

А. М. Ибраев, М. С. Хамидуллин, Т. Н. Мустафин

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ ОТ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Ключевые слова: пароконденсационная холодильная машина, потери от дросселирования.

Разработана методика оценки потерь от дросселирования на эффективность холодильных машин. Полученная методика может быть использована при обосновании выбора хладагента для вновь проектируемых холодильных машин

Keywords: vapor compression refrigeration machine, the loss from throttle.

Technique was developed to estimate the losses from throttle on the efficiency of chillers. The resulting technique can be used to justify the choice of refrigerant for the newly designed refrigeration machines

Энергетическая эффективность пароконденсационной холодильной машины (ПХМ), как сложного технического комплекса, зависит от большого количества факторов. Повышение эффективности в связи с этим является многозадачным комплексом исследовательских работ [1,2] в который входят в частности исследования по повышению эффективности процессов, происходящих в отдельных элементах холодильных машин, работы по согласованию и оптимизации характеристик этих элементов, работы по созданию новых холодильных агентов. Важной составляющей такого комплекса являются работы по оптимизации термодинамических циклов ПХМ.

На практике идеальный цикл (цикл Карно) ПХМ в области влажного пара, является неосуществимым, что связано с невозможностью технически выполнить ряд процессов идеального цикла. Это приводит к вынужденным заменам обратимых процессов идеального цикла на необратимые процессы. К таким процессам в частности относятся дросселирование жидкого холодильного агента. Этим процессам присущи потери соответственно от дросселирования и от перегрева. Термодинамические исследования этих видов потерь чрезвычайно важны с точки зрения выбора стратегии по их уменьшению в реальных циклах ПХМ. От результатов этих исследований зависит выбор тех или иных процессов термодинамического цикла и оптимальной схемы машины.

Подобный анализ для наиболее популярных для того времени холодильных агентов был выполнен в 60-е годы прошлого столетия Розенфельдом Л.М.[3]. Им же были выведены аналитические зависимости позволяющие выполнить расчёты для последующего анализа. Однако, в связи с экологическими требованиями озонобезопасности и безопасностью по парниковому эффекту, произошла практически полная смена холодильных агентов применяемых в ПХМ. Это предопределяет актуальность настоящего исследования для новых агентов. Кроме этого, по ряду соображений, в данной работе выполнены новые выводы аналитических зависимостей для выполнения расчётов.

В идеальном цикле ПХМ состояние вещества в точке 3 [2,3,4] насыщенная жидкость – практически несжимаемая среда. В связи с этим процесс её

изоэнтروпного расширения 3-4_s – технически неосуществимый процесс. Поэтому в реальных ПХМ его заменяют на процесс дросселирования. В схеме ПХМ изоэнтропная расширительная машина PM_S заменяется на дроссельное устройство, а идеальный цикл Карно – 1-2-3-4_s (рис.1) превращается в теоретический цикл 1-2-3-4_n, так как введен необратимый процесс – дросселирование 3-4_n.

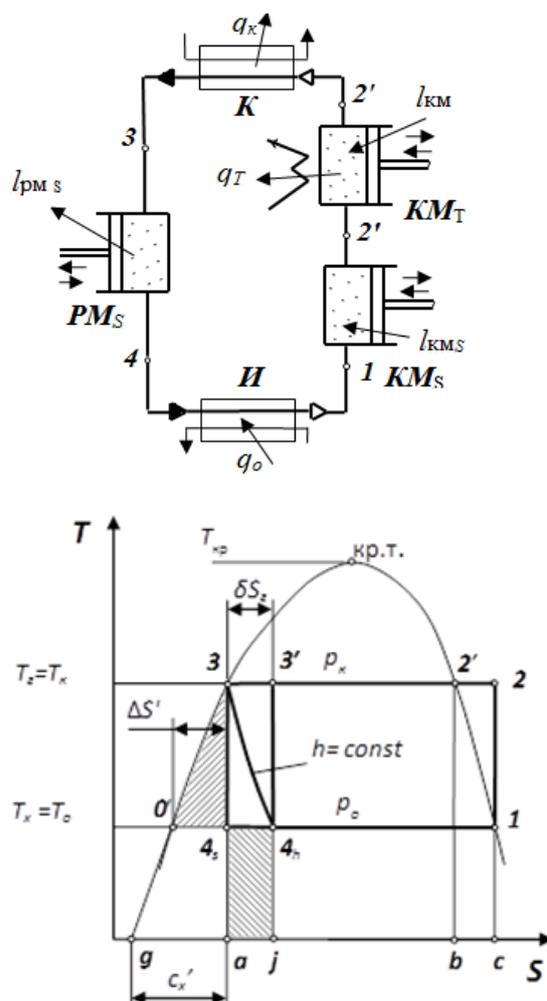


Рис. 1 – Схема и теоретический цикл ПХМ

Введение процесса дросселирования вместо изоэнтропного расширения приводит к потере воз-

вращенной расширительной машиной работы $l_{pm} = h_3 - h_{4s} \sim \text{пл. } 3-0-4s$.

В этом случае работа, совершаемая в теоретическом цикле с дросселированием, будет равна технической работе компрессорных машин KM_S и KM_T

$$l_m = l_{km} \sim \text{пл. } 1-2-3-0.$$

С другой стороны введение процесса дросселирования приводит к снижению величины удельной холодопроизводительности. Удельная холодопроизводительность теоретического цикла с дросселированием составит:

$$Q_{om} = (h_1 - h_{4h}) = ((r_k / T_k + \Delta S'') - (S_j - S_a)) \cdot T_o \sim \text{пл. } j-4_h - 1-c,$$

Потеря в холодопроизводительности по сравнению с идеальным циклом составит

$$\begin{aligned} \Delta q_o &= (S_j - S_a) \cdot T_o = \\ &= h_{4h} - h_{4s} \sim \text{пл. } a-4_s - 4_h - j \cdot \Delta q_o = \\ &= (S_j - S_a) \cdot T_o = h_{4h} - h_{4s} \sim \text{пл. } a-4_s - 4_h - j. \end{aligned}$$

В совокупности эти потери называются «потерями от дросселирования».

В процессе дросселирования $h_3 = h_{4h}$. Следовательно величина потери удельной холодопроизводительности цикла равна потерянной возвращаемой работе расширительной машины PM_T :

$$\Delta q_o = h_{4h} - h_{4s} = h_3 - h_{4s} = l_{pm},$$

что означает равенство площадок $\text{пл. } 3-0-4s = \text{пл. } a-4s-4_h-j$.

Полученный результат соответствует закону сохранения энергии. Внутренняя работа, совершаемая газом при дросселировании против сил межмолекулярного взаимодействия, превращается в тепловую энергию, на отвод которой необходимо затратить часть холодопроизводительности Δq_o .

Холодильный коэффициент теоретического цикла с дросселированием может быть представлен как

$$\varepsilon_{op} = \frac{q_r}{l_r} = \frac{q_{o_{ud}} - \Delta q_o}{l_{ud} + l_{pm}} = \frac{q_{o_{ud}} - l_{pm}}{l_{ud} + l_{pm}}.$$

Если числитель и знаменатель выражения поделить на l_{ud} , получим

$$\varepsilon_{op} = \frac{\varepsilon_{ud} - l_{pm} / l_{ud}}{1 + l_{pm} / l_{ud}},$$

где $\varepsilon_{ud} = T_o / (T_k - T_o)$ – холодильный коэффициент идеального цикла.

Величину работы расширительной машины l_{pm} можно выразить через площадь треугольника 3-0-4s. Если пренебречь кривизной изобары p_k на участке 3-0

$$\begin{aligned} l_{pm} &= \frac{1}{2} \cdot 04s \cdot (T_k - T_o) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \Delta S' \cdot (T_k - T_o) \end{aligned}$$

Если также пренебречь кривизной линии насыщенной жидкости в границах между T_k и T_o и принять, что она совпадает с изобарой p_k на участ-

ке 3-0, то отрезок \overline{ga} , на оси абсцисс, является средней теплоёмкостью вещества рабочего тела в точке c_x' , в процессе идущем по линии насыщенной жидкости. Пренебрежение кривизной линий не вносит заметной погрешности, если холодильный цикл построен в достаточном отдалении от критической точки.

Следует отметить, что Розенфельд при выводе формулы работы расширительной машины [3] так же принимает, что изобара p_k совпадает с линией насыщенной жидкости, что позволяет принять $c_p = c_x'$. В дальнейшем он воспользовался формулой для определения изменения энтропии в изобарном процессе идеального газа. Это вносит в получаемые аналитические выражения логарифмическую функцию и усложняет их преобразование. А замена логарифмической функции на первый член из её разложения в ряд Тейлора вносит погрешность вполне соизмеримую с погрешностями принятых нами допущений.

Из подобия треугольников 3-0-4s и 3-g-a получим

$$\frac{\Delta S'}{c_x'} = \frac{T_k - T_o}{T_k}.$$

Тогда основание треугольника 3-0-4s

$$\Delta S' = c_x' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_k}$$

и возвращаемая работа расширительной машины, а также и равная ей по величине потеря холодопроизводительности цикла, определяются

$$l_{pm} = \Delta q_o = \frac{1}{2} \cdot \Delta S' \cdot (T_k - T_o) = \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_o)^2}{T_k}.$$

Как видно из полученной формулы, величина l_{pm} и площадь треугольника 3-0-4s зависят от температурных границ цикла (T_k , T_o), которые определяют высоту треугольника, и от теплоёмкости вещества рабочего тела в процессе, идущем по линии насыщенной жидкости c_x' , которая характеризуют наклон линии насыщенной жидкости и величину основания треугольника 3-0-4s.

Поскольку

$$\Delta q_o \sim \text{пл. } a-4_s-4_h-j = T_o \cdot (S_j - S_a), \text{ то}$$

$$S_j - S_a = \frac{1}{2} \cdot \Delta S' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_o} = \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_o)^2}{T_k \cdot T_o}.$$

Тогда, удельная холодопроизводительность теоретического цикла с дросселированием может быть записана также и следующим образом

$$\begin{aligned} q_o &= T_o \cdot \left(\frac{r_k}{T_k} + \Delta S'' - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta S'}{\varepsilon_{o_{ud}}} \right) = \\ &= T_o \cdot \left(\frac{r_k}{T_k} + c_x'' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_o} - \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_o)^2}{T_k \cdot T_o} \right) = \\ &= T_o \cdot \left(\frac{r_k}{T_k} + \frac{c_x''}{\varepsilon_{ud}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{c_x'}{\varepsilon_{ud}} \cdot \frac{T_k - T_o}{T_k} \right). \end{aligned}$$

Если принять во внимание формулы представленные в работе [1], то можно получить связь величины теплоты парообразования при температу-

ре конденсации r_k с величиной теплоты парообразования при температуре кипения T_o

$$r_o = T_o \cdot \left(\frac{r_k}{T_k} + \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_o)^2}{T_k \cdot T_o} + c_x'' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_o} \right) =$$

$$= r_k \cdot \frac{T_o}{T_k} + \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_o)^2}{T_k} + c_x'' \cdot (T_k - T_o).$$

где c_x'' - теплоемкость в процессе по линии насыщенного газа.

Формула для холодильного коэффициента теоретического цикла с дросселированием с учетом вышеизложенных зависимостей и преобразования будет выглядеть

$$\varepsilon_{уд} = \frac{\varepsilon_{уд} \cdot \frac{r_k}{T_k} + c_x'' - \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_k}}{1 + \frac{1}{2} \cdot \Delta S' / \left(\frac{r_k}{T_k} + \Delta S' \right)} = \frac{\varepsilon_{уд} \cdot \frac{r_k}{T_k} + c_x'' - \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_k}}{\frac{r_k}{T_k} + \frac{c_x''}{\varepsilon_{уд}} + \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_k}}.$$

Из формулы видно, что величина холодильного коэффициента теоретического цикла, в отличие от идеального, зависит не только от режимных параметров (температурных границ цикла T_k и T_o), но и от термодинамических свойств вещества рабочего тела c_x' , c_x'' и r .

Так рост величины теплоемкости c_x' увеличивает величину потерянной работы расширительной машины l_{pm} и потерю холодопроизводительности цикла Δq_o , а следовательно снижает холодильный коэффициент ε_T . Если c_x' стремится к нулю, то линия насыщенной жидкости на диаграмме стремится к вертикали, величина потерянной работы расширительной машины l_{pm} стремится к нулю, а холодильный коэффициент ε_T стремится к $\varepsilon_{уд}$.

Из формы линии насыщенного состояния жидкости видно, что по мере смещения границ холодильного цикла к $T_{кр}$ происходит рост c_x' , и при T_k стремящейся к $T_{кр}$ теплоемкость c_x' стремится к бесконечности. Поэтому циклы, имеющие температурные границы близкие к $T_{кр}$, имеют большие потери от дросселирования. В связи с этим при выборе вещества рабочего тела для конкретного холодильного цикла ПХМ и в этом случае следует придерживаться правила $T_k / T_{кр} \leq 0,85$.

Из вышеизложенного очевидно, что теплота парообразования r и теплоемкость c_x'' не оказывают

влияния на величину абсолютных потерь от введения процесса дросселирования. Однако величина холодильного коэффициента ε_T зависит от неё. Это объясняется тем, что при росте r , c_x'' и $l_{уд}$ относительная доля дополнительной работы l_{pm} в общей работе цикла с дросселированием снижается. Аналогично снижается и доля потерь холодопроизводительности от дросселирования в величине холодопроизводительности цикла. Величина теплоемкости c_x'' оказывает противоречивое влияние на характеристики цикла ПХМ. С одной стороны её рост увеличивает теплоту парообразования холодильного агента при температуре кипения T_o , с другой увеличивает потери от перегрева. При выборе холодильного агента, при прочих равных характеристиках, предпочтение отдают тому, у которого больше величина r и меньшие величины c_x' и c_x'' .

Коэффициент обратимости цикла с дросселированием можно определить из следующего выражения

$$\eta_{op} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{уд}} = \frac{\frac{r_k}{T_k} + \frac{c_x''}{\varepsilon_{уд}} - \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_o)^2}{T_k \cdot T_o}}{\frac{r_k}{T_k} + \frac{c_x''}{\varepsilon_{уд}} + \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{T_k - T_o}{T_k}}.$$

Полученные в данной работе, а также в работе [1] аналитические зависимости могут далее использоваться для термодинамического анализа циклов ПХМ, работающих на различных холодильных агентах.

Литература

1. Ибраев, А.М. Влияние потерь от перегрева на эффективность работы пароконденсационных холодильных машин / Т.Н. Мустафин, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев, Г.Н. Чекушкин. // Вестник Казан.технол. ун-та – 2013 – № 7 – С. 225-229.
2. Мустафин, Т.Н. Анализ геометрии профилей роторов героторного компрессора / Т.Н. Мустафин, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев, Г.Н. Чекушкин. // Вестник Казан.технол. ун-та – 2010 – № 10 – С. 287-292.
3. Розенфельд, Л.М. Холодильные машины и аппараты / А.Г. Ткачев // М.: Государственное издательство торговой литературы – 1960.
4. 2009 ASHRAE Handbook.