

Процессы для получения низких температур

Любой цикл криогенной установки, вырабатывающий холод, включает несколько процессов, по крайней мере, один из них должен сопровождаться эффектом понижения температуры.

Не все процессы, сопровождающиеся понижением температуры, являются холодопроизводящими, т.е. процессами, идущими с отводом теплоты от охлаждаемого объекта или рабочего тела.

Например, процесс дросселирования не является холодопроизводящим, хоть и сопровождается в реальных условиях изменением температуры.

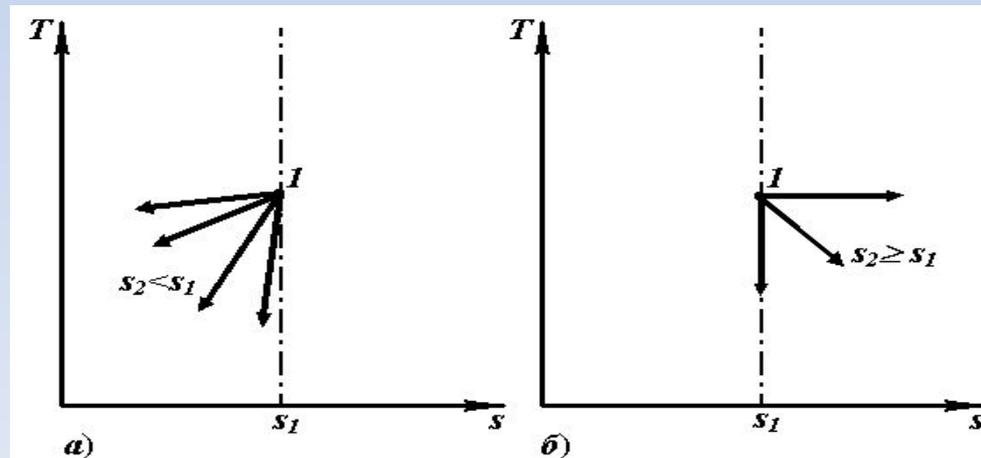
Процессы охлаждения можно условно подразделить на 2 группы.

1. **Процессы внешнего охлаждения** (рис. а) подразумевают изменение внешнего состояния тела при отводе от него теплоты. Для того, чтобы осуществить этот процесс, необходимо:

- а) создать внешнюю холодопроизводящую систему;
- б) организовать процесс теплообмена между окружающей средой и охлаждаемым объектом.

2. **Процессы внутреннего охлаждения** (рис. б) подразумевают понижение температуры тела или поддержание ее на заданном уровне без отвода теплоты во внешнюю среду.

Если криогенная система изолирована от окружающей среды и других источников тепла, то при любом изменении параметров внешнее охлаждение будет происходить с уменьшением энтропии охлаждаемого объекта, а при внутреннем охлаждении изменение энтропии охлаждаемого тела - $ds \geq 0$.



Процессы внутреннего охлаждения делятся на три группы

1. Внутреннее охлаждение посредством использования сил межмолекулярного воздействия самого рабочего тела.
Перераспределение энергии происходит внутри рабочего тела.

2. Внутреннее охлаждение посредством внешних сил.
Энергия рабочего тела отдается за пределы контрольного объема.

3. Внутреннее охлаждение путем перераспределения внутренней энергии в потоке рабочего тела.

Эффект Ранка реализуется в вихревых трубах.

1. Внутреннее охлаждение посредством использования сил межмолекулярного воздействия самого рабочего тела.

Перераспределение энергии происходит внутри рабочего тела.

1) Дросселирование ($ds > 0$ $di = 0$ $dp < 0$ $dm = 0$)

Адиабатное расширение газа в условиях стационарного течения без совершения внешней работы и приращения скорости. Процесс характеризуется условием сохранения энтальпии ($i = const$); реализуется при помощи дроссельных вентиляей; не является холодопроизводящим. Температура может понижаться или повышаться в зависимости от параметров состояния.

2) Изобарное смешение или растворение ($ds > 0$ $di = 0$ $dp = 0$ $dm = 0$)

Смешение или растворение веществ в жидком, твердом или газообразном состоянии, сопровождающиеся отрицательным тепловым эффектом растворения (температура снижается, так как теплоемкости смеси больше суммы парциальных теплоемкостей компонентов). Процесс не является холодопроизводящим.

2. Внутреннее охлаждение посредством внешних сил.

Энергия рабочего тела отдается за пределы контрольного объема.

1) Расширение газа в детандерах ($ds \geq 0$ $di < 0$ $dp < 0$ $dm = 0$)

Адиабатическое расширение с совершением внешней работы. Идеальный процесс характеризуется условием $s = \text{const}$; является в цикле холодопроизводящим; температура всегда понижается; реализуется при помощи детандеров.

2) Выпуск газа из сосуда ($ds \geq 0$ $di < 0$ $dp < 0$ $dm < 0$)

Адиабатическое расширение с совершением внешней работы, осуществляемый в неравновесных условиях. Процесс характеризуется условием $\alpha s = \text{const}$; является холодопроизводящим; температура всегда понижается; реализуется быстрым выпуском газа; является одним из рабочих процессов поршневых детандеров.

3) Откачка, испарение рабочего тела при построенном отводе рабочего тела ($ds \geq 0$ $di < 0$ $dp < 0$ $dm < 0$)

Адиабатная откачка паров кипящей жидкости; испаряющийся пар уменьшает энергию остающейся жидкости, которая при этом охлаждается. Реализуется с помощью вакуумных насосов; для остающейся части жидкости является холодопроизводящим процессом в цикле.

Достигаются температуры: $T_{N_2} \approx 64$ К; $T_{O_2} \approx 54$ К; $T_{H_2} \approx 13,9$ К ; $T^4_{He} \approx 0,6$ К; $T^3_{He} \approx 0,2$ К.

4) Десорбция ($ds > 0$ $dp < 0$ $di < 0$ $dm < 0$)

Адиабатная десорбция - откачка с поверхности адсорбента молекул адсорбата, которые, покидая поверхность, уменьшают энергию остающихся молекул и адсорбента. Процесс является холодопроизводящим.

5) Адиабатическое размагничивание парамагнетиков ($ds \geq 0$ $di < 0$ $dp = 0$ $dm = 0$)

При наложении магнитного поля на парамагнитное вещество выделяется теплота. Если ее отводить, происходит изотермическое уменьшение энтропии. Затем, после снятия внешнего магнитного поля, происходит размагничивание с уменьшением температуры. Процесс холодопроизводящий используется для получения сверхнизких температур до создания рефрижераторов растворения.

3. Внутренне охлаждение путем перераспределения внутренней энергии в потоке рабочего тела.

Эффект Ранка реализуется в вихревых трубах.

$$(ds > 0 \quad dp < 0 \quad di < 0 \quad dm \leq 0)$$

Вихревое энергетическое разделение - возникновение температурного расслоения (градиента температуры) при расширении газа в условиях стационарного вихревого течения в результате энергетического взаимодействия частиц в вязком завихренном потоке. Реализуется в вихревых трубах, поток разделяется на горячий (периферийный) и холодный (центральный); для охлажденной части потока процесс является холодопроизводящим.

Сжижение газов - переход вещества из газообразного состояния в жидкое. Оно достигается охлаждением их ниже критической температуры (T_k) и последующей конденсацией в результате отвода теплоты парообразования (конденсации).

Охлаждение газа ниже T_K необходимо для достижения области температур, при которых газ может сконденсироваться в жидкость (при $T > T_K$ жидкость существовать не может).

Впервые газ (аммиак) был сжижен в 1792 (голландский физик М. ван Марум).

Хлор был получен в жидком состоянии в 1823 (М.Фарадей).

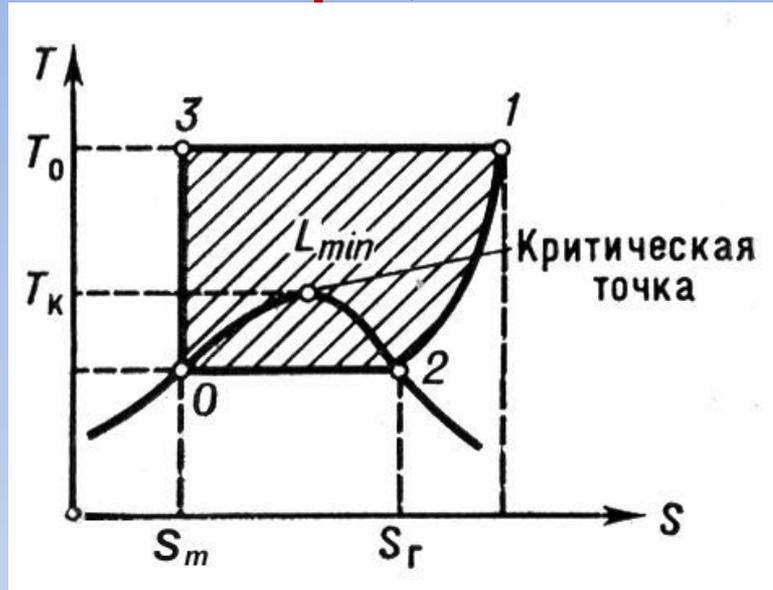
Кислород — в 1877 (швейцарский учёный Р. Пикте и французский учёный Л. П. Кальете).

Азот и окись углерода — в 1883 (З. Ф. Вроблевский и К. Ольшевский).

Водород — в 1898 (Дж. Дьюар).

Гелий — в 1908 (Х. Камерлинг-Оннес).

Идеальный процесс сжижения газов



Изобара $1—2$ соответствует охлаждению газа до начала конденсации, изотерма $2—0$ — конденсации газа.

Площадь ниже $1—2—0$ эквивалентна количеству теплоты, которое необходимо отвести от газа при его сжижении, а площадь внутри контура $1—2—0—3$ ($1—3$ — изотермическое сжатие газа, $3—0$ — адиабатическое его расширение) характеризует термодинамически минимальную работу L_{min} , необходимую для сжижения газа.

$$L_{min} = T_0(S_{\Gamma} - S_{\text{ж}}) - (J_{\Gamma} - J_{\text{ж}}),$$

где T_0 — температура окружающей среды;

S_{Γ} , $S_{\text{ж}}$ — энтропии газа и жидкости;

J_{Γ} , $J_{\text{ж}}$ — теплосодержания (энтальпии) газа и жидкости.

Значения температуры кипения $T_{кип}$ (при 760 мм. рт. ст.), критической температуры T_K , минимальной L_{min} и действительной L_D работ сжижения некоторых газов

Сжижение (конденсацию) газов возможно осуществить лишь после их охлаждения до температур, меньших T_K .

Газ	$T_{кип}$, К	T_K , К	L_{min} , кВт•ч/кг	L_D , кВт•ч/кг
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
Кислород	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

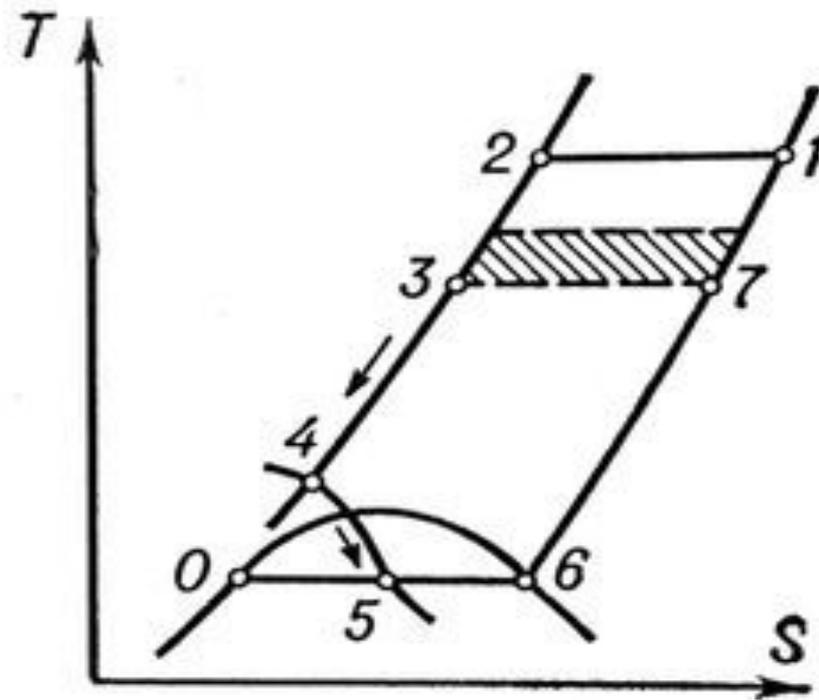
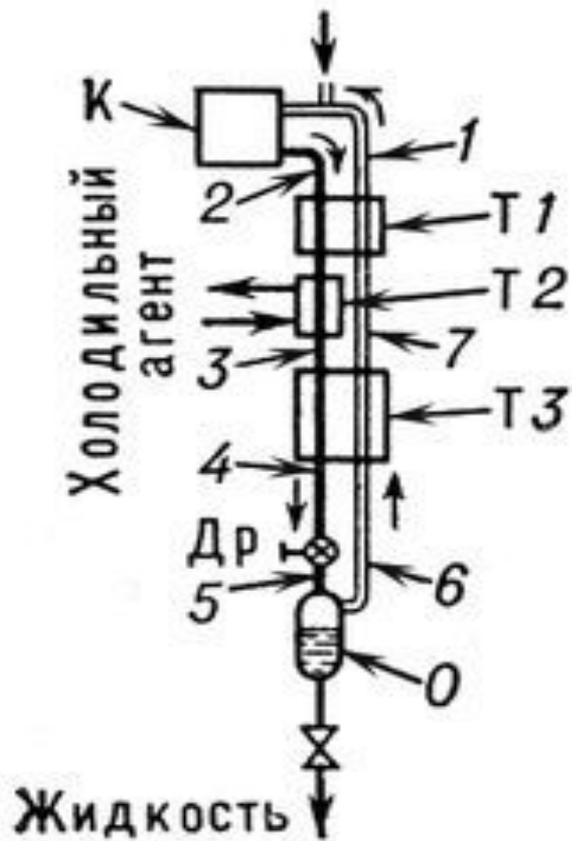
Промышленное сжижение газа с критической температурой T_K выше температуры окружающей среды (например, аммиак, хлор) осуществляется с помощью компрессора, где газ сжимается, и последующей конденсацией газа в теплообменниках, охлаждаемых водой или холодильным рассолом.

Сжижения газа с T_K , которая значительно ниже температуры окружающей среды, производится методами *глубокого охлаждения*.

Наиболее часто для сжижения газа с низким T_K применяются

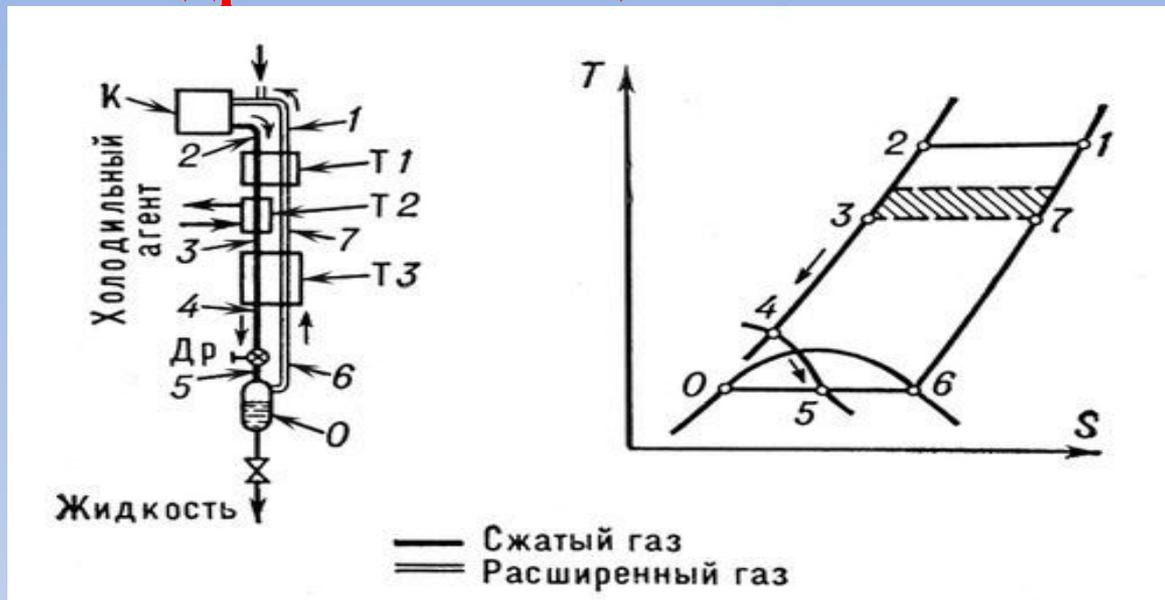
- *холодильные циклы*, основанные на дросселировании сжатого газа (использование эффекта Джоуля — Томсона),
- на расширении сжатого газа с производством внешней работы в детандере,
- на расширении газа из постоянного объёма без совершения внешней работы (метод теплового насоса).
- В лабораторной практике иногда используется каскадный метод охлаждения (сжижения).

Схема дроссельного цикла сжижения газа



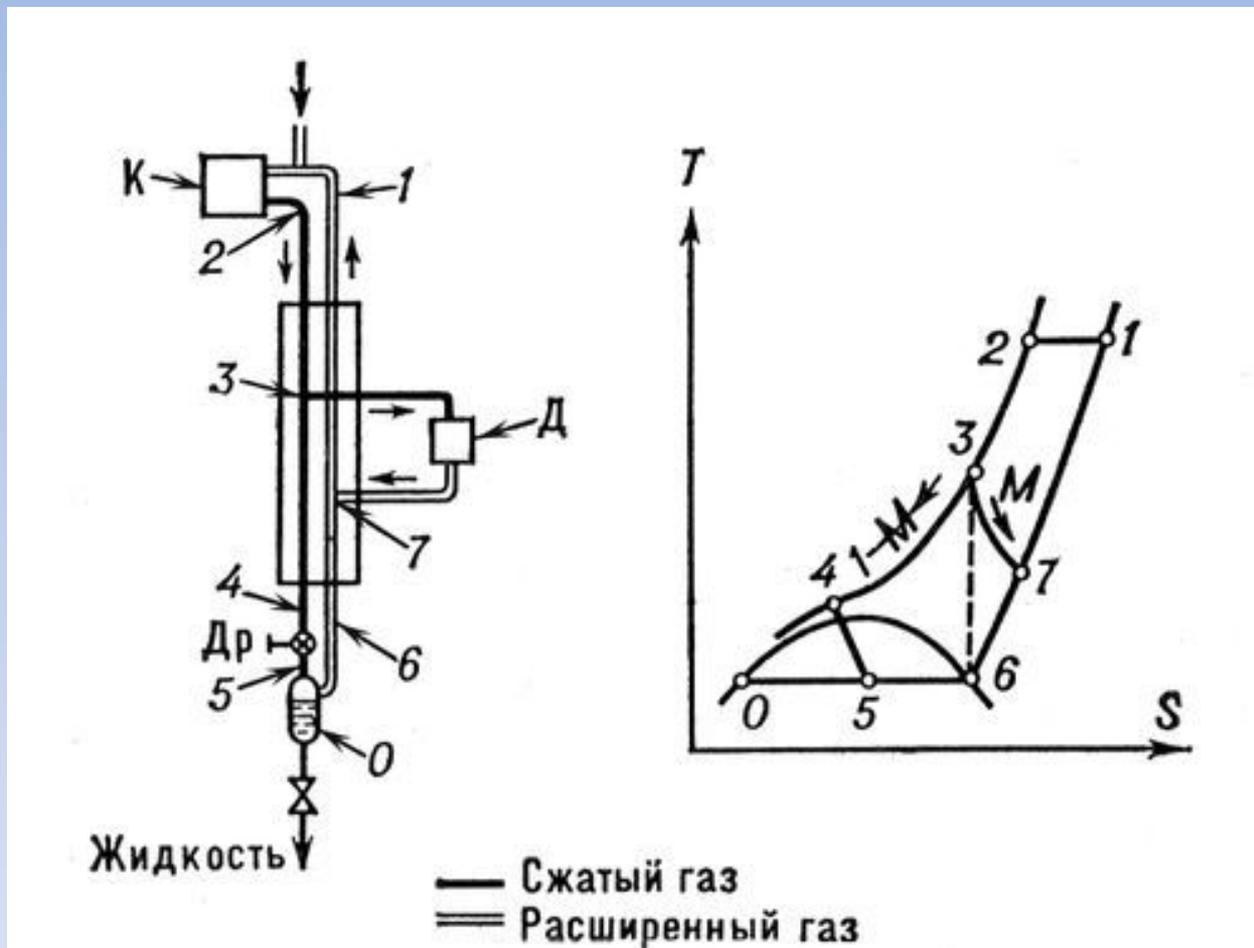
— Сжатый газ
== Расширенный газ

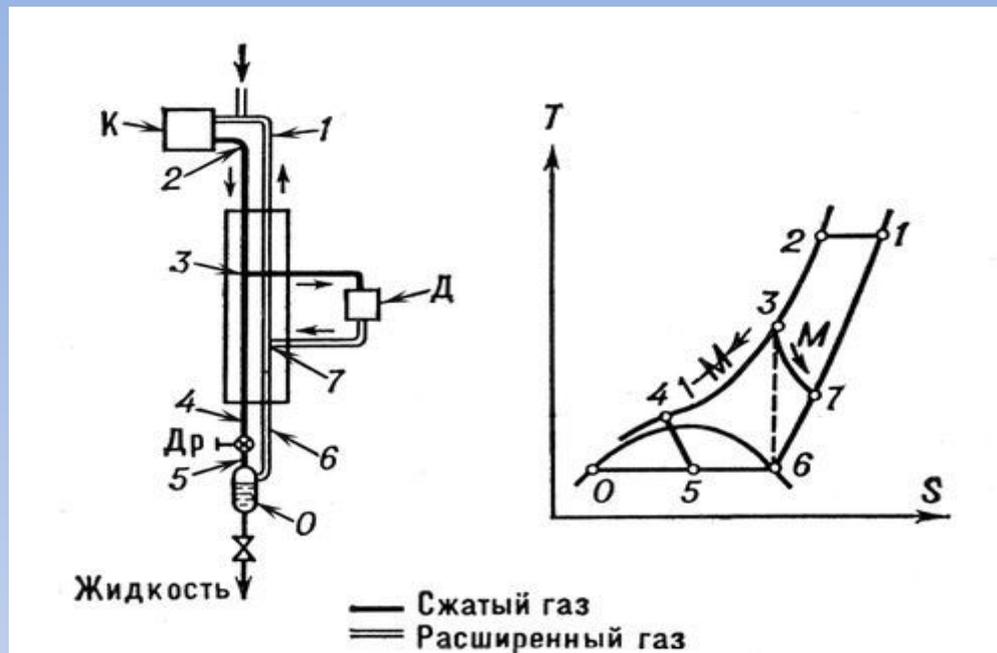
Схема дроссельного цикла сжижения газа



После сжатия в компрессоре (1—2) газ последовательно охлаждается в теплообменниках (2—3—4) и затем расширяется (дросселируется) в вентиле (4—5). При этом часть газа сжижается и скапливается в сборнике, а несжижившийся газ направляется в теплообменники и охлаждает свежие порции сжатого газа. Для сжижения газа по циклу с дросселированием необходимо, чтобы температура сжатого газа перед входом в основной теплообменник T_3 была ниже температуры инверсионной точки. Для этого и служит теплообменник с посторонним холодильным агентом T_2 . Если температура инверсионной точки газа лежит выше комнатной (азот, аргон, кислород), то схема принципиально работоспособна и без теплообменников T_1 и T_2 . Применение посторонних хладагентов в этих случаях имеет целью повышение выхода жидкости. Если же температура инверсионной точки газа ниже комнатной, то теплообменник с посторонним хладагентом обязателен. Например, при сжижении водорода методом дросселирования в качестве постороннего хладагента используется жидкий азот, при сжижении гелия — жидкий водород.

Для сжижения газа в промышленных масштабах чаще всего применяются циклы с детандерами, т. к. расширение газов с производством внешней работы — наиболее эффективный метод охлаждения.





В самом детандере жидкость обычно не получают, ибо технически проще проводить само сжижение в дополнительной дроссельной ступени. После сжатия в компрессоре (1—2) и предварительного охлаждения в теплообменнике (2—3) поток сжатого газа делится на 2 части: часть M отводится в детандер, где, расширяясь, производит внешнюю работу и охлаждается (3—7). Охлажденный газ подаётся в теплообменник, где понижает температуру оставшейся части сжатого газа $1 - M$, которая затем дросселируется и сжижается. Теоретически расширение в детандере должно осуществляться при постоянной энтропии (3—6). Однако из-за потерь расширение протекает по линии 3—7. Для увеличения термодинамической эффективности процесса сжижения газа иногда применяют несколько детандеров, работающих на различных температурных уровнях.

Циклы с тепловыми насосами обычно используются (наряду с детандерными и дроссельными циклами) при сжижении газа с помощью холодильно-газовых машин, которые позволяют получать температуры до 12 К, что достаточно для сжижения всех газов, кроме гелия ($T_k = 5,3^0\text{К.}$). Для сжижения гелия к машине пристраивается дополнительная дроссельная ступень.

Подвергаемые сжижению газы должны очищаться от паров воды, масла и др. примесей (например, воздух — от углекислоты, водород — от воздуха), которые при охлаждении могут затвердеть и закупорить теплообменную аппаратуру. Поэтому узел очистки газа от посторонних примесей — необходимая часть установок сжижения газа.

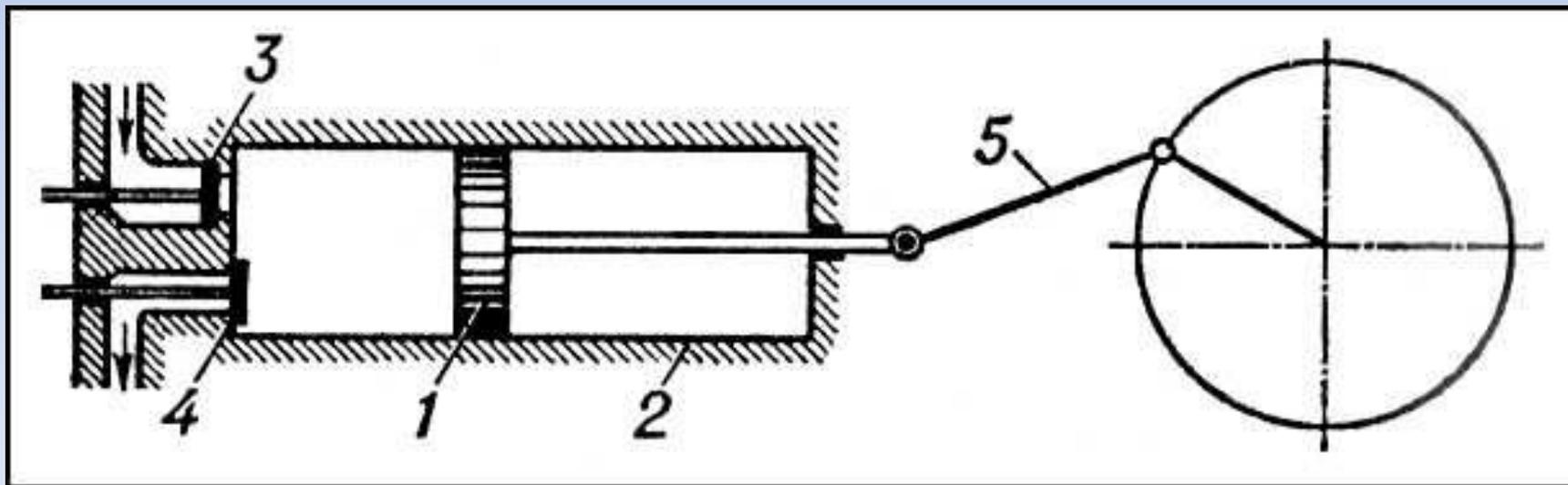
Детандер (от франц. détendre - ослаблять), машина для охлаждения газа путём его расширения с отдачей внешней работы. Детандер относится к классу расширительных машин, но применяется главным образом не с целью совершения внешней работы, а для получения холода. Расширение газа в детандере - наиболее эффективный способ его охлаждения.

Наиболее распространены поршневые детандеры. и турбодетандеры.

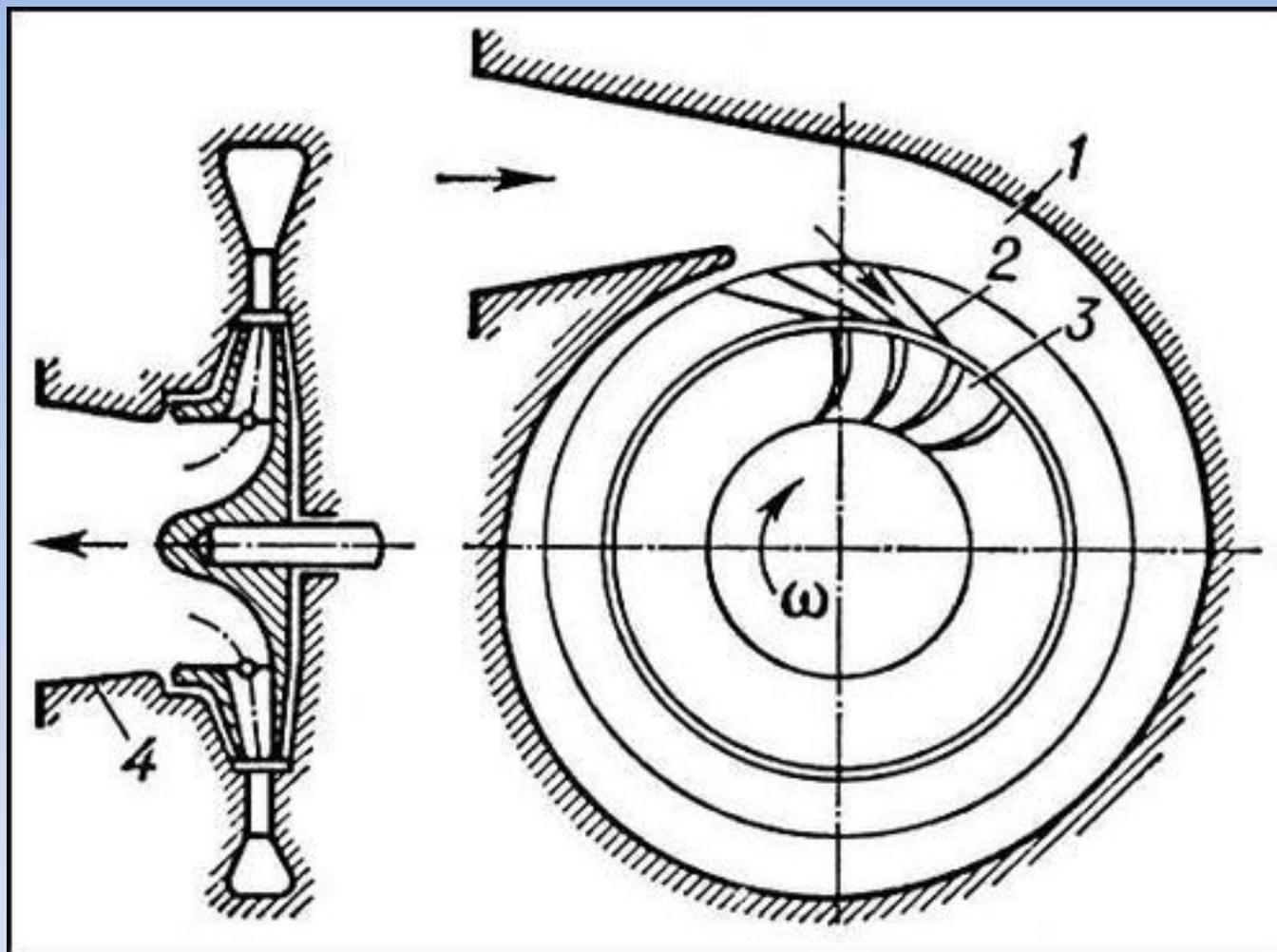
Поршневые детандеры - машины объёмного периодического действия, в которых потенциальная энергия сжатого газа преобразуется во внешнюю работу при расширении отдельных порций газа, перемещающих поршень.

Они выполняются вертикальными и горизонтальными, одно- и многорядными. Торможение поршневых детандеров осуществляется электрогенератором и реже компрессором.

Применяются в основном в установках с холодильными циклами высокого $15-20 \text{ Мн/м}^2$ ($150-200 \text{ атм}$) и среднего $2-8 \text{ Мн/м}^2$ ($20-80 \text{ атм}$) давлений для объёмных расходов газа при температуре и давлении на входе в машину (физических расходов) $0,2-20 \text{ м}^3/\text{ч}$.



Центростремительный реактивный турбодетандер



Турбодетандеры - лопаточные машины непрерывного действия, в которых поток проходит через неподвижные направляющие каналы (сопла), преобразующие часть потенциальной энергии газа в кинетическую, и систему вращающихся лопаточных каналов ротора, где энергия потока преобразуется в механическую работу, в результате чего происходит охлаждение газа.

Они делятся *по направлению движения потока* на центростремительные, центробежные и осевые; *по степени расширения газа в соплах* - на активные и реактивные; *по числу ступеней расширения* - на одно - и многоступенчатые. Торможение турбинных детандеров осуществляется электрогенератором, гидротормозом, нагнетателем, насосом.

Наиболее распространён реактивный одноступенчатый центростремительный детандер разработанный П. Л. Капицей.

Турбодетандеры применяются главным образом в установках с холодильным циклом низкого давления $0,4-0,8 \text{ Мн/м}^2$ (4-8 атм) для объёмных (физических) расходов газа $40-4000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Созданы турбодетандеры для холодильных циклов низкого, среднего и высокого давлений с объёмными расходами газа $1,5-40 \text{ м}^3/\text{ч}$. Эти машины характеризуются малыми размерами (диаметр рабочего колеса 10-40 мм) и высокой частотой вращения ротора ($100000-500000 \text{ об/мин}$).

Хранение жидких газов

Чтобы сохранить воздух в жидком состоянии, надо воспрепятствовать его теплообмену с окружающей средой. С этой целью жидкие газы помещают в особые сосуды, называемые сосудами Дьюара.

Сосуд Дьюара устроен так же, как и обычный термос. Он имеет двойные стенки, из пространства между которыми выкачан воздух. Это уменьшает теплопроводность сосуда. Внутреннюю стенку делают блестящей (посеребренной) для уменьшения нагревания излучением. У сосудов Дьюара узкое горлышко, при хранении в них сжиженных газов их оставляют открытыми, чтобы содержащийся в сосуде газ имел возможность постепенно испаряться. Благодаря затрате теплоты на испарение сжиженный газ остается все время холодным. В хорошем сосуде Дьюара жидкий воздух сохраняется в течение нескольких недель.

