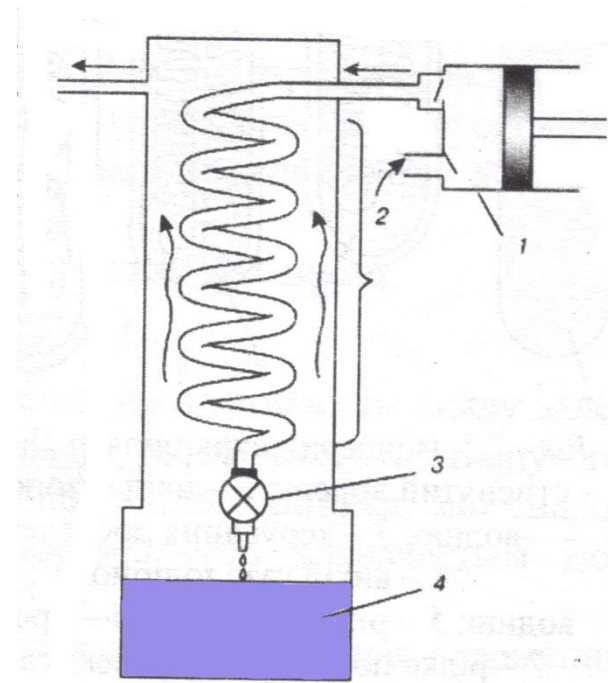
В основной идее их ожижителей был использован **эффект Джоуля-Томсона**.

- Воздух сжимается компрессором до давления 20 МПа и при комнатной температуре подается в теплообменник.
- Сжатый воздух, пройдя по змеевику, истекает через дроссельный клапан и при этом расширяется.
- Поскольку температура инверсии кислорода и азота намного выше комнатной, газ при расширении охлаждается.
- Охладившийся газ возвращается к компрессору уже через рубашку теплообменника, омывает змеевик и охлаждает сжатый воздух, идущий от компрессора.

Теплообменник обеспечивает регенерацию (использование холода, производимого в самом процессе).

Непрерывно циркулируя, газ, истекающий из дросселя, в конце концов охлаждается настолько, что сжижается.

При начальном давлении на клапане, равном 20 МПа, сжижается ~ 8% газа, циркулирующего в установке.



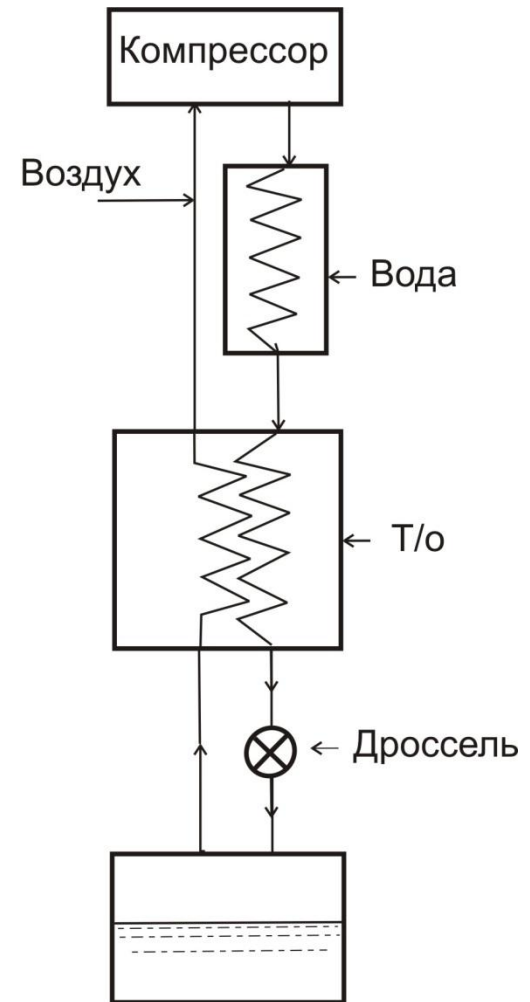
- 1 – воздушный компрессор
- 2 – теплообменник
- 3 – дроссель
- 4 – жидкий воздух

# Ожижитель Линде

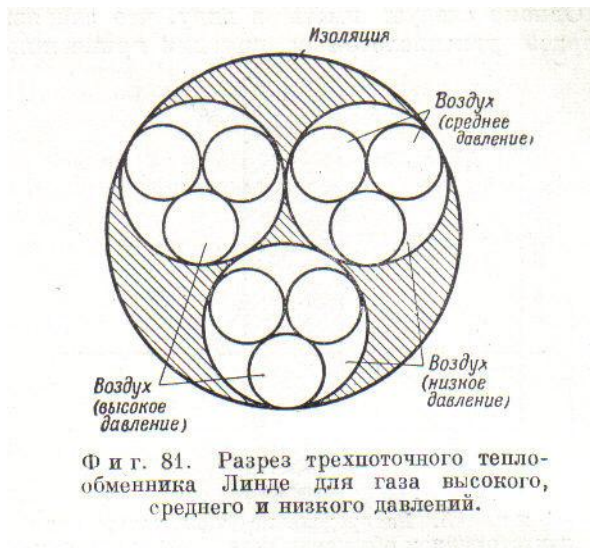
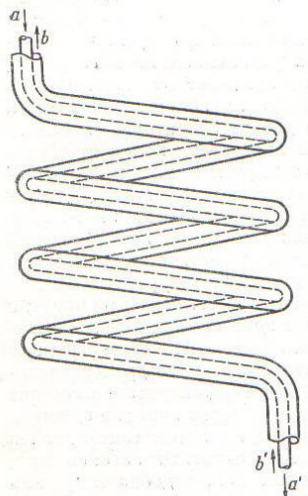
Метод ожижения воздуха, разработанный Линде, отличается от метода Гемпсона лишь конструкцией теплообменника.

- 1) Воздух в компрессоре сжимается до 200 ат. Тепло, выделившееся при сжатии, отводится в змеевике, охлаждаемом водой.
- 2) Сжатый газ проходит через теплообменник к дросселю, где он расширяется при 1 ат. При расширении газ охлаждается (эфф. Джоуля-Томсона), но вначале не сжижается.
- 3) Охлажденный газ возвращается через теплообменник, отдавая холод входящему газу.
- 4) Второй раз газ проходит через теплообменник с более низкой температурой, а при дросселировании охлаждается еще сильнее. И так до тех пор, пока газ не начнет сжижаться.
- 5) Сжиженный газ сливают в сосуды Дьюара.

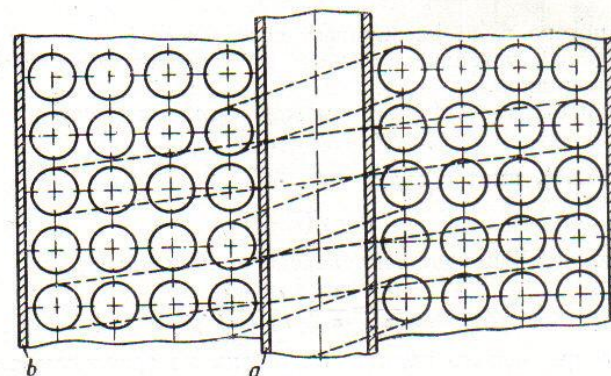
Теплообменник установки Линде состоял из двух стальных труб диаметром 4 и 10 см и длиной 100 м, вставленных одна в другую и свернутых в спираль. Вся система была теплоизолирована овечьей шерстью. Сжатый воздух проходил сначала по внутренней трубе, а затем шел обратно по кольцевому зазору между трубами.



# Устройство теплообменников

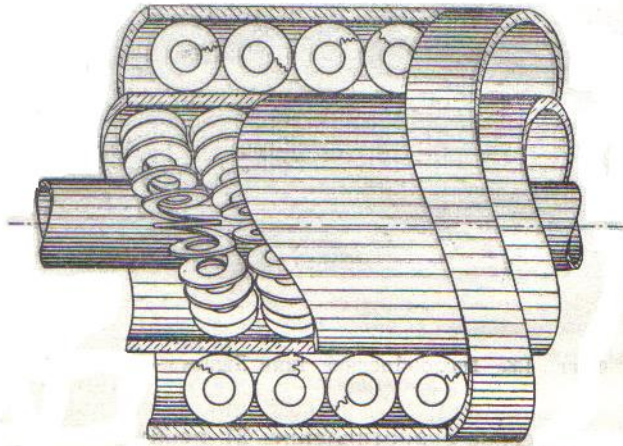


Ф и г. 81. Разрез трехточечного теплообменника Линде для газа высокого, среднего и низкого давлений.

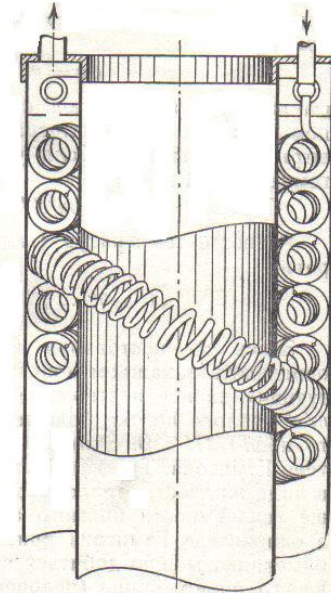


Ф и г. 82. Схема теплообменника Хемпсона.

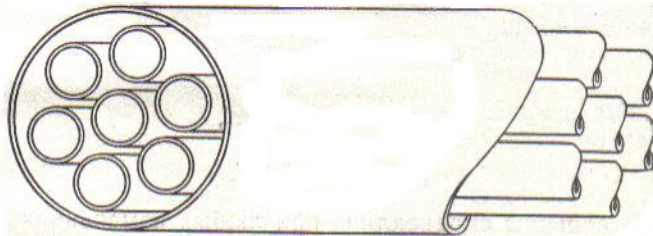
# Устройство теплообменников



Теплообменник конструкции Коллинза.



Теплообменник конструкции Паркинсона.



Теплообменник с несколькими трубками высокого давления.



## Связь единиц давления

Единица	Па	дин/см <sup>2</sup>	пз	бар	атм	ат	мм рт.ст.	psi
1 Па = Н/м <sup>2</sup>	1	10	1E-03	1E-05	9,87E-06	1,02E-05	7,50E-03	
1 дин/см <sup>2</sup> (мкбар)	0,1	1	1E-04	1E-06	9,87E-07		7,50E-04	
1 пз (пьеца)	1E+03	1E+04	1	1E-02	9,87E-03		7,5	
1 бар	1E+05	1E+06	100	1	0,987	1,0195	750	
1 атм	1,01E+05	1,01E+06	1,01E+02	1,01	1	1,0331	760	14,69
1 ат = кг/см <sup>2</sup>	9,81E+04			0,00133	0,96797	1	735,66	14,22
1 мм рт.ст.	133,3	1,33E+03	0,133	1,33E-02	1,32E-03	1,36E-03		
1 psi	6894,8			6,895E-2	0,068			