

## Циклы холодильных установок и термотрансформаторов

### Лекция 17

Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент. Схема и цикл воздушной холодильной установки. Термодинамические свойства рабочих тел парокompрессионных холодильных установок. Схема, цикл и холодильный коэффициент парокompрессионной холодильной установки. Схема и принцип работы абсорбционной холодильной установки.

Цикл теплового насоса – термотрансформатора. Отопительный коэффициент. Термодинамические сравнения эффективности насоса и теплофикации.

Охлаждение тел до температуры ниже температуры окружающей среды осуществляется с помощью холодильных установок (Х.У.), работающих по обратному тепловому циклу.

Главное в Х.У. –

создать условие подвода тепла  $q_x$ :  $T_{\text{при подводе}} \leq T_x$

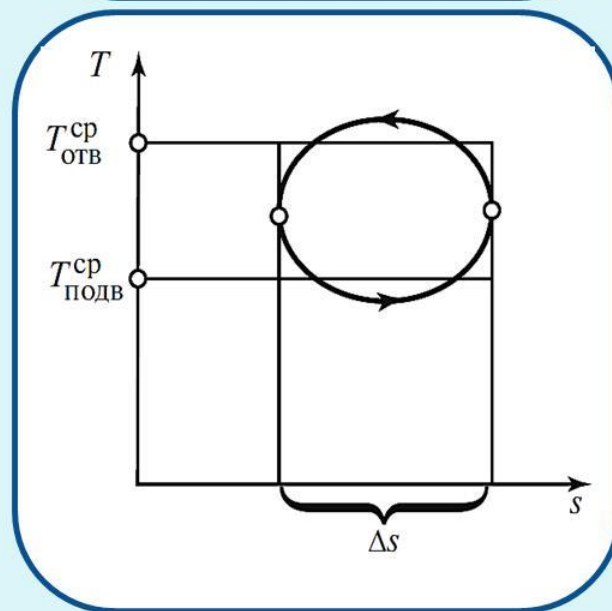
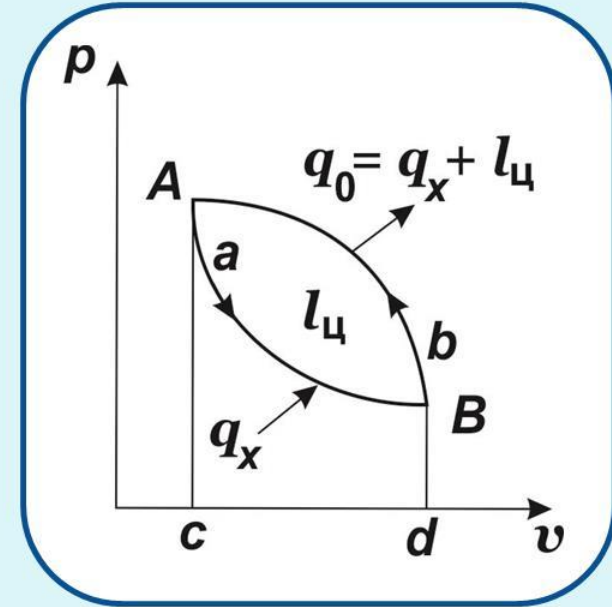
и условие отвода тепла  $q_0$ :  $T_{\text{при отводе}} \geq T_{\text{ос}}$

$$\varepsilon_x = \frac{q_x}{|l_{\text{ц}}|} = \frac{q_x}{q_0 - q_x} \text{ -- холодильный коэффициент}$$

Для обратного цикла необходима работа – тогда нет противоречия со вторым законом термодинамики.

Если между источниками – горячим и холодным одновременно прямой цикл и обратный, то в обратном в обоих – работа  $l_{\text{ц}}$ . В прямом для переноса теплоты из холодного источника к горячему.

Если необратимые потери – то получаемая работа прямого цикла при использовании  $q_1$  меньше работы обратного цикла для передачи теплоты  $q_1$  горячего источника.



Рабочие тела холодильных установок – хладагентами (ХА).

Холодильная установка включает в себя:

- ✓ устройство для сжатия ХА (компрессор или насос);
- ✓ устройство для расширения ХА.

Устройство для расширения ХА

- с совершением полезной работы (в поршневой машине или турбомашине - детандере)
- без совершения ее, т.е. принципиально необратимо (посредством дросселирования или другим, например в вихревой трубке Ранка-Хилша).

Из  $Ts$ -диаграммы следует:

при расширении  $p_1$  до  $p_2$  наибольшее понижение температуры по изоэнтропе.

Поэтому детандеры тщательно теплоизолируют для адиабатного.

Детандеры подразделяются на поршневые (принципиально сходные с поршневым двигателем) и турбинные - турбодетандеры (сходные с турбиной).

$$q_x = T_{\text{подв}}^{\text{ср}} \Delta s = \overline{T_{\text{подв}}} \Delta s$$

$$q_0 = T_{\text{отв}}^{\text{ср}} \Delta s = \overline{T_{\text{отв}}} |\Delta s|$$

$$\varepsilon_x = \frac{\overline{T_{\text{отв}}}}{\overline{T_{\text{подв}} - T_{\text{отв}}}}$$

$$\text{Если есть необратимость, то } |l_{\text{ц}}| = q_1 \eta_t \Rightarrow \eta_t = \frac{|l_{\text{ц}}|}{q_1} \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{1}{\eta_t} - 1$$

$$Q_x = q_x G - \text{хладопроизводительность}$$

$$N_x = l_{\text{ц}} G - \text{подведенная мощность}$$

# Холодильный цикл Карно

$$q_x^{\text{OK}} = T_x \Delta s$$

$$q_0^{\text{OK}} = T_{\text{OC}} |\Delta s|$$

$$\epsilon_x^{\text{OK}} = \frac{T_x}{T_{\text{OC}} - T_x}$$

$$q_x^{\text{HK}} = T_1 \Delta s$$

$$q_0^{\text{HK}} = T_1 |\Delta s|$$

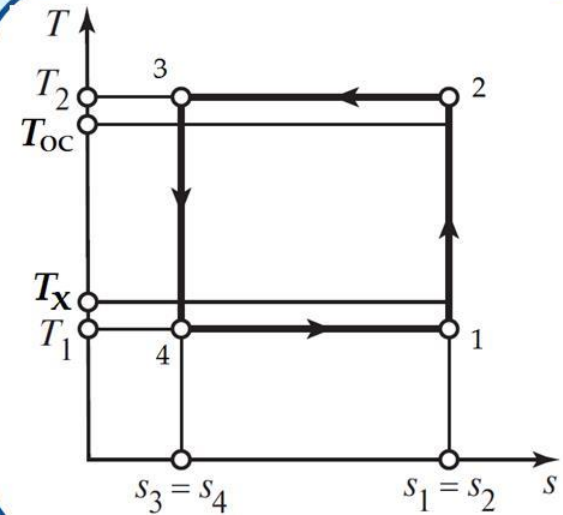
$$\epsilon_x^{\text{HK}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\epsilon_x^{\text{OK}} > \epsilon_x^{\text{HK}} \quad \epsilon_x^{\text{OK}} > \epsilon_x$$

$$\eta_{ex}^x = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_x^{\text{OK}}}$$

$$T_1 = T_x - dT$$

$$T_2 = T_{\text{OC}} + dT$$



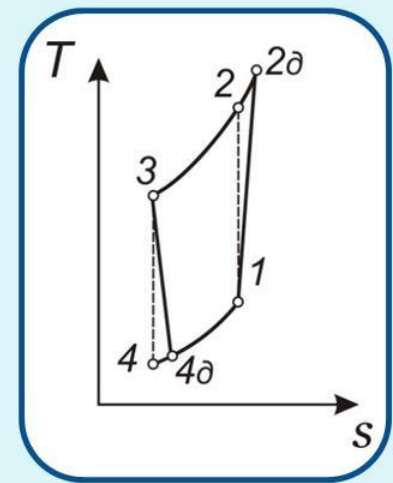
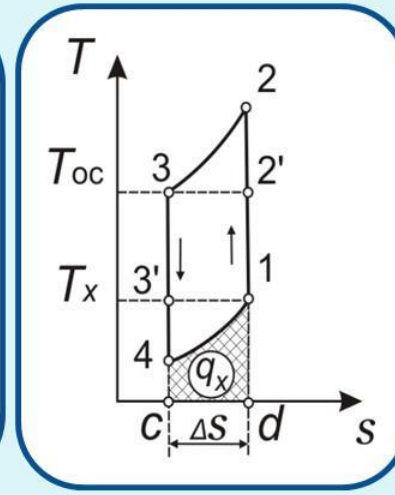
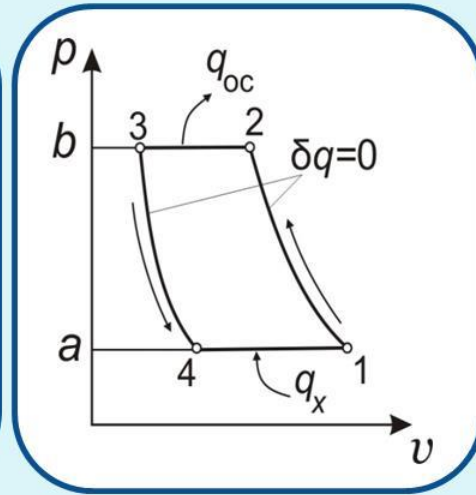
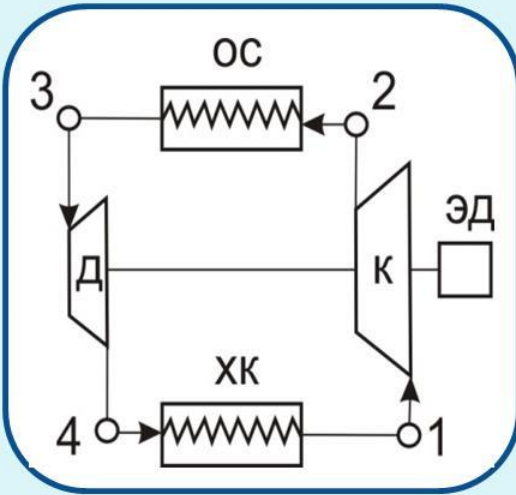
Холодильные установки по хладагенту - на две основные группы:

- газовые (в т.ч. воздушные) - хладагент в состоянии далеком от насыщения;
- паровые – хладагенты пары различных веществ (парокомпрессионные, пароэжекторные и абсорбционные).

Отдельно - термоэлектрические на эффекте Пельтье и на термомагнитные на эффекте Эттингсхаузена (хладагент отсутствует).

Х.У., работающие при температурах ниже 120 К - криогенными.  
 К Х.У. - и устройства для получения предельно низких температур методом, например, адиабатного размагничивания парамагнитных солей.

# Цикл воздушной холодильной установки



$$\eta_{oi}^K = \frac{h_2 - h_1}{h_{2\partial} - h_1},$$

$$\eta_{oi}^D = \frac{h_3 - h_{4\partial}}{h_3 - h_4}$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

$$q_x = c_p (T_1 - T_4) = c_p \left( T_x - T_{OC} / \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

$$q_{oc} = c_p (T_3 - T_2) = c_p \left( T_{OC} - T_x \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

$$|l_{ц}| = |l_{к}| - l_{д} = c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4) = c_p \left( T_x \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} - T_x \right) - c_p \left( T_{OC} - T_{OC} / \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

$$\epsilon_x = \frac{q_x}{|l_{ц}|} = \frac{q_x}{|l_{к}| - l_{д}} = \frac{c_p (T_1 - T_4)}{c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4)} = \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

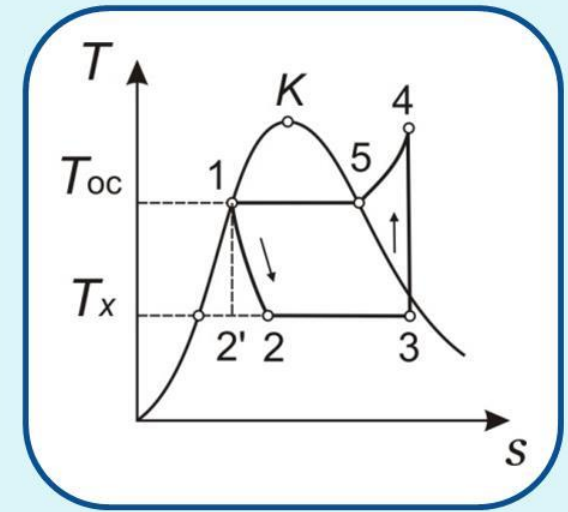
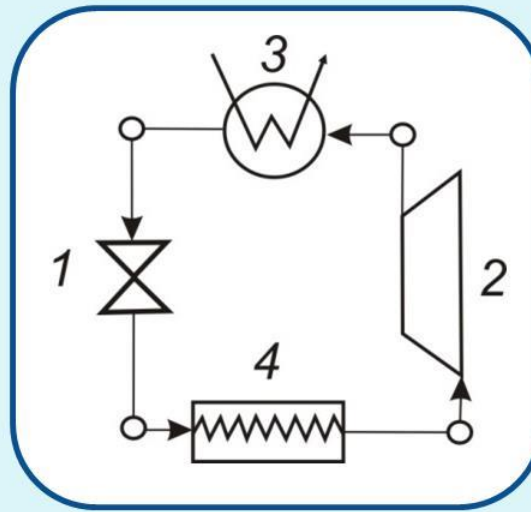
$$\beta \rightarrow 1 \Rightarrow \epsilon_x \rightarrow \infty$$

## Цикл парокомпрессионной холодильной установки

$$|q_0| = h_4 - h_1$$

$$q_x = h_3 - h_2 = T_x (s_3 - s_2)$$

$$|l_K| = h_4 - h_3$$



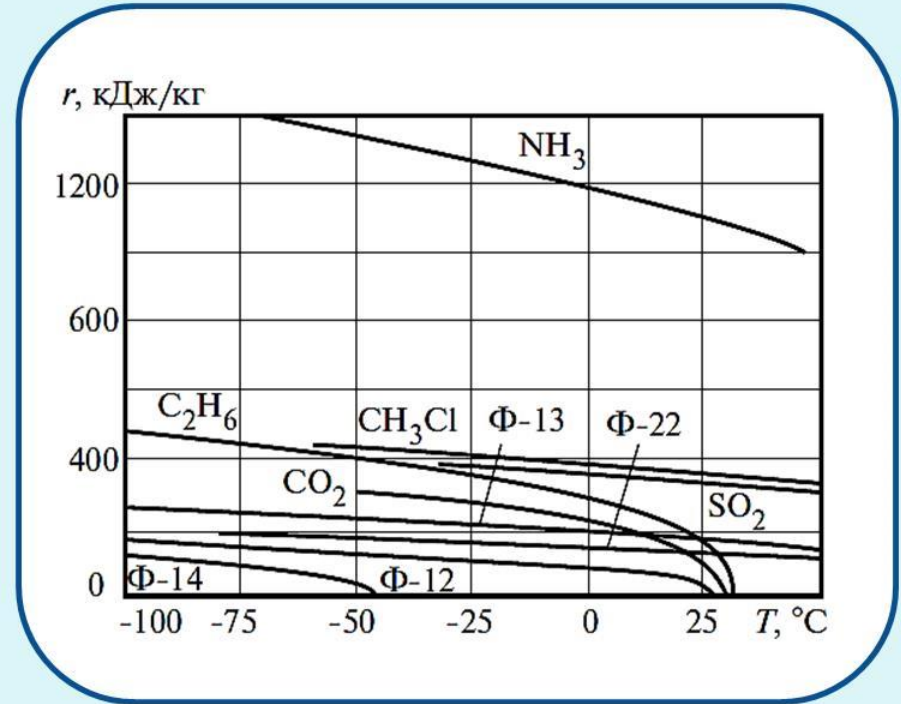
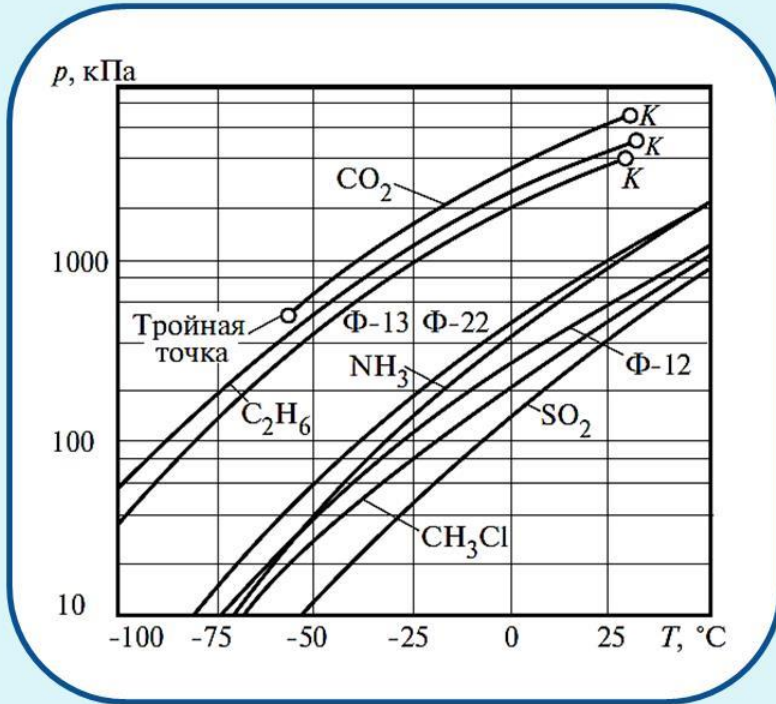
Поскольку в процессе дросселирования  $h_1 = h_2$ , то работа, затраченная в цикле, равна работе компрессора:  $l_{\text{ц}} = l_K = h_4 - h_3$

$$\epsilon_x = \frac{q_x}{|l_K|} = \frac{h_3 - h_2}{h_4 - h_3} = \frac{T_x (s_3 - s_2)}{h_4 - h_3}$$

Впервые парокомпрессионная холодильная установка, работающая на парах эфира, была создана еще в 1834 г. Затем в качестве хладагентов в установках этого типа были использованы метиловый эфир и сернистый ангидрид.

В 1874 г. немецкий инженер **К. Линде** создал аммиачную, а в 1881 г. — с диоксидом углерода парокомпрессионные установки. В 30-х годах прошлого столетия в холодильной технике в качестве хладагентов парокомпрессионных установок были впервые использованы синтезированные в этот период фреоны.

# Наиболее широко применяемые хладагенты



## Сравнение хладагентов

Хладагент	Давление насыщенных паров, кПа		Холодильный коэффициент $\epsilon$	$\frac{\epsilon}{\epsilon^K}$
	при $T_2 = -15\text{ }^\circ\text{C}$	при $T_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$		
Любое вещество в цикле Карно	—	—	5,74	1
Диоксид углерода	2305	7163	2,56	0,447
Аммиак	236	1167	4,85	0,845
Фреон-12	182	744	4,72	0,823
Сернистый ангидрид	81	458	4,74	0,825
Хлористый метил	144	658	4,67	0,817
Пропан	289	1070	4,88	0,850



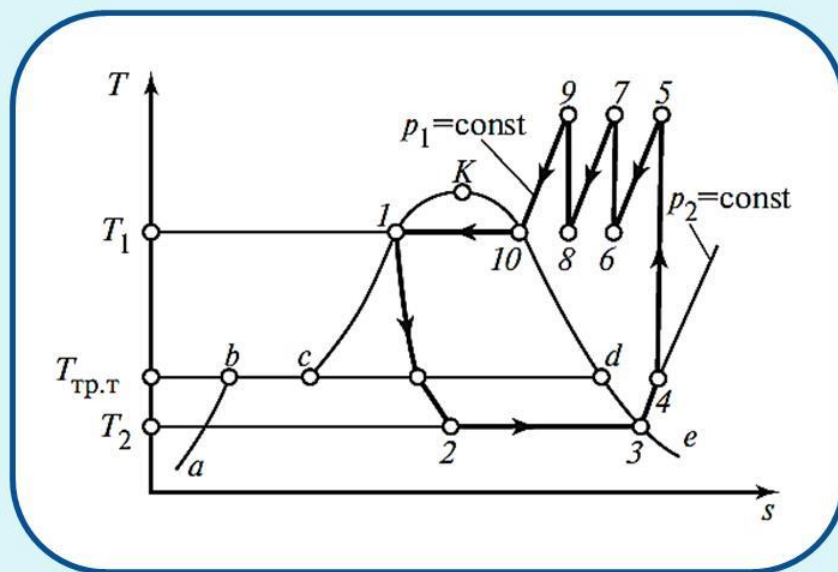
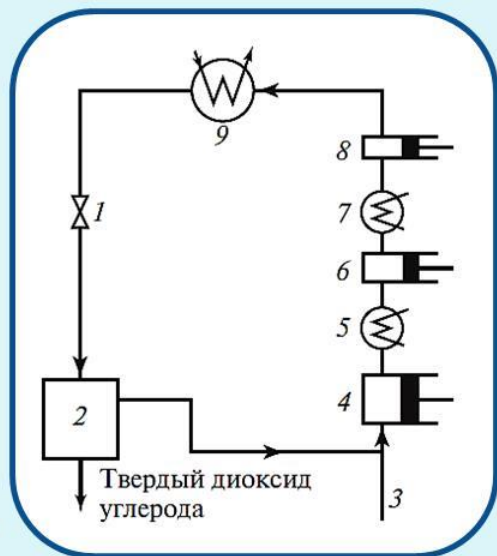
Важным технологическим процессом - получения твердого диоксида углерода (ДУ). Твердый ДУ - в парокомпрессионной холодильной установке, в которой в качестве хладагента циркулирует ДУ. На выходе из вентиля мы получаем двухфазную смесь, состоящую из сухого насыщенного пара ДУ и находящихся в равновесии с ним кристалликов твердой фазы. Убыль ДУ, выпадающей в виде твердой фазы, восполняется добавлением в контур установки новых порций углекислого газа.

Параметры ДУ в тройной точке таковы:  $T_{тр.т} = -56,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $p_{тр.т} = 518 \text{ кПа}$  (5,28 кгс/см<sup>2</sup>).

$p_s$  ДУ при верхней температуре цикла  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$  -  $p_1 = 6430 \text{ кПа}$  (65,6 кгс/см<sup>2</sup>).

Насыщенный жидкий ДУ дросселируется до  $p_2 = 98 \text{ кПа}$  (1 кгс/см<sup>2</sup>) ( $t_s = -78,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), степень повышения давления в компрессоре оказывается весьма большой:  $p_1/p_2 = 65,6$

В настоящее время для получения твердого ДУ - более совершенный цикл с предварительным охлаждением в фреоновом или аммиачном парокомпрессионном цикле



## Цикл пароэжекторной холодильной установки (ПЭХУ)

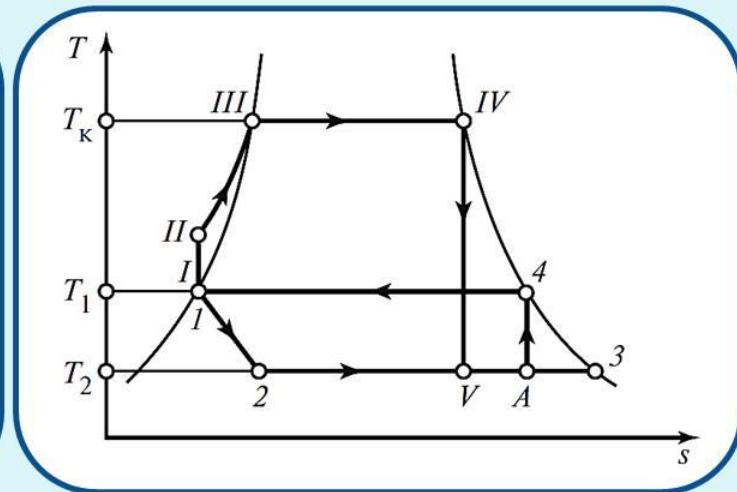
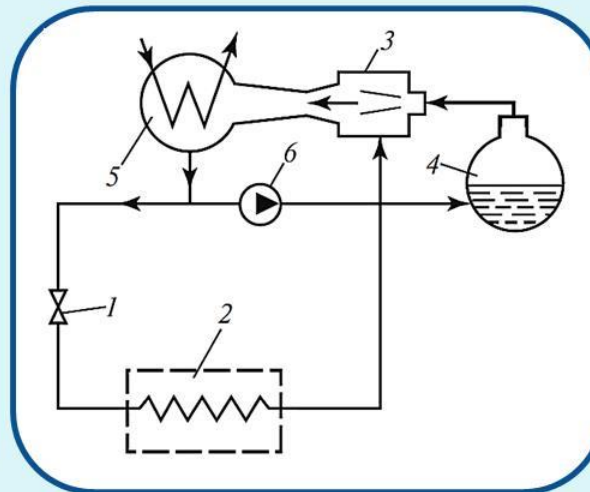
Хладагент - влажный пар. Сжатие пара по выходе из охлаждаемого объема производится паровым эжектором. Поршневой компрессор - весьма громоздкая машина.

$$\xi = \frac{q_x}{q_{ка}} = \frac{h_3 - h_2}{(h_{IV} - h_I)g}$$

Заменяем  $q_{ка} = l^* \eta_t$

$\xi = \varepsilon^* \eta_t$ , где

$$\varepsilon^* = \frac{q_x}{l^*}$$

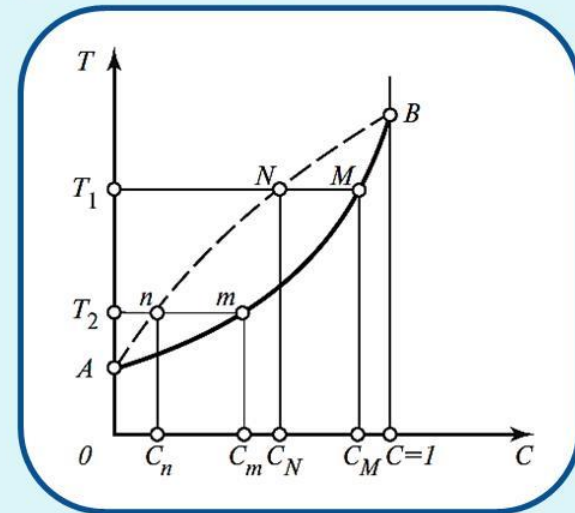


Пар от редукции насыщенной воды в вентиле 1 от давления  $p_1$  до давления  $p_2$  - в испаритель 2, охлаждаемого объема.  $t$  в испарителе может быть ниже  $0,01$  °C если использовать раствор соли. Из 2 пар с высокой  $x$  при  $p_2$  - в 3. В сопло 3 пар из котла 4 с давлением  $p_k$ . Расходы пара в камеру смешения эжектора из испарителя и в сопло эжектора из котла, подбираются так, чтобы давление пара на выходе из диффузора эжектора было  $p_1$ . Из эжектора сухой насыщенный пар в конденсатор 5, где он конденсируется от охлаждения водой. Конденсат при давлении  $p_1$  раздваивается - большая часть воды направляется в холодильный контур, на вход 1, а меньшая часть - к 6, где давление воды до  $p_k$ . Насос 6 воду - в котел. Парообразование за счет теплоты в котле. Отличием ПЭХУ от парокомпрессионной: для привода **компрессора** необходима механическая энергия (от электрического или другого двигателя), а для сжатия пара с **эжектором** - кинетическая энергия пара, образовавшегося в котле.

## Понятие о цикле абсорбционной холодильной установки

Абсорбцией называют поглощение вещества всем объемом поглощающего тела. Как известно, пар чистого вещества может быть поглощен (сконденсирован) этим же веществом в жидком состоянии лишь в том случае, если жидкость имеет температуру меньшую, чем температура пара.

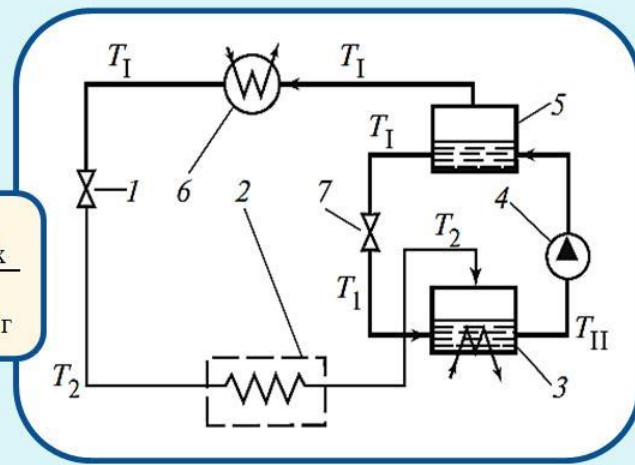
Температура кипения бинарного раствора при постоянном давлении зависит от состава раствора. Она тем выше, чем больше доля компонента с более высокой температурой кипения. В  $TC$  - диаграмме  $C$  — массовая доля высококипящего компонента. Кривая кипения — сплошная линия. Пар, при кипении раствора более богат низкокипящим компонентом. Кривая пара — линия пара в равновесии с жидкостью изображен штриховой линией.



При температуре  $T_1$  в равновесии с жидким раствором состава  $C_M$  находится пар раствора состава  $C_N$ , а при температуре  $T_2$  жидкому раствору состава  $C_m$  соответствует пар состава  $C_n$ . Если теперь пар состава  $C_n$ , имеющий температуру  $T_2$ , привести в соприкосновение с жидким раствором состава  $C_M$  при температуре  $T_1$ , по отношению к которому пар состава  $C_n$  является переохлажденным, то очевидно, что пар будет конденсироваться (абсорбироваться жидким раствором). Давление жидкости и пара в этом процессе одно и то же. Теплота парообразования, выделяющаяся в процессе абсорбции при температуре  $T_1$ , отводится из раствора. Получается раствор состава  $C$ , причем  $C_m < C < C_N$ .

Жидкий  $\text{NH}_4$ , дросселируясь в 1 от давления  $p_1$  до давления  $p_2$ , охлаждается от  $T_1$  до  $T_2$ . Затем влажный пар аммиака поступает в 2, где  $x$  до  $x = 1$  за счет  $q_x$  от охлаждаемого объема. Сухой насыщенный пар аммиака при температуре  $T_2$  поступает в абсорбер 3, куда подается также раствор  $\text{NH}_4$  в воде, имеющий температуру  $T_1$ . При одном и том же давлении вода кипит при значительно более высокой температуре, чем  $\text{NH}_4$ .

$$\xi = \frac{q_x}{q_{\text{пр}}}$$



При одном и том же давлении вода кипит при значительно более высокой температуре, чем  $\text{NH}_4$ , легкокипящим компонентом в этом растворе является аммиак. Этот раствор абсорбирует пар аммиака; теплота абсорбции  $q_{\text{абс}}$  выделяющаяся при этом, отводится водой 1. Концентрация  $\text{NH}_4$  в растворе в процессе абсорбции увеличивается, и, следовательно, из абсорбера выходит обогащенный раствор (при температуре  $T_2 < T_{\text{II}} < T_1$  и давлении  $p_2$ ). С помощью насоса 4, повышающего давление этого обогащенного раствора от  $p_2$  до  $p_1$ , раствор подается в генератор пара  $\text{NH}_4$  5, где за счет теплоты  $q_{\text{пр}}$ , подводимой к раствору от внешнего источника, происходит испарение раствора. Выделяющийся при этом пар значительно более богат  $\text{NH}_4$ , чем раствор, из которого он получается. Практически из раствора выделяется почти чистый аммиачный пар, так как парциальное давление водяного пара в газовой фазе при этих температурах ничтожно мало. Этот аммиачный пар при температуре  $T_1$  и давлении  $p_1$  поступает затем в 6, где он конденсируется, и жидкий  $\text{NH}_4$  в состоянии насыщения направляется в редукционный вентиль 1. Что же касается выходящего из парогенератора 5 раствора, содержание  $\text{NH}_4$  в котором значительно снизилось в результате выпаривания, то этот бедный  $\text{NH}_4$  раствор дросселируется в редукционном вентиле 7 от  $p_1$  до  $p_2$  и затем поступает в 3, где он обогащается  $\text{NH}_4$  за счет абсорбируемого аммиачного пара. При дросселировании в 7 температура бедного раствора практически не изменяется:  $T_1 = T_{\text{I}}$ .

## Принцип работы теплового насоса

Тепловым насосом называют холодильную установку, используемую обычно для подвода теплоты к нагреваемому объему. Такого рода установку называют тепловым насосом потому, что она как бы «перекачивает» теплоту из холодного источника в горячий; в горячий источник поступает теплота  $q_0$ , равная сумме теплоты  $q_x$  отобранной от холодильного источника, и работы  $l_{ц}$ , подводимой извне для осуществления этого холодильного цикла. По существу тепловым насосом является всякая холодильная установка, однако этот термин обычно применяется для обозначения тех установок, главной задачей которых является нагрев теплоприемника.

Отопительный коэффициент

$$\varepsilon_{\text{отоп}} = \frac{q_0}{l_{ц}} = \frac{q_x + l_{ц}}{l_{ц}} = \varepsilon_x + 1$$

Впервые парокомпрессионная аммиачная теплонасосная установка была использована для отопления помещения в 1930 г.

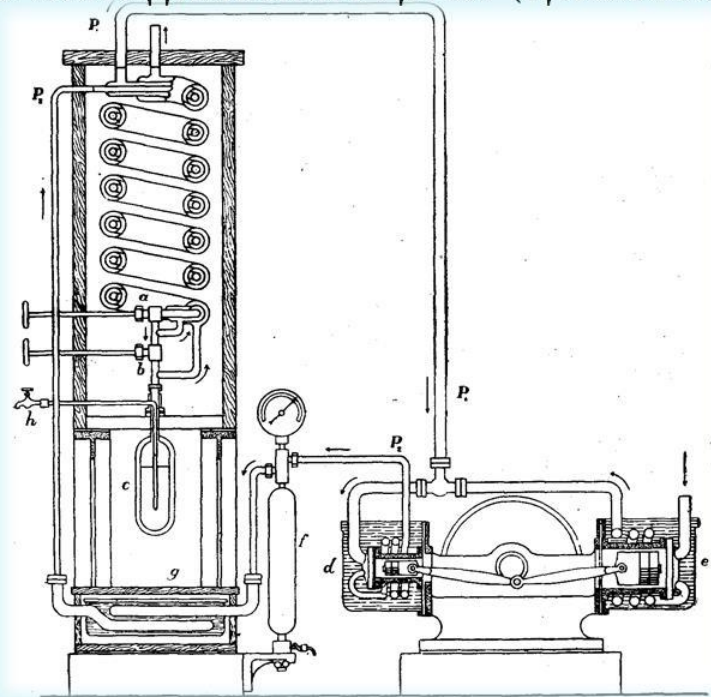
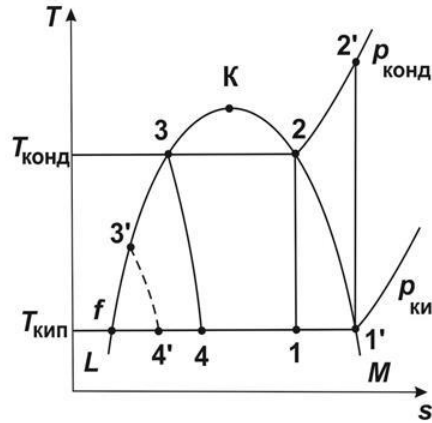
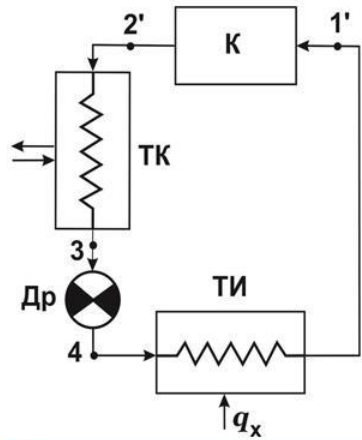
В 1943 г. была сооружена аммиачная холодильная установка, предназначенная для катка с искусственным льдом; при этом вода, охлаждавшая конденсатор этой установки и за счет этого заметно нагревавшаяся, поступала в сеть городского теплоснабжения.

## Методы сжижения газов

$$l_{\min} = T_0 (s_{\text{ВХОДА}} - s_{\text{ВЫХОДА}}) - (h_{\text{ВХОДА}} - h_{\text{ВЫХОДА}})$$

Газ	$T_s$ , К	$T_K$ , К	$l_{\min}$ , кВт·ч/кг	$l_{\Delta}$ , кВт·ч/к
Азот	77,4	126,2	0,220	1,2—1,5
Аргон	87,3	150,7	0,134	0,8—0,95
Водород	20,4	33,0	3,31	15—40
Воздух	78,8	132,5	0,205	1,25—1,5
Гелий	4,2	5,3	1,93	15—25
ислород	90,2	154,2	0,177	1,2—1,4
Метан	111,7	191,1	0,307	0,75—1,2
Неон	27,1	44,5	0,37	3—4
Пропан	231,1	370,0	0,04	~ 0,08
Этилен	169,4	282,6	0,119	~ 0,3

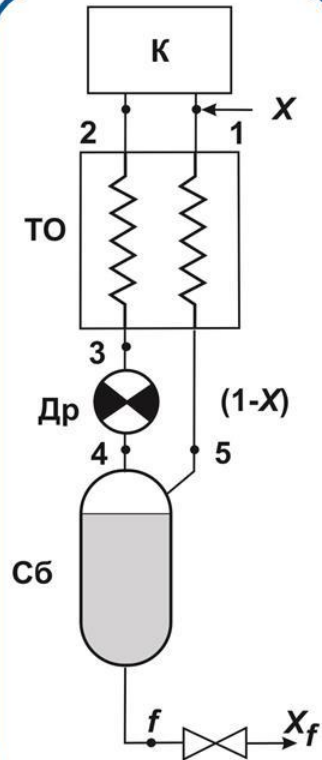
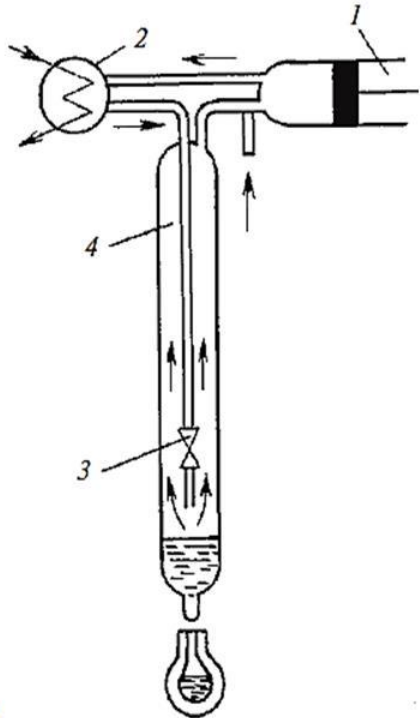
# Схема парокompрессионной машины и ее холодильный цикл (цикл Линде).



В методе Линде (1895г.), сжижение достигается адиабатным дросселированием с предварительным охлаждением газа перед дросселированием.

Пользуясь этим методом английский физик **Д. Дьюар** в 1898 г. **впервые получил жидкий водород.**

Метод Линде был использован и для сжижения гелия, имеющего по сравнению с любыми другими газами самую низкую точку кипения (4,2 К); **впервые жидкий гелий** был получен в 1908 г. голландским физиком **Г.Камерлинг-Оннесом.**



**Линде (Linde) Карл** (1842—1934), немецкий физик и инженер. Получил степень доктора философии в Гёттингенском университете. Профессор Высшего технического училища в Мюнхене. В 1879 основал общество холодильных машин (в Висбадене). В 1895 сконструировал и построил первую промышленную установку для получения жидкого воздуха с использованием Джоуля — Томсона эффекта и усовершенствовал этот процесс введением предварительного охлаждения. В дальнейшем Л. работал над проблемой разделения на составные части смесей различных технически важных газов. В 1902 им создан, а в 1907 существенно усовершенствован непрерывно действующий ректификационный аппарат для разделения воздуха на компоненты. Компания Linde, входящая сегодня в концерн Carrier.



### **Машина Линде для получения жидкого воздуха**

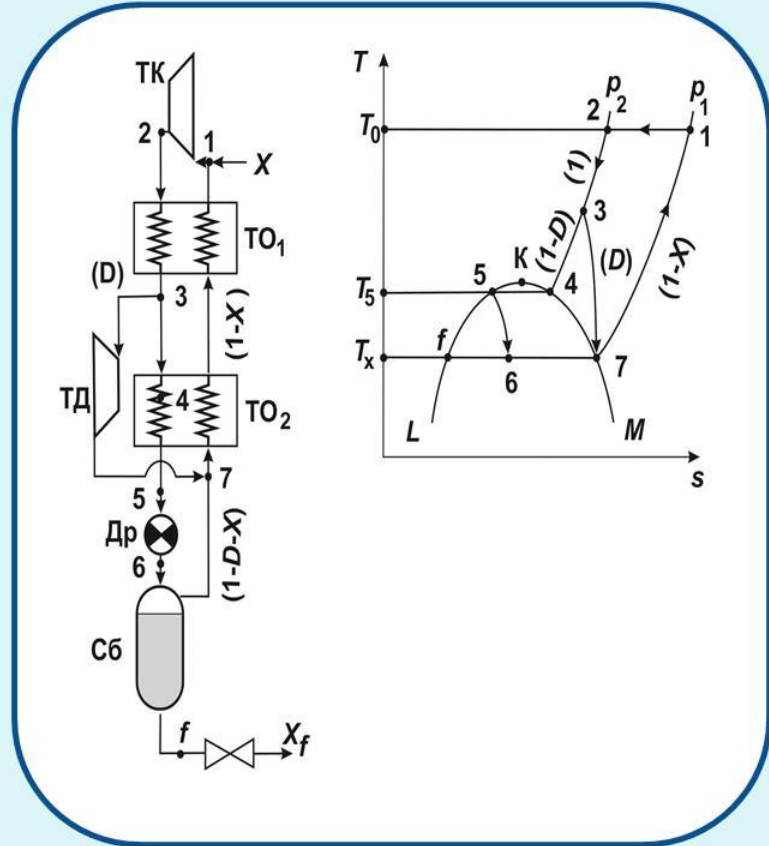
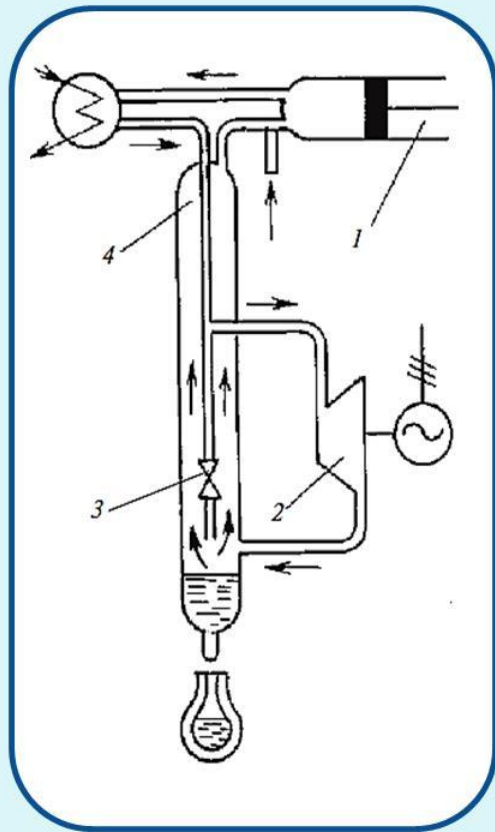
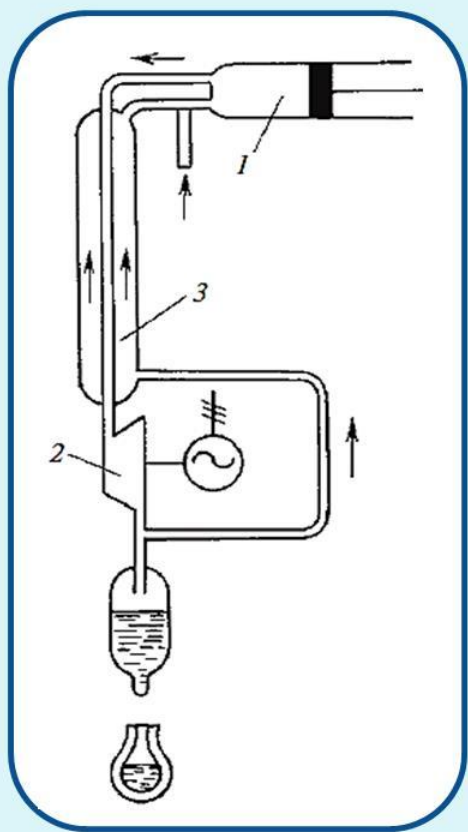
В 1878 г. одна из лекций Карла фон Линде, посвященная термодинамическому циклу великого Сади Карно стала определяющей в жизни Рудольфа Дизеля. Еще тогда он отметил на полях своей тетради: «Изучить возможность применения изотермы на практике». В 1880 г. Карл фон Линде приглашает Рудольфа на работу в парижское отделение своей фирмы.





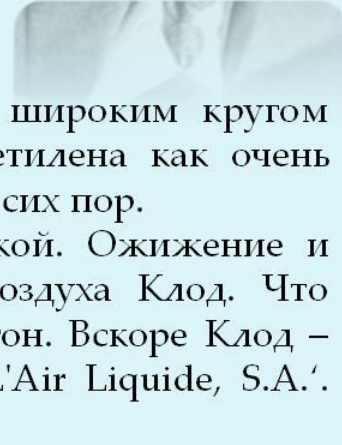
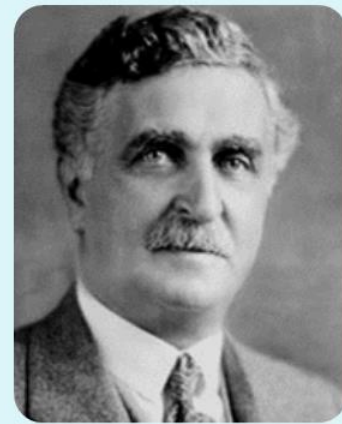
# Ожижительные установки детандерного цикла (метод Клода)

Эффективность работы детандерных ожижителей в большой мере зависит от того, насколько велик внутренний относительный КПД собственно детандера. Коэффициент полезного действия современных поршневых детандеров имеет величину 0,65—0,90, как и турбодетандеров 0,85—0,92. Активно-реактивные турбодетандеры, конструкция которых разработана еще в 1938—1939 гг. советским физиком П.Л.Капицей, являются основой для крупных ожижительных установок.



Клод узнал, что некоторые из ожиженных газов не затвердевают и при  $t < -100^{\circ}\text{C}$ , и решил применить их для смазки поршня детандере.

В 1899 г. - стенд из небольшого вертикального воздушного **поршневого двигателя (детандера)** и теплообменника, в котором сжатый до 1,2 МПа воздух перед поступлением в детандер охлаждался выходящим из него расширенным воздухом. Машина была снабжена обыкновенной масленкой под давлением; по мере охлаждения в масло добавлялся петролейный эфир и быстро перешел черту  $-150^{\circ}\text{C}$ .



**Жорж Клод** (фр. **Georges Claude** 1870-1960 гг.) Разносторонний инженер с широким кругом интересов. Совместно с А. Гесс (1895-1896 гг.) способ хранения и перевозки ацетилена как очень неустойчивого соединения в виде раствора его в ацетоне. Этот способ используется до сих пор.

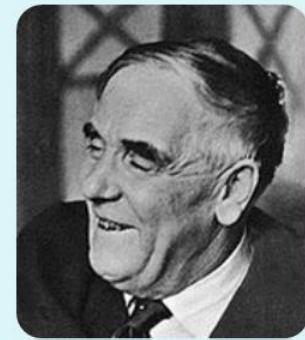
Работа над детандером и его применением связала его навсегда с криогеникой. Ожижение и разделение воздуха стало его основной задачей. В 1902-м система сжижения воздуха Клод. Что позволило получать в промышленных масштабах сжиженный кислород, азот и аргон. Вскоре Клод – вместе с предпринимателем Полем Делорме (Paul Delorme) – создал компанию 'L'Air Liquide, S.A.'. Сейчас эта компания представляет собой корпорацию мультинационального уровня.

Идею для неоновых трубок Клоду подсказали трубки Гейслера (Geissler) и разработанные Дэниэлом Муром (Daniel McFarlan Moore) системы азотного освещения. Созданные Клодом трубки были построены на использовании неона, который довольно активно вырабатывался в качестве побочного продукта его же сжиживающих установок.

Позже Клод провел исследование взрывчатых веществ на основе жидкого кислорода. Кислородная бомба Клода-Д'Арсонваля, к которой мы в дальнейшем еще вернемся, наделала в свое время много шума. Он уделил много сил и использованию кислорода для медицинских целей, применению его в спасательных, а также водолазных костюмах. В 20-е годы он совместно с Бушеро увлекся проблемой создания энергетических установок на основе использования разности температур на поверхности и в глубине океана в южных широтах. Опытная электростанция по системе Клода-Бушеро даже была сооружена на Кубе.

*Жизнь подобна карточной игре,  
в которую ты играешь, не зная правил.*

*Капица Пётр Леонидович*



**Капица Пётр Леонидович (1894—1984), физик, один из основателей физики низких температур и физики сильных магнитных полей.**

Работал в лаборатории затем в физическом институте А. Ф. Иоффе. Первая научная работа (посвящённая получению тонких кварцевых нитей) вышла в 1916 г. в «Журнале русского физико-химического общества».

В 1921 г. Капицу командировали в Англию — в Кавендишскую лабораторию Кембриджского университета, руководимой Э. Резерфордом. Стал директором лаборатории Монда при Королевском научном обществе. Его работы 20-х гг. XX в. посвящены ядерной физике, физике и технике сверхсильных магнитных полей, физике и технике низких температур, электронике больших мощностей, физике высокотемпературной плазмы.

В 1934 г. Капица вернулся в Россию. В Москве им был основан Институт физических проблем АН СССР, пост директора которого он занял в 1935 г. Одновременно Капица стал профессором МГУ (1936—1947 гг.). В 1939 г. учёного избрали академиком АН СССР, с 1957 г. был членом президиума АН СССР.

В 1937 году в ИФП начинает работать физический семинар Капицы — «капичник», как стали называть его физики, когда из институтского он превращается в московский и даже всесоюзный.

Вместе с Н. Н. Семёновым он предложил метод определения магнитного момента атома. Капица первым в истории науки поместил камеру Вильсона в сильное магнитное поле и наблюдал искривление траектории движения альфа-частиц. Он установил закон линейного возрастания электрического сопротивления ряда металлов в зависимости от напряжённости магнитного поля (закон Капицы). Им созданы новые методы сжижения воздуха, водорода и гелия с помощью высокоэффективного турбодетандера.

Капица развил общую теорию электронных приборов магнетронного типа, получил генераторы непрерывного действия — планотрон и ниготрон.

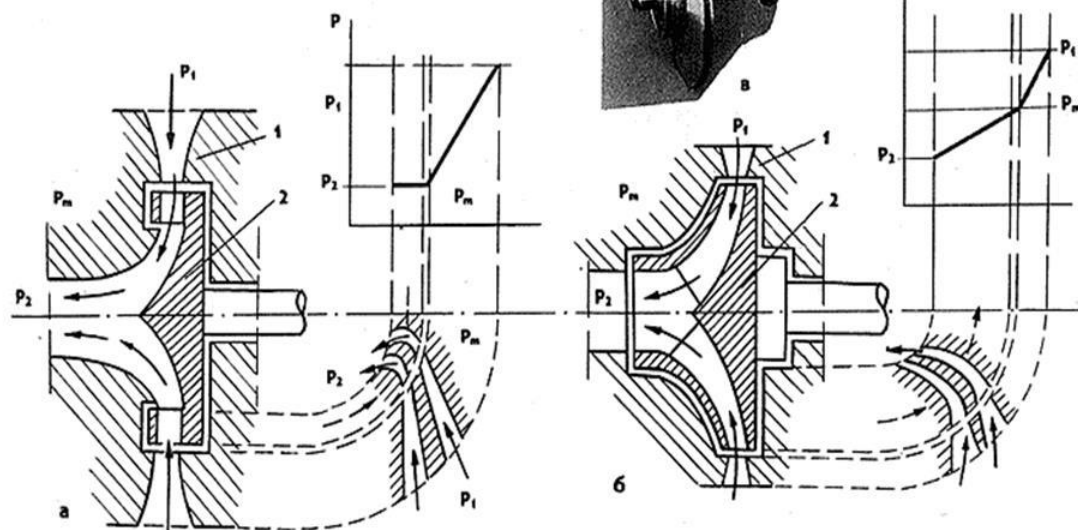
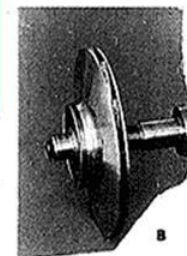
В 1959 г. экспериментально обнаружил образование высокотемпературной плазмы в высокочастотном разряде, предложил схему термоядерного реактора.

Капица дважды стал Героем Социалистического Труда (1945, 1974 гг.) и дважды — лауреатом Государственной премии СССР (1941, 1943 гг.). В 1978 г. ему была вручена Нобелевская премия по физике.

В 1938 г. в Институте физических проблем (ИФП) - небольшой опытный турбодетандер с КПД  $\approx 0.8$  !!! Немецкие и другие специалисты по турбинам не учли разницу в свойствах между водяным паром и холодным воздухом. Они упорно заставляли паровую турбину выполнять не свойственную ей работу. Капица - простое и единственно возможное решение.

**Схема движения потоков газа и распределения давления в активном (а) и активно-реактивном (б, в) турбодетандерах.**

**1 - направляющий аппарат; 2 - рабочее колесо.**



В активном турбодетандере практически весь перепад давлений сбрасывается в соплах направляющего аппарата, где газ разгоняется до скорости звука.

Струи газа на коротких лопатках рабочего колеса меняют направление, и кинетическая энергия газа преобразуется в работу.

В активно-реактивном турбодетандере газ разгоняется в направляющем аппарате до значительно меньшей скорости, чем в активном, а работа совершается не только в результате изменения направления потока газа, но и под действием реакции струи в длинных каналах рабочего колеса (в). Поэтому основные потери - гидравлические, связанные со скоростью газа, в активно-реактивном турбодетандере на 25-30% меньше, чем в активном.

**Пикте Рауль Пьер (Pictet Raoul-Pierre) (1846 – 1929)** — швейцарский физик.

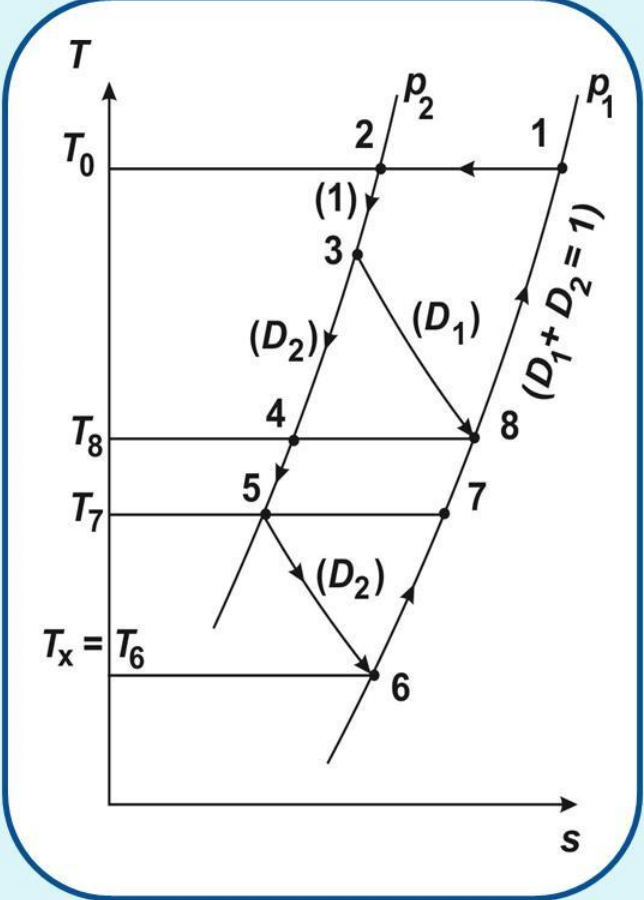
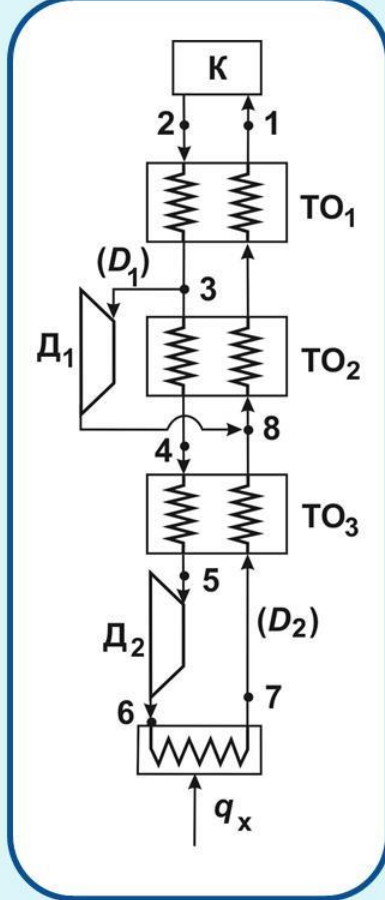
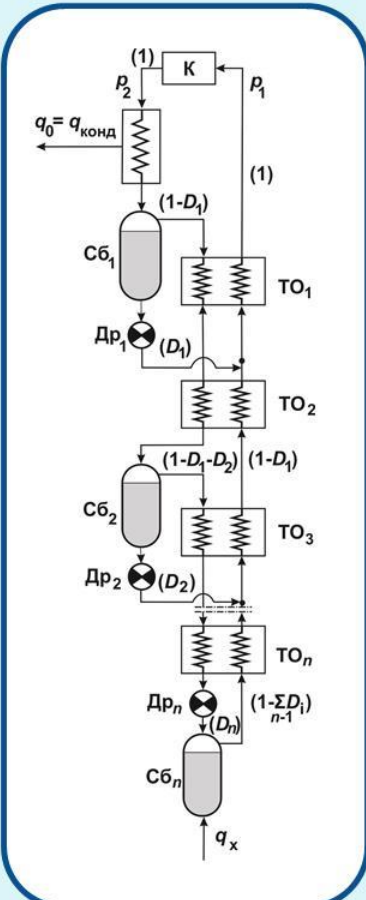


В 1879 — 86 возглавлял кафедру в Женевском ун-те. В 1886 основал в Берлине промышленную исследовательскую лабораторию. Затем жил в Париже.

Исследования в области ожижения газов и изучения низкотемпературных явлений. Разработал «каскадный» метод ожижения газов и почти одновременно с французским инженером К. Кальете впервые получил (1877) жидкий кислород при давлении 320 атм и температуре  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , достигнутой при использовании сернистой и угольной кислот. В дальнейшем ожижил также воздух, азот, водород и углекислый газ. Работал над созданием рефрижераторных систем.

**Метод Пикте — («каскадный») наиболее старый метод сжижения газов.**

1877 г.



# Эффект Ранка (1931 – Ж.Ранк). Вихревая трубка Ранка - Хилша

По данным В.И. Метенина оптимум

$$D \approx 3.57 \sqrt{f_c};$$

$$dx \approx 0.5D;$$

$$l_{\Gamma \text{ диффузора}} = (3.0 \div 3.5) D;$$

$$l_{\text{х диффузора}} = (3.0 \div 3.5) dx;$$

$$\theta_{\Gamma \text{ диффузора}} = (3.0 \div 7)^\circ;$$

$$\theta_{\text{х диффузора}} \approx 3.5^\circ$$

$$Gh_{\text{ВХ}} = G_{\text{х}} h_{\text{х}} + G_{\Gamma} h_{\Gamma};$$

$$G = G_{\text{х}} + G_{\Gamma};$$

$$h_{\text{ВХ}} = \mu h_{\text{х}} + (1 - \mu) h_{\Gamma};$$

$$\mu = \frac{G_{\text{х}}}{G}; \quad 1 - \mu = \frac{G_{\Gamma}}{G};$$

$$Q_{\text{В}} = G_{\text{х}} (h_{\text{ВХ}} - h_{\text{х}}) = G_{\Gamma} (h_{\Gamma} - h_{\text{ВХ}}); \quad q_{\text{В}} = \mu (h_{\text{ВХ}} - h_{\text{х}}) = (1 - \mu) (h_{\Gamma} - h_{\text{ВХ}});$$

$$\text{При } c_p = \text{const} \Rightarrow q_{\text{В}} = \mu c_p (T_{\text{ВХ}} - T) = \mu c_p \Delta T_{\text{х}} = (1 - \mu) c_p (T_{\Gamma} - T_{\text{ВХ}}) = (1 - \mu) c_p \Delta T_{\Gamma};$$

