Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной деятельности
Дата подписания: 14.06.2024 12:12:35
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Кафедра «Техника низких температур»

ЦИКЛЫ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ

Методические указания
к выполнению курсовой работы для студентов,
обучающихся по направлению
16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения

Составитель П.Ю. Ермолаева

Москва
2018

ВВЕДЕНИЕ

Техника низких температур обеспечивает их получение, поддержание и использование. Получение низких температур можно обеспечить при использовании соответствующих рабочих веществ с низкой температурой кипения: хладоны, аммиак, CO2, воздух, азот, неон, водород, гелий.

В низкотемпературных системах обмен энергии с окружающей средой осуществляется в форме теплоты и работы. Следовательно наша задача - рассмотрение термомеханической системы.

Для термомеханической системы с двумя степенями свободы могут быть приняты следующие независимые переменные:

p, v; T, s - независимые переменные

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Для осуществления искусственного охлаждения реализуют различные термодинамические циклы. Любой цикл включает несколько процессов и, по крайней мере, один из них должен сопровождаться эффектом понижения температуры в адиабатных условиях (расширение). Для организации цикла необходимы и такие процессы, как сжатие, передача теплоты сжатия в окружающую среду, передача теплоты от охлаждаемого тела к рабочему телу цикла, рекуперация холода.

Можно выделить несколько способов получения низких температур:

1. Способы, основанные на использовании свойств рабочих веществ в газообразном (жидком) состоянии. При этом рассматриваются процессы:
   - сжатие (T = const; s = const);
   - дросселирование (i = const);
   - расширение в детандере (s = const);
   - выхлоп.

2. Способы охлаждения с использованием рабочей среды в твердом состоянии:
   - адиабатное размагничивание;
   - десорбционное охлаждение;
   - термоэлектрическое охлаждение.

3. Способы охлаждения, основанные на использовании свойств изотопов 3He и 4He:
   - растворение 3He в 4He;
   - адиабатная кристаллизация 3He (эффект Померанчука);
   - механокалорический эффект Капицы.

Цикл сжижения с однократным дросселированием и предварительным внешним охлаждением

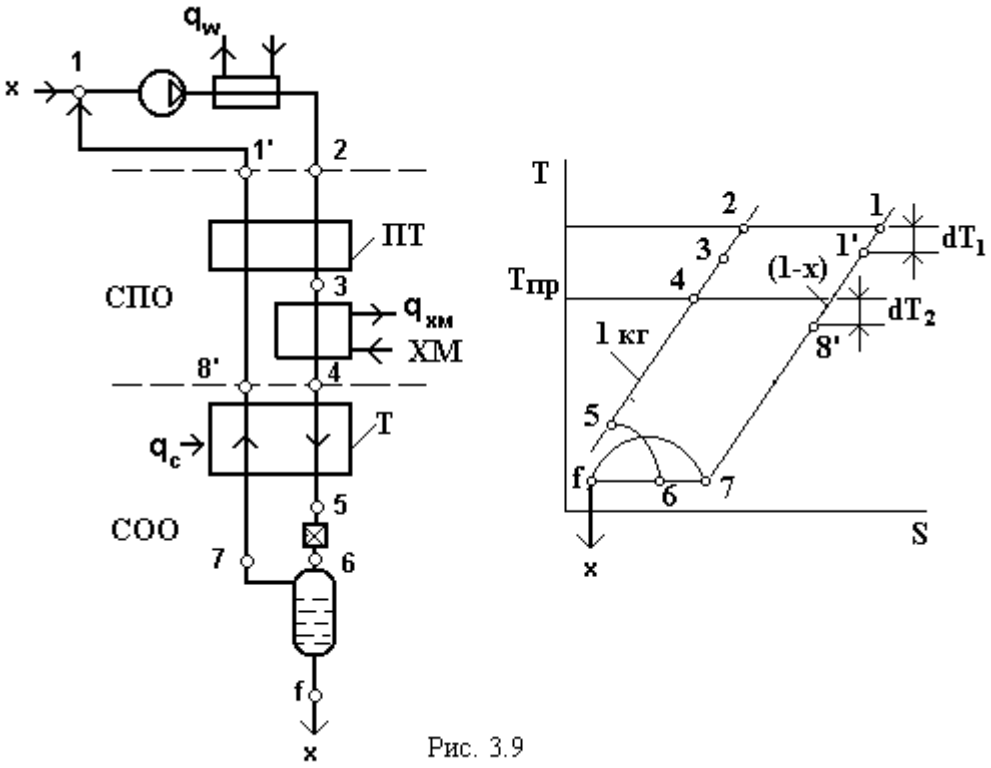


Рис. 3.9

СПО – ступень предварительного охлаждения; ПТ – теплообменник предварительного охлаждения; ХМ – холодильная машина; СОО – ступень окончательного охлаждения

Одним из способов повышения эффективности установки, работающей по циклу с дросселированием, является введение внешнего предварительного охлаждения. Такой цикл основан на свойстве реальных газов повышать изотермический эффект дросселирования с понижением температуры. Кроме того предварительное охлаждение обеспечивает компенсацию части потерь $q_н + q_c$.

Холодильная машина, с помощью которой достигается увеличение холодопроизводительности цикла, требует определенного расхода энергии. Однако дополнительный расход энергии незначителен по сравнению с увеличением холодопроизводительности цикла.

В ступени предварительного охлаждения (**СПО**) сжатый газ (прямой поток) охлаждается с температуры T_2 до T_4 за счет холодильной машины и частично за счет нагрева обратного потока в теплообменнике **ПТ**. Теплообменник предварительного охлаждения **ПТ** позволяет уменьшить тепловую нагрузку холодильной машины.

Ступень окончательного охлаждения (**СОО**) работает так же, как и в случае простого регенеративного цикла с дросселированием (рис. 3.8).

Расчет цикла

Коэффициент сжижения **x** можно определить из рассмотрения энергетического баланса дроссельной ступени (**СОО**)

$$1 \cdot i_4 + q_c = x \cdot i_f + (1 - x) \cdot i_8',$$

откуда $$x = \frac{(i_6' - i_4) - q_{хм}}{i_6' - i_1'}$$

Для определения дополнительных затрат энергии, связанных с работой холодильной машины, необходимо знать ее холодопроизводительность (из рассмотрения энергетического баланса **СПО**)

$$q_{хм} = (i_2 - i_4) - (1 - x) \cdot (i_1' - i_8')$$

Удельный расход энергии на производство жидкости

$$l_f = \frac{R \cdot T_1 \cdot \ln(p_2/p_1)}{\eta_{из} \cdot x} + \frac{q_{хм}}{\varepsilon \cdot x}$$

где ε - холодильный коэффициент холодильной машины

Можно принять $\varepsilon = 0{,}45 \cdot \varepsilon_к = 0{,}45 \cdot \frac{T_4}{T_2 - T_4}$

Териодинамический КПД $$\eta_t = \frac{l_{цикл}}{l_f} = \frac{T_1 \cdot (s_1 - s_{1'}) - (i_1 - i_{1'})}{l_f}$$

Предварительное охлаждение позволяет существенно улучшить показатели цикла с дросселированием: такие характеристики, как **x**, **ε**, η_t увеличиваются в 2,5..3 раза. Дополнительные затраты работы незначительны по сравнению с работой компрессора.

ЦИКЛЫ С ДРОССЕЛИРОВАНИЕМ И РАСШИРЕНИЕМ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА В ДЕТАНДЕРЕ

При постоянном давлении обратного потока p_1 с ростом давления p_2 увеличивается холодопроизводительность детандера. В свою очередь повышение рабочего давления в цикле требует соответственно повышения температуры потока, поступающего на расширение в детандер. На практике широко распространен холодильный цикл высокого давления с расширением в детандере части рабочего газа без его предварительного охлаждения (цикл Гейланда, рис. 3.15).

На рис.3.15 в отличие от схемы рис.3.14 отсутствует теплообменник **Т1** и параметры точек 3 и 9 совпадают соответственно с параметрами точек 2 и 1'. Рабочее давление в цикле повышается до 20 МПа.

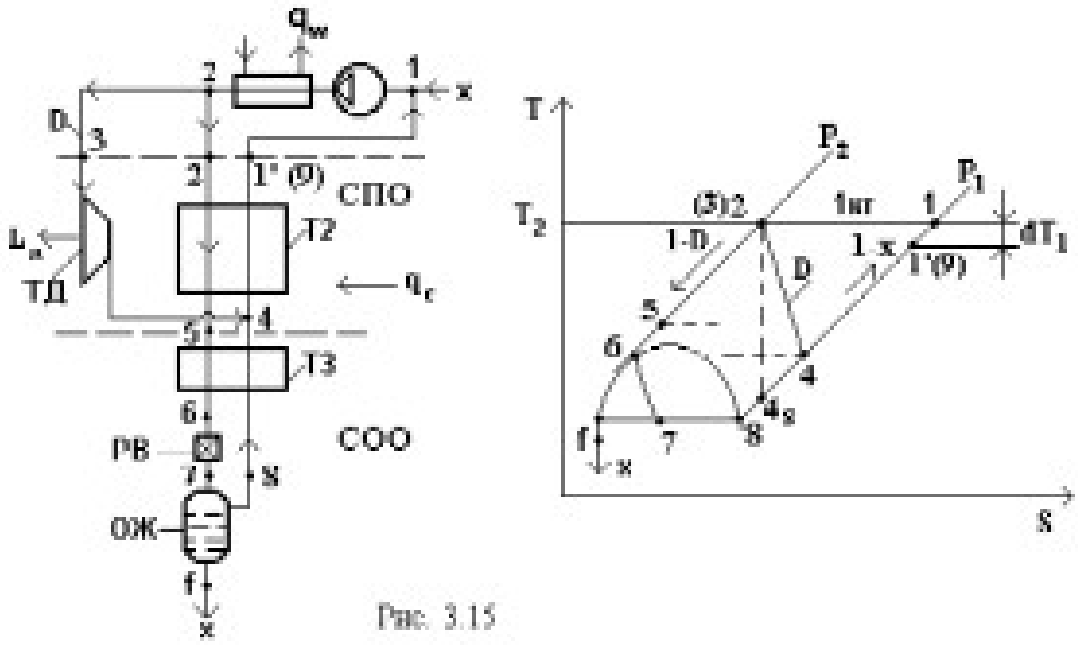


Рис. 3.15

Для схем рис.3.14 и 3.15 способы получения холода идентичны, поэтому уравнения энергетического баланса одинаковы.

Рассматриваемый на рис.3.14 цикл располагает холодопроизводительностью, равной изотермическому дроссель-эффекту на исходном температурном уровне и холодопроизводительности детандера

$$q_{х.ц} = di_{т0} + q_д = (i_1 – i_2) + D \cdot (i_3 – i_4)$$

Эта холодопроизводительность расходуется :

- на компенсацию потерь холодопроизводительности, связанных с выводом жидкого продукта (полезная составляющая холодопроизводительности цикла)

$$q_f = x \cdot (i_1 – i_f)$$

- на компенсацию холодопотерь, связанных с недорекуперацией

$$q_н = (1 – x) \cdot (i_1 – i_1')$$

- на компенсацию теплопритока из окружающей среды q_c

$$q_{х.ц} = q_f + q_н + q_c$$

$$(i_1 – i_2) + D \cdot (i_3 – i_4) = x \cdot (i_1 – i_2) + (1 – x) \cdot (i_1 – i_1') + q_c$$

$$x = \frac{(i_1' - i_1) + D \cdot (i_3 - i_4) - q_c}{i_1' - i_f}$$

откуда

Удельный расход энергии на сжижение

$$l_f = \frac{R \cdot T_1 \cdot \ln(p_2 / p_1)}{\eta_{из} \cdot x}$$, где

R – газовая постоянная;

$\eta_{из}$ – изотермический КПД компрессора; показывает отклонение работы реального

процесса сжатия от изотермического

Термодинамический КПД цикла $\eta_t = \frac{l_{min}}{l_r} = \frac{T_1 \cdot (s_1 - s_f) - (i_1 - i_f)}{l_r}$

Примеры расчета курсовой работы

При решении задач принято (если не указано иное):

- исходный температурный уровень (температура окружающей среды) $T_1=T_0=300К$;
- давление обратного потока $P_1=0,1$ МПа;
- сопротивления потокам $\Delta P_1 = \Delta P_2 = 0$;
- изотермический КПД компрессора $\eta_{из} = 0,65$;
- значение универсальной газовой постоянной R=8,314 Дж/(моль·К);
- молекулярная масса: азота – 28 г/моль, воздуха – 29 г/моль, водорода – 2 г/моль.

ВАРИАНТ 1 (пример)

Определить коэффициент сжижения, удельный расход энергии и термодинамический КПД для цикла с предварительным охлаждением холодильной машиной и дросселированием (рис.3.9) при следующих исходных данных: рабочее давление $P_2=20$ МПа, температура предварительного охлаждения $T_4=230К$, недорекуперация $\Delta T_1=\Delta T_2=5К$, теплоприток из окружающей среды $q_c=5$ кДж/кг. Криоагент – азот.

Таблица параметров расчетных точек

№ точки	P, МПа	T, К	i, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
1	0.1	300	311,2	6.844
1'	0.1	295	306,0	
2	20,0	300	279,3	
4	20,0	230	181,1	
8'	0.1	225	233,1	
f	0.1	77	-121,9	2.835

Коэффициент сжижения, кг/кг

$$x = \frac{(i_{8'} - i_4) - q_C}{i_{8'} - i_f}$$

$$x = \{ 233.1 – 181.1 – 5 \} / (233,1 + 121,9) = 0,134$$

Удельная холодопроизводительность холодильной машины, кДж/кг

$$q_{хм} = (i_2 – i_4) – (1 – x) \cdot (i_1' – i_8')$$

$$q_{хм} = (279.3 – 181.1) – (1 – 0,134) \cdot (306.0 – 233.1) = 35,07$$

Холодильный коэффициент холодильной машины, Дж/Дж

$$\varepsilon = 0,45 \cdot T_4 / (T_2 – T_4) = 0,45 \cdot 230 / (300 – 230) = 1,48$$

Удельный расход энергии, МДж/кг

$$l_f = \frac{R_{шв} T_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\eta_{из} x} + \frac{q_{хм}}{\varepsilon x}$$

l_f = {8,314·300·ln(20/0,1)}/(0,65·0,134·28·10^3) + 35,07/(1,48·0,134·10^3)= 5,42+0,18 = 5,60

Термодинамический КПД

$$\eta_t = \frac{l_{min}}{l_f} = \frac{T_1(s_1 - s_f) - (i_1 - i_f)}{l_f}$$

η_t = { 300 · (6.844 – 2.835) – (311.2 + 121.9) } / (5,60 · 10^3) = 0,137

ВАРИАНТ 2 (пример)

Определить коэффициент сжижения, удельный расход энергии и термодинамический КПД цикла среднего давления с расширением газа в детандере и дросселированием (рис.3.15) при следующих исходных данных: рабочее давление P_2=8,0 МПа, температура на входе в детандер T_3=230К, доля детандерного потока D=0,6 кг/кг, изоэнтропный КПД детандера η_s=0,78, недорекуперация ΔT_1=8К, теплоприток из окружающей среды q_c=6,0 кДж/кг, сопротивление обратному потоку ΔP_1=0,025 МПа (сопротивление прямому потоку не учитывать). Рабочее тело – азот.

Таблица параметров расчетных точек

№ точки	P, МПа	T, К	i, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
1	0.1	300	311.2	6.844
1'	0.1	292	302.9	
2	8.0	300	295.6	
3	8.0	230	210.2	
4	0.125	94.6	95.6	
4s	0,125	79.2	63.3	
f	0.125	79.2	-117.9	2.885

Значение энтальпии потока за детандером, кДж/кг

$i_4 = i_3 - (i_3 - i_{4s}) \cdot \eta_s$ = (210.2 – 63.3) · 0,78 = 95,6

Коэффициент сжижения, кг/кг

$$x = \frac{(i_{1'} - i_2) + D(i_3 - i_4) - q_C}{i_{1'} - i_f}$$

x = { (302.9 – 295.6) + 0,6 · (210.2 – 95.6) – 6 } / (302.9 + 117.9) = 0,167

Удельный расход энергии на получение жидкости, МДж/кг

$$l_f = \frac{R_{инд} T_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\eta_{из} x}$$

$l_f = \{ 8{,}314 \cdot 300 \cdot \ln(8{,}0/0{,}1) \} / (0{,}65 \cdot 0{,}167 \cdot 28 \cdot 10^3) = 3{,}61$

Термодинамический КПД

$$\eta_t = \frac{l_{min}}{l_f} = \frac{T_1(s_1 - s_f) - (i_1 - i_f)}{l_f}$$

$\eta_t = \{ 300 \cdot (6.844 - 2.885) - (311.2 + 117.9) \} / (3{,}61 \cdot 10^3) = 0{,}210$

Варианты заданий (номер по журналу посещений)

Все неуказанные данные можно брать из примеров решения

№ варианта	P_1, МПа	P_2, МПа	D, кг/кг	η_s	ΔP_1, МПа	Тип задачи	ΔT_1, К
1	0,1	6	0,7	0,75	0	ВАРИАНТ 1	5
2	0,1	7	0,7	0,75	0,025	ВАРИАНТ 2	5
3	0,1	8	0,7	0,75	0	ВАРИАНТ 1	5
4	0,1	9	0,7	0,75	0,025	ВАРИАНТ 2	5
5	0,1	6	0,75	0,75	0	ВАРИАНТ 1	5
6	0,1	7	0,75	0,75	0,025	ВАРИАНТ 2	5
7	0,1	8	0,75	0,75	0	ВАРИАНТ 1	5
8	0,1	9	0,75	0,75	0,025	ВАРИАНТ 2	5
9	0,1	6	0,75	0,75	0	ВАРИАНТ 1	6
10	0,1	7	0,75	0,75	0,025	ВАРИАНТ 2	6
11	0,1	8	0,75	0,7	0	ВАРИАНТ 1	6
12	0,1	9	0,75	0,7	0,025	ВАРИАНТ 2	6
13	0,1	6	0,75	0,7	0	ВАРИАНТ 1	6
14	0,1	7	0,75	0,7	0,025	ВАРИАНТ 2	6
15	0,1	8	0,65	0,7	0	ВАРИАНТ 1	6
16	0,1	9	0,65	0,7	0,025	ВАРИАНТ 2	6
17	0,1	6	0,65	0,7	0	ВАРИАНТ 1	7
18	0,1	7	0,65	0,7	0,050	ВАРИАНТ 2	7
19	0,1	8	0,65	0,7	0	ВАРИАНТ 1	7
20	0,1	9	0,65	0,65	0,050	ВАРИАНТ 2	7
21	0,1	6	0,65	0,65	0	ВАРИАНТ 1	7
22	0,1	7	0,65	0,65	0,050	ВАРИАНТ 2	7
23	0,1	8	0,65	0,65	0	ВАРИАНТ 1	7
24	0,1	9	0,55	0,65	0,050	ВАРИАНТ 2	8
25	0,1	6	0,55	0,65	0	ВАРИАНТ 1	8
26	0,1	7	0,55	0,65	0,050	ВАРИАНТ 2	8

27	0,1	8	0,55	0,65	0	ВАРИАНТ 1	8
28	0,1	9	0,55	0,65	0,050	ВАРИАНТ 2	8
29	0,1	6	0,55	0,65	0	ВАРИАНТ 1	8
30	0,1	7	0,55	0,65	0,050	ВАРИАНТ 2	8