

Энергетическая эффективность парокомпрессионной 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 безопасности 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 изобарного расширения 3-4s – технически неосуществимый процесс. Поэтому в реальных ПХМ его заменяют на процесс дросселирования. В схеме ПХМ изобарная расширительная машина PMS заменяется на дроссельное устройство, а идеальный цикл Карно – 1-2-3-4s (рис.1) превращается в теоретический цикл 1-2-3-4h, так как введен необратимый процесс – дросселирование 3-4h. Рис. 1 – Схема и теоретический цикл ПХМ

Введение процесса дросселирования вместо изобарного расширения приводит к потере возвращенной расширительной машиной работы. В этом случае работа, совершаемая в теоретическом цикле с дросселированием, будет равна технической работе компрессорных машин KMS и KMT. С другой стороны введение процесса дросселирования приводит к снижению величины удельной холодопроизводительности. Удельная холодопроизводительность

теоретического цикла с дросселированием составит: Потеря в холодопроизводительности по сравнению с идеальным циклом составит В совокупности эти потери называются «потерями от дросселирования». В процессе дросселирования $h_3 = h_4$. Следовательно величина потери удельной холодопроизводительности цикла равна потерянной возвращаемой работе расширительной машины РМТ: что означает равенство площадей. 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. Холодильный коэффициент теоретического цикла с дросселированием может быть представлен как Если числитель и знаменатель выражения поделить на $l_{ид}$, получим где – холодильный коэффициент идеального цикла. Величину работы расширительной машины $l_{рм}$ можно выразить через площадь треугольника 3-0-4s. Если пренебречь кривизной изобары p_k на участке 3-0. 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 участке 3-0, то отрезок, на оси абсцисс, является средней теплоёмкостью вещества рабочего тела в точке $s_{x'}$, 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 $s_p = s_{x'}$. В дальнейшем он воспользовался формулой для определения изменения энтропии в изобарном процессе идеального газа. Это вносит в получаемые аналитические выражения логарифмическую функцию и осложняет 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. Тогда основание треугольника 3-0-4s и возвращаемая работа расширительной машины, а также и равная ей по величине потеря холодопроизводительности цикла, определяются Как видно из полученной формулы, величина $l_{рм}$ 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 $s_{x'}$, которая характеризуют наклон линии насыщенной жидкости и величину основания треугольника 3-0-4s. Поскольку, то Тогда, удельная холодопроизводительность теоретического цикла с дросселированием может быть записана также и следующим образом Если принять во внимание формулы представленные в работе [1], то можно получить связь величины теплоты парообразования при температуре конденсации q_k с

величиной теплоты парообразования при температуре кипения T_0 где - теплоемкость в процессе по линии насыщенного газа. Формула для холодильного коэффициента теоретического цикла с дросселированием с учетом вышеизложенных зависимостей и преобразования будет выглядеть 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_0), но и от термодинамических свойств вещества рабочего тела s_k' , s_k'' и g . Так рост величины теплоёмкости s_k' увеличивает величину потерянной работы расширительной машины l_{pm} и потерю холодопроизводительности цикла Q_0 , а следовательно снижает холодильный коэффициент ϵ_t . Если s_k' 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 $\epsilon_{ид}$. Из формы линии насыщенного состояния жидкости видно, что по мере смещения границ холодильного цикла к $T_{кр}$ происходит рост s_k' , и при T_k стремящейся к $T_{кр}$ теплоёмкость s_k' 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 g и теплоёмкость s_k'' 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 g , s_k'' и $l_{ид}$ 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 теплоёмкости s_k'' оказывает противоречивое влияние на характеристики цикла ПХМ. С одной стороны её рост увеличивает теплоту парообразования холодильного агента при температуре кипения T_0 , с другой увеличивает потери от перегрева. При выборе холодильного агента, при прочих равных характеристиках, предпочтение отдадут тому, у которого больше величина g и меньшие величины s_k' и s_k'' . Коэффициент обратимости цикла с дросселированием можно определить из следующего выражения Полученные в данной работе, а также в работе [1] аналитические зависимости могут далее использоваться для термодинамического анализа циклов ПХМ, работающих на различных холодильных агентах.