

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН ПО ВЕЛИЧИНАМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ И ПЕРЕГРЕВА

Ключевые слова: холодильная машина, хладагент, анализ работы.

Одними из наиболее ответственных этапов проектирования холодильных машин определяется выбором ее схемы и хладагента. Во многом их эффективность определяет сочетание данных двух факторов. Анализ свойств может помочь выработать рекомендации по выбору холодильного агента на стадии проектирования холодильной машины

Keywords: refrigeration machine, refrigerant, analysis of the working process.

One of the mains stage of refrigeration machine developments are choice of refrigerant and refrigeration machines structure. Its efficacy will determined by complex choice of this both factor.

Запрет и ограничение по экологическим соображениям традиционных холодильных агентов (в первую очередь хладонов R12 и R22) подтолкнула работы связанные с разработкой новых экологически безопасных веществ, молекулы которых не содержат атомы хлора и брома, к использованию их в качестве холодильных агентов парокомпрессионных холодильных машин (ПХМ).

Появление новых холодильных агентов в свою очередь делает актуальной задачу исследования структуры энергетических потерь, возникающих в термодинамическом цикле ПХМ при использовании этих агентов. Анализ структуры энергетических потерь позволяет определить, какие из потерь следует минимизировать в первую очередь путём рационального построения схемы ПХМ.

В данной работе выполняется анализ термодинамических свойств и энергетических потерь дросселирования и перегрева [1, 2], возникающих в цикле ПХМ для наиболее распространенных в настоящее время холодильных агентов.

Таковыми агентами являются: аммиак и галогенные производные углеводородов не содержащие в составе молекул хлора и брома.

Аммиак R717 (NH_3). Агент используют в ПХМ для получения температур кипения до минус 30°C , без вакуума в системе охлаждения. Обладает прекрасными термодинамическими свойствами. Является одним из первых (с середины 19 века) холодильных агентов ПХМ. Экологически безопасен, но токсичен и взрывоопасен. Широко распространен, однако, в России после передачи аммиачных холодильных установок в ведение Ростехнадзора, его популярность значительно снизилась.

Хладагент R12 (CF_2Cl_2). Один из наиболее распространенных и безопасных в эксплуатации до 90-х годов 20-го столетия хладагентов. Хладон R12 применяют в холодильных машинах с температурой кипения не ниже минус 30°C . В настоящее время, по экологическим соображениям, международными соглашениями его использование запрещено.

Хладагент R22 (CHF_2Cl). Обладает хорошими теплофизическими и термодинамическими характеристиками, нетоксичен и невзрывоопасен. Применение

R22 в ПХМ обеспечивает диапазон температур кипения от $+10$ до минус 40°C . Хотя молекула R22 содержит атом хлора, хладагент имеет низкий озоноразрушающий потенциал и его использование разрешено до 2030 года.

Хладагент R134a ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$). Хладагент R134a разработан, как озонобезопасная замена R12 и достаточно широко применяется в настоящее время.

Хладагент R404a (зеотропная смесь R125/R143a/R134a). Хладагент разработан, как озонобезопасная замена R12 и R22 в области низких и средних температур. Широко применяется в настоящее время.

Хладагент R407c (зеотропная смесь R-32/R-125/R-134a). Хладагент R407c разработан как озонобезопасная альтернатива R22 для использования в системах кондиционирования воздуха.

Хладагент R410a (зеотропная бинарная смесь хладагентов R32/R125). Хладагент R410a разработан для замены R22, однако обладает повышенным давлением в элементах ПХМ, по сравнению с R22, что часто требует использования специального холодильного оборудования. Хладагент R410a распространен в современных бытовых кондиционерах.

Хладагент R600a (C_4H_{10} – изобутан). Находит применение в домашних холодильниках, как экологически безопасная замена R12. Масса его заправки в холодильный агрегат (менее 50 грамм), значительно меньше, чем в случае применения галогенных производных углеводородов. Это позволяет отказаться от соблюдения дополнительных мер безопасности связанных с пожаро- и взрывоопасностью.

Для сравнения холодильных агентов по энергетическим потерям дросселирования и перегрева выполнены расчёты по соотношению величин коэффициентов обратимости для циклов позволяющих оценить влияние потерь перегрева и дросселирования. [2]. Производился расчёт только первичных потерь от перегрева [3], то есть для цикла без перегрева пара перед всасыванием в компрессор. Поскольку общие потери перегрева

при сравнении между собой различных холодильных агентов, при одинаковой величине перегрева на всасывании, практически линейно зависят от первичных, то их вполне можно использовать в качестве сравнительной характеристики. При выполнении расчётов не учитывался температурный слайд зеатропных смесей (R404a, R407c, R410a), поскольку его влияние на величину потерь дросселирования и перегрева пренебрежимо мало. Расчёты производились по формулам [1,2]

$$\eta_{\text{пер}} = 1 - \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta S^2}{c_p} \cdot T_k}{\left(\frac{r}{T_k} + \Delta S\right) \cdot (T_k - T_0) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta S^2}{c_p} \cdot T_k},$$

где $\Delta S = c_x'' \cdot \frac{T_k - T_0}{T_0}$; c_p, r – изобарная теплоёмкость

насыщенного пара и теплота парообразования соответственно при температуре конденсации T_k ; T_0 – температура кипения; c_x'' – величина теплоёмкости насыщенного пара, в процессе идущем по правой пограничной кривой (линии насыщенного пара).

$$\eta_{\text{др}} = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_{\text{ид}}} = \frac{\frac{r}{T_k} + \frac{c_x''}{\epsilon_{\text{ид}}} - \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{(T_k - T_0)^2}{T_k \cdot T_0}}{\frac{r}{T_k} + \frac{c_x''}{\epsilon_{\text{ид}}} + \frac{1}{2} \cdot c_x' \cdot \frac{T_k - T_0}{T_k}}.$$

Здесь $\epsilon_{\text{ид}} = \frac{T_0}{T_k - T_0}$ – холодильный коэффициент

цикла Карно, c_x' – величина теплоёмкости насыщенной жидкости, в процессе идущем по левой пограничной кривой (линии насыщенной жидкости).

Коэффициент обратимости $\eta_{\text{др}}$ является отношением холодильного коэффициента теоретического цикла ПХМ, в котором из энергетических потерь присутствуют только потери от дросселирования, к холодильному коэффициенту идеального цикла Карно. Коэффициент обратимости $\eta_{\text{пер}}$ является отношением холодильного коэффициента теоретического цикла ПХМ, в котором из энергетических потерь присутствуют только потери от перегрева, к холодильному коэффициенту идеального цикла Карно.

Величина теплоёмкости c_x' при выполнении расчётов определялась, в соответствии с допущениями принятыми при выводе формул [2] и построением (рис.1), как

$$c_x' = T_k \cdot (s_3 - s_0) / (T_k - T_0).$$

Здесь s – удельная энтропия хладагента, индексы соответствуют номерам точек цикла (см. рис.1).

Величина теплоёмкости насыщенного пара, в процессе идущем по правой пограничной кривой (линии насыщенного пара) c_x'' определялась в соответствии с принятыми в работе [1] допущениями и обозначениями рис. 1

$$c_x'' = \frac{s_2' - s_0}{1 - (T_k / T_0)}.$$

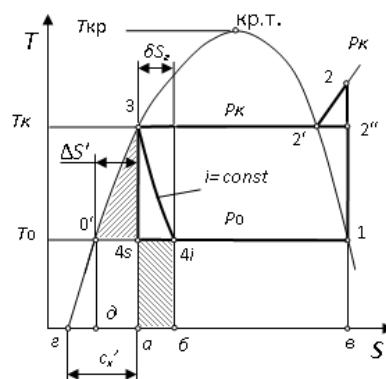


Рис. 1 - Теоретический цикл ПХМ

Результаты расчётов представлены в виде графиков на рис. 2 и рис. 3. Из графика на рис.2 следует, что величина потерь от дросселирования увеличивается со снижением температуры кипения T_0 и для большинства рассмотренных агентов эти потери близки по величине. Исключением являются потери дросселирования для аммиака (R717) и хладона R404a. У аммиака эти потери заметно ниже, чем у остальных органических холодильных агентов, а у R404a они выше. При этом скорость снижения величины коэффициента обратимости со снижением температуры кипения у R600a и R404a более высокая, чем у остальных агентов. При анализе первичных потерь от перегрева (рис. 3) наблюдается совершенно противоположная картина. Здесь наибольшие потери уже у аммиака, в то время как у остальных агентов они весьма невелики и близки по величине.

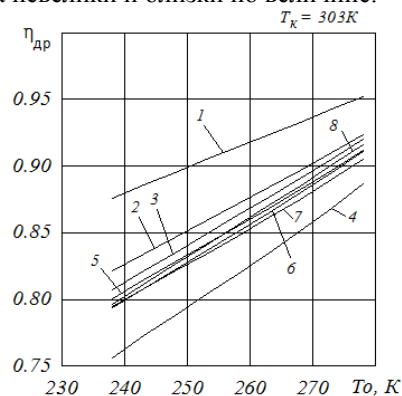


Рис. 2 - Зависимость $\eta_{\text{др}}$ от T_0 : 1 – R717, 2 – R22, 3 – R12, 4 – R404a, 5 – R407c, 6 – R134a, 7 – R410a, 8 – R600a

У хладагента R600a, в связи с отсутствием первичных потерь от перегрева, $\eta_{\text{пер}}$. В связи с этим, зависимость $\eta_{\text{пер}}$ от температуры кипения для хладагента R600a на рис. 3 не приводится. Поскольку расчёт производился для циклов без перегрева на всасывании в компрессор, первичные потери от перегрева для всех рассмотренных холодильных агентов по своей величине были меньше, чем потери от дросселирования. То есть $\eta_{\text{пер}} / \eta_{\text{др}} > 1$ для всех агентов и во всём рассмотренном диапазоне режимов. При этом из графиков (рис. 4) следует, что снижение температуры кипения T_0 ведет к росту этого отношения, следова-

тельно, рост потерь от дросселирования при этом происходит с большей скоростью, по сравнению с потерями от перегрева.

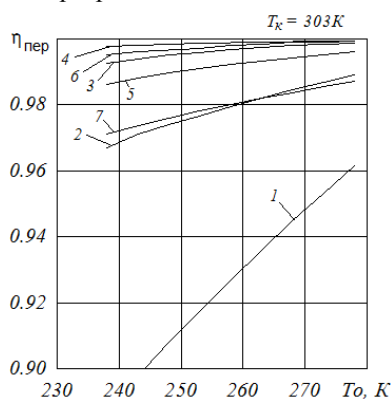


Рис. 3 - Зависимость $\eta_{пер}$ от T_0 : 1 – r717, 2 – r22, 3 – r12, 4 – r404a, 5 – r407c, 6 – r134a, 7 – r410a

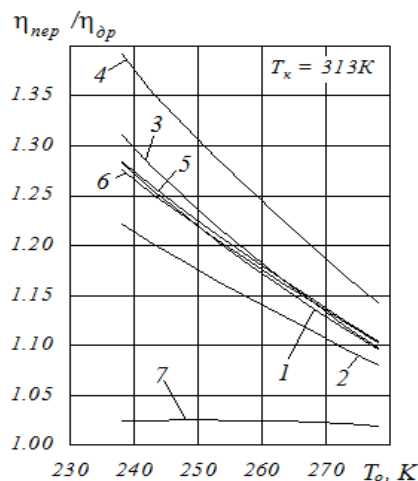
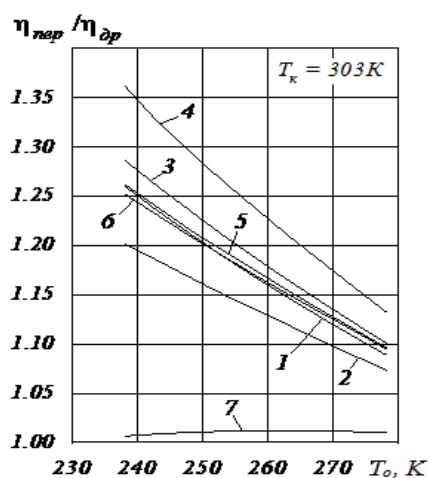


Рис. 4 - Зависимости отношений коэффициентов обратимости $\eta_{пер}/\eta_{др}$ от температуры кипения T_0 при $T_k=303K$ и $T_k=313K$: 1 – r12; 2 – r22; 3 – r134a; 4 – r404a; 5 – r407c; 6 – r410a; 7 – r717

© А. М. Ибраев - канд. техн. наук, доц. каф. холодильной техники и технологий КНИТУ, ami_kstu@rambler.ru; Т. Н. Мустафин – канд. техн. наук, доц. той же кафедры, mustimur@rambler.ru; М. Н. Хамидуллин – канд. техн. наук, доц. той же кафедры, mcx_kstu@rambler.ru.

© А. М. Ibraev – Ph.D., Associate professor Department Refrigeration equipment and technologies KNRTU, ami_kstu@rambler.ru; Т. N. Mustafin – Ph.D., Associate professor Department Refrigeration equipment and technologies KNRTU, mustimur@rambler.ru; M. N. Khamidullin – Ph.D., Associate professor Department Refrigeration equipment and technologies KNRTU, mcx_kstu@rambler.ru.

Выполненный термодинамический анализ влияния потерь от дросселирования и перегрева показал, что характеристики R12, R410a, R407a очень схожи и эти агенты можно отнести в одну группу. Входящий в эту группу R12 хорошо изучен. Практика его использования показала, что при температурах T_0 ниже минус $15^\circ C$ становится целесообразным применять регенеративный цикл ПХМ [4]. Очевидно, что эти рекомендации можно распространить на R410a и R407a. Для R134a этот переход вероятно следует производить и при более высокой температуре T_0 . Однако, окончательное решение следует принимать на основании технико-экономического расчёта, учитывая конкретные условия эксплуатации холодильной установки.

Известно, что применение регенерации для аммиака совершенно недопустимо [4], а для R22 в большинстве случаев нецелесообразно, если не обусловлено какими-то специальными целями (например, для удаления смазочного масла из испарителя).

Особняком выглядит характеристика R404a. Очень большие потери от дросселирования для этого холодильного агента, вынуждают применять специальные меры для совершенствования цикла ПХМ. Очевидно, что здесь можно рекомендовать по возможности более ранний переход на цикл с двухступенчатым дросселированием и использование регенерации.

Литература

1. Ибраев А.М. Влияние потерь от перегрева на эффективность работы парокомпрессионной холодильной машины. / Т.Н. Мустафин, М.С. Хамидуллин // Вестник Казан. технол. ун-та. – №7 – 2013. – 225-229.
2. Ибраев А.М. Влияние потерь от дросселирования на эффективность работы парокомпрессионных холодильных машин. / Т.Н. Мустафин, М.С. Хамидуллин // Вестник Казан. технол. ун-та – т.16 №20 – 2013. – 240-242.
3. Ибраев А.М. Анализ энергетических потерь парокомпрессионной холодильной машины, связанных с процессом перегрева рабочего тела в испарителе. / М.С. Хамидуллин, И.И. Шарапов, Р.Д. Шарапова // Вестник Казан. технол. ун-та – т.16 №21 – 2013. – 238-241.
4. Розенфельд Л.М. Холодильные машины и аппараты. / А.Г. Ткачев // М.: Государственное издательство торговой литературы. – 1960. 656 с.