

А. М. Архаров, И. А. Архаров,
В. Л. Бондаренко

АНАЛИЗ ВОЗДУШНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ И ХОЛОДА

Приведен анализ воздушного интегрированного цикла для одновременной генерации теплоты и холода. Показано, что степень термодинамического совершенства подобных циклов может достигать 50 % и более, что весьма существенно для снижения энергозатрат. Определены также другие характеристики цикла.

E-mail: safmom@yandex.ru; crio@power.bmstu.ru

Ключевые слова: воздушный интегрированный цикл, генерация теплоты и холода.

Организация экономически эффективного тепло- и хладоснабжения одинаково актуальна и для производственных, и для жилых помещений. В системах отопления и водоснабжения в качестве теплоносителя обычно используется вода. Способы ее нагрева различны. Каждый способ нагрева характеризуется конкретным видом источника теплоты топлива и затратами энергии. Генерация холода для систем кондиционирования, жизнеобеспечения, хранения и консервации продуктов предполагает использование специальных хладагентов, а также соответствующие затраты энергии. Учитывая непрерывный рост цен на традиционные энергоносители, сегодня существует потребность в создании интегрированных замкнутых систем, использующих одно рабочее вещество и способы одновременно генерировать теплоту и холод. Принципиально такая система представляет собой теплотрансформатор с несколькими контурами, работающими при разных температурах.

С термодинамической точки зрения любые криогенераторы являются, по сути, тепловыми насосами (или теплотрансформаторами), передающими теплоту низкотемпературного источника (при T_x) на более высокотемпературный уровень (T_r) — приемнику теплоты. Поэтому принципиально циклы криогенераторов и тепловых насосов могут быть интегрированы в единые общие циклы.

В интегрированных газовых циклах тепловых насосов для генерации теплоты и холода (на уровнях T_r и T_x) наиболее вероятно использование в качестве рабочих тел воздуха, азота, неона и гелия. Они экологически безупречны, что в наше время очень важно! Кроме того, спектр их прикладного применения может быть весьма разнообразен, поскольку они допускают парциальность, т.е. неравное разделение потоков рабочего тела в “теплых” и “холодных” ветвях цикла, и обеспечивают при этом существенно различные количества генерируемых

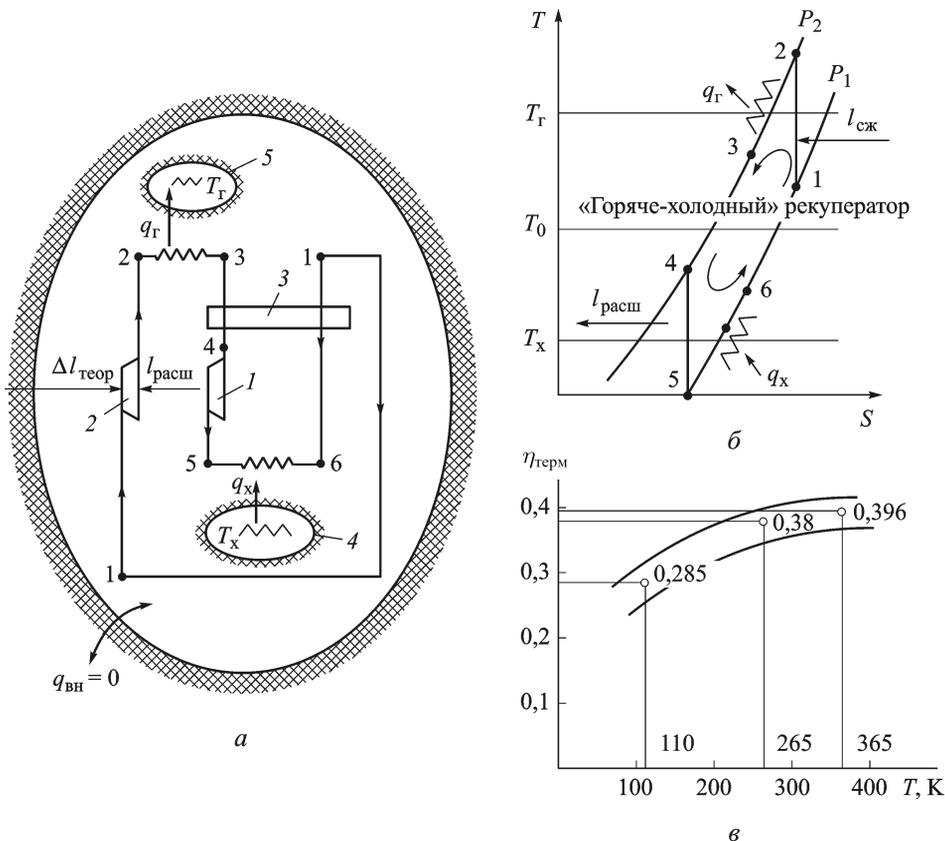


Рис. 1. Принципиальная схема цикла с общим «горяче-холодным» рекуператором (а), изображение цикла в TS координатах (б) и характеристика цикла (в)

теплоты и холода в достаточно широких диапазонах температур T_{Γ} и $T_{\text{Х}}$. Разработки интегрированных циклов откроют в будущем новые возможности и направления в развитии техники низких температур.

Статья о возможных вариантах газовых интегрированных циклов была опубликована в журнале «Холодильная техника» (№ 1 в 2012 г.). На рис. 1 приведены значения степени термодинамического совершенства воздушного интегрированного цикла с общим горяче-холодным рекуператором.

Запишем характерные основные уравнения квазиреальной системы:

$$T_3 - T_1 = T_4 - T_6;$$

$$q_{\Gamma} = \Delta l_{\text{теор}} + q_{\text{Х}};$$

$$\Delta l_{\text{теор}} = l_{\text{сж}} - l_{\text{расш}};$$

$$\frac{q_{\Gamma}}{T_{\Gamma}} - \frac{q_{\text{Х}}}{T_{\text{Х}}} = \sum \Delta S'_i,$$

в результате получим

$$\Delta l_{\text{теор}} = q_x \frac{T_r - T_x}{T_x} + T_r \sum \Delta S'_i$$

или

$$\Delta l_{\text{теор}} = (l_{\text{min}})_{q_x} + T_r \sum \Delta S'_i.$$

Степень термодинамического совершенства интегрированного цикла имеет тенденцию повышения при увеличении разности температур генерируемой теплоты при T_r и генерируемого холода при T_x . Это обстоятельство объясняется тем, что величина l_{min} при этих условиях увеличивается быстрее, чем работа сжатия. Следует отметить, что коэффициент преобразования затрачиваемой работы в теплоту q_r (нагревательный коэффициент) для этого цикла невелик и составляет порядка 1,1–1,5. Чтобы увеличить коэффициент преобразования работы в теплоту q_r , целесообразно использовать возможные варианты циклов с введением в них теплоты из окружающей среды (рис. 2).

На рис. 2, *а* показана схема такого интегрированного воздушного цикла с одним горячим рекуператором и его изображение в TS координатах (см. рис. 2, *б*): 1 – детандер; 2 – компрессор; 3 – теплообменник – “горячий” рекуператор; 4 – холодильная или морозильная камеры; 5 – обогреваемый объект; 6 – окружающая среда с температурой T_0 ; 1, ... , 7 – точки на схеме, соответствующие точкам цикла.

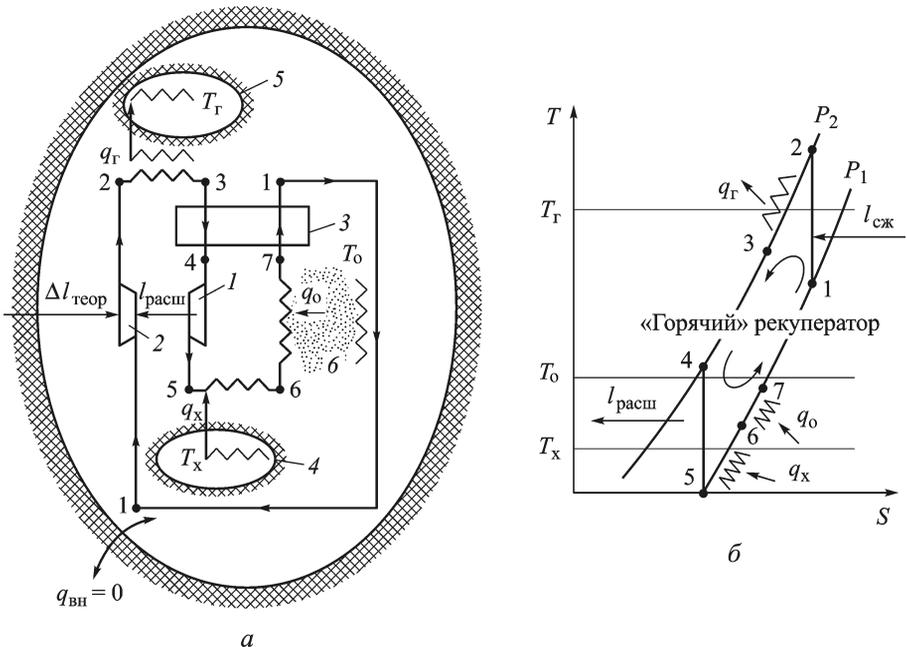


Рис. 2. Принципиальная схема (*а*) и $T-S$ диаграмма цикла с “горячим” рекуператором (*б*)

Основные характерные соотношения квазиреальной системы следующие:

$$\begin{aligned} T_4 - T_7 &= T_3 - T_1; \\ q_{\Gamma} &= q_x + q_o + \Delta l_{\text{теор}}; \\ \Delta l_{\text{теор}} &= l_{\text{сж}} - l_{\text{расш}}; \\ -\frac{q_o}{T_o} - \frac{q_x}{T_x} + \frac{q_{\Gamma}}{T_{\Gamma}} &= \sum \Delta S'_i; \end{aligned}$$

после образований получаем:

$$\Delta l_{\text{теор}} = q_o \frac{T_{\Gamma} - T_o}{T_o} + q_x \frac{T_{\Gamma} - T_x}{T_x} + T_{\Gamma} \sum \Delta S'_i$$

или

$$\Delta l_{\text{теор}} = (l_{\min})_{q_o} + (l_{\min})_{q_x} + T_{\Gamma} \sum \Delta S'_i;$$

P, T, q, l — давление, температура, теплота и работа в соответствующих процессах и точках цикла.

В табл. 1 и 2 и на рис. 3 приведены результаты анализа этой схемы для двух значений степени сжатия $\sigma = p_{\text{сж}}/p_{\text{вс}}$ ($\sigma = 3$ и $\sigma = 5$). Достигаемые температуры для охлаждения и обогрева $(T_x)_{\text{ср}}$ и $(T_{\Gamma})_{\text{ср}}$ представляются вполне пригодными и реальными для многих практических случаев использования подобных генераторов теплоты и холода. Подчеркнем, что в исследованном цикле используется только “горячий” рекуператор (при температурах всасывания более 320 К), а при температуре всасывания 300 К рекуператор и вовсе отсутствует, так как он не нужен.

При анализе использованы следующие обозначения: $(T_x)_{\min}$, $(T_x)_{\max}$; $(T_x)_{\text{ср}}$ и $(T_{\Gamma})_{\max}$, $(T_{\Gamma})_{\min}$, $(T_{\Gamma})_{\text{ср}}$ — минимальная, максимальная и средняя температуры рабочего тела в холодной и горячей ветвях цикла; $(T_o)_{\text{ср}}$ — средняя температура рабочего тела на участке цикла, воспринимающего теплоту из окружающей среды; q_{Γ} — отдаваемая теплота из горячей ветви цикла обогреваемому объекту; q_x — вводимая теплота (холод) в холодную ветвь цикла от охлаждаемого объекта; $(T_{\text{вс}})_{\text{сж}}$ — температура воздуха при всасывании в компрессор; $(l_{\text{сж}})_{\text{дейст}}$ — действительная работа сжатия; $l_{\text{расш}}$ — действительная работа расширения; $(l_{\min})_{q_o}$ — термодинамически минимально необходимая работа для переноса теплоты q_o с уровня температуры $(T_o)_{\text{ср}}$ на уровень $(T_{\Gamma})_{\text{ср}}$; $(l_{\min})_{q_x}$ — термодинамически минимально необходимая работа для переноса теплоты q_x с температурного уровня $(T_x)_{\text{ср}}$ на

уровень $(T_{\Gamma})_{\text{ср}}$; $\eta_{\text{терм}} = \frac{\sum l_{\min}}{(l_{\text{сж}})_{\text{дейст}} - l_{\text{расш}}}$ — степень термодинамического

совершенства интегрированного цикла; $\varepsilon_{q_x} = \frac{q_x}{(l_{\text{сж}})_{\text{дейст}} - l_{\text{расш}}}$ — холо-

дильный коэффициент интегрированного цикла; $\varepsilon_{q_{\Gamma}} = \frac{q_{\Gamma}}{(l_{\text{сж}})_{\text{дейст}} - l_{\text{расш}}}$

Результаты вычислений параметров и характеристик интегрированного воздушного цикла для одновременной генерации теплоты и холода при $\sigma = p_{сж}/p_{вс} = 5$. Варьирование T_r и результаты вычислений при $(T_x)_{ср} \sim 225 \text{ К}$; $(T_x)_{\min} = 210 \text{ К}$; $(T_x)_{\max} = 240 \text{ К}$; $q_x = 30 \text{ кДж/кг}$; $q_0 = 55 \text{ кДж/кг}$; $(T_0)_{ср} = 267,5 \text{ К}$; $(\eta_s)_{сж} = 0,8$; $(\eta_s)_{расш} = 0,8$; $q_0/q_x = 1,9$

$(T_{вс})_{сж}$, К	$(T_r)_{\max}$, К	$(T_r)_{\min}$, К	$(T_r)_{ср}$, К	$(l_{сж})_{дейст.}$, кДж/кг	$(l_{сж})_{дейст.} - l_{расш}$, кДж/кг	q_r , кДж/кг	$(l_{\min})_{q_0}$, кДж/кг	$(l_{\min})_{q_x}$, кДж/кг	$\sum l_{\min}$, кДж/кг	$\eta_{терм} = \frac{\sum l_{\min}}{l_{сж} - l_{расш}}$	$\varepsilon_{q_r} = \frac{q_r}{l_{сж} - l_{расш}}$	$\varepsilon_{q_x} = \frac{q_x}{l_{сж} - l_{расш}}$
300	518,6	305	411,8	218,6	128,6	213,6	29,67	24,9	54,57	0,42	1,66	0,23
320	553,2	325	439	233,2	143,2	228,7	35,26	28,53	63,79	0,45	1,59	0,21
340	588,1	345	466,55	248,1	158,1	243,1	40,93	32,2	73,13	0,46	1,54	0,19
360	622,35	365	493,67	262,35	172,35	257,35	46,5	35,82	82,32	0,48	1,49	0,17
380	656,93	385	520,96	276,93	186,93	271,93	52,11	39,46	91,57	0,49	1,45	0,16

Результаты вычислений параметров и характеристик интегрированного воздушного цикла для одновременной генерации теплоты и холода при $\sigma = p_{сж}/p_{вс} = 3$; $(T_x)_{ср} = 242 \text{ К}$; $(T_x)_{\min} = 231 \text{ К}$; $(T_x)_{\max} = 253 \text{ К}$; $(\eta_s)_{расш} = 0,85$; $(\eta_s)_{сж} = 0,85$; $L_{расш} = 69 \text{ кДж/кг}$; $q_x = 22 \text{ кДж/кг}$; $q_0 = 42 \text{ кДж/кг}$; $(T_0)_{ср} = 274 \text{ К}$; $q_0/q_x = 1,9$

$(T_{вс})_{сж}$, К	$(T_r)_{\max}$, К	$(T_r)_{\min}$, К	$(T_r)_{ср}$, К	$(l_{сж})_{дейст.}$, кДж/кг	$(l_{сж})_{д.} - l_{расш}$, кДж/кг	q_r , кДж/кг	$(l_{\min})_{q_0}$, кДж/кг	$(l_{\min})_{q_x}$, кДж/кг	$\sum l_{\min}$, кДж/кг	$\eta_{терм} = \frac{\sum l_{\min}}{l_{сж} - l_{расш}}$	$\varepsilon_{q_r} = \frac{q_r}{l_{сж} - l_{расш}}$	$\varepsilon_{q_x} = \frac{q_x}{l_{сж} - l_{расш}}$
300	430,1	305	367,5	130,1	61,1	125,1	14,33	11,4	25,73	0,42	2,04	0,36
320	462,35	325	393,7	142,35	73,35	137,35	18,35	13,79	32,14	0,438	1,87	0,3
340	487,5	345	416,24	147,5	78,5	142,5	21,8	15,84	37,64	0,479	1,81	0,28
360	516,5	365	440,58	156,5	87,5	151,5	25,53	18,05	43,58	0,498	1,73	0,25

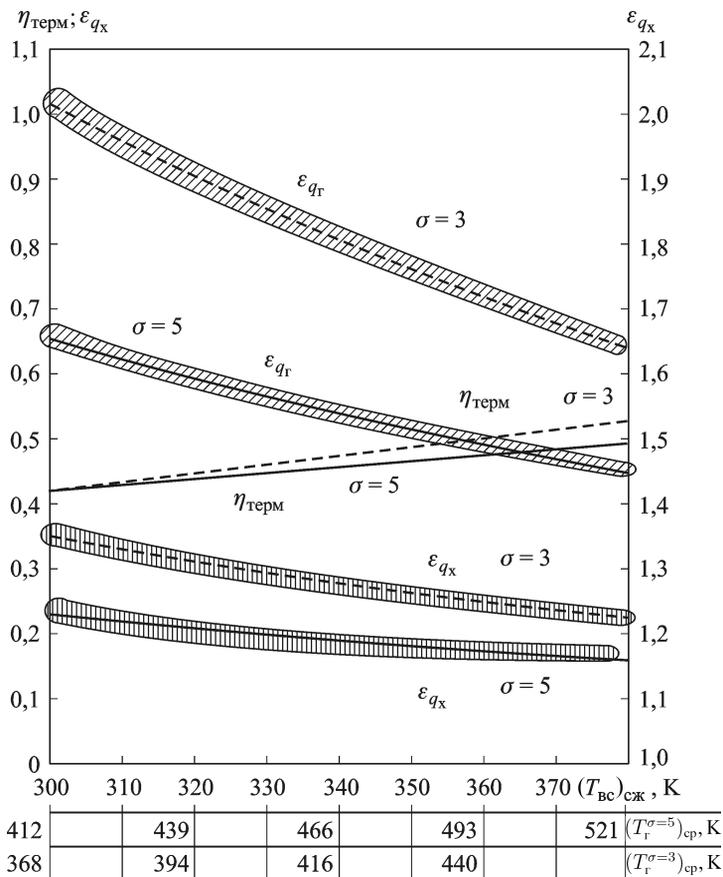


Рис. 3. Характеристики интегрированного цикла с одним “горячим” рекуператором

— коэффициент преобразования затрачиваемой работы в теплоту q_G (нагревательный коэффициент интегрированного цикла) $\sigma = p_{сж}/p_{вс}$.

Выводы. 1. Общая степень термодинамического совершенства исследованного варианта воздушного интегрированного цикла для одновременной генерации теплоты и холода находится на уровне от 42 до 51 % и несомненно представляется высокой, поскольку в расчетах фигурируют реальные значения работы сжатия и расширения и реальная величина недорекуперации в рекуператоре (не учтены потери q_X и q_G).

2. Различия значений $\eta_{терм}$ для степеней сжатия 5 и 3 находятся в пределах от 1 до 2 %.

3. При степени сжатия $\sigma = 3$ достигаются существенно более высокие значения коэффициентов преобразования ε_{q_G} и ε_{q_X} .

4. Практически, если приведенные в расчете температуры $(T_X)_{ср}$ и $(T_G)_{ср}$ удовлетворяют заказчика, рациональную степень сжатия для воздушного интегрированного цикла можно выбирать в пределах от 2,7 до 3,1.