

В результате развития холодильной техники, как в плане теоретических исследований, так и опыта эксплуатации, к середине 20-го столетия номенклатура холодильных агентов, используемых в парокомпрессионных холодильных машинах (ПХМ), работающих в области средних температур и системах кондиционирования воздуха, сократилась до исторического минимума, и выглядела вполне устоявшейся. Однако затем новые экологические взгляды и требования привели к тому, что часть из применяемых на тот момент времени холодильных агентов попали под запрет или были ограничены по срокам использования. В первую очередь следует назвать наиболее распространённые в промышленности и быту хладагенты R12 и R22. Эта ситуация стимулировала работы связанные с разработкой новых экологически безопасных веществ, молекулы которых не содержат атомы хлора и брома, к использованию их в качестве холодильных агентов 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 выполнен анализ термодинамических свойств и энергетических потерь дросселирования и перегрева [1, 2], возникающих в цикле ПХМ для наиболее распространённых в настоящее время холодильных агентов. Такими 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 распространён, однако в России, после передачи аммиачных холодильных установок в ведение Ростехнадзора, его популярность значительно снизилась. Хладагент R12 (CF_2Cl_2). Один из наиболее распространённых и безопасных в эксплуатации до 90-х годов 20-го столетия хладагентов. Хладагент 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 R32/R125/R134a). Хладагент R407 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 (C₄H₁₀ - 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. Определенный интерес представляет сравнение представленных холодильных агентов по ожидаемой холодопроизводительности при их поочередной заправке в систему некой условной ПХМ. Известно [4,5], что характеристикой, позволяющей получить подобное сравнение, является зависимость удельной объёмной холодопроизводительности холодильного цикла ПХМ от его температурных границ. Однако удельная объёмная холодопроизводительность зависит не только от термодинамических свойств вещества - холодильного агента, но и от большого количества характеристик самого цикла: температурных границ цикла, количества ступеней сжатия и дросселирования, наличия регенерации, величины перегрева на всасывании в компрессор и др. Если при оценке холодильных агентов исключить характеристики холодильного цикла и оставить только характеристики вещества, то для их сравнения между собой по ожидаемой холодопроизводительности можно предложить удельную объёмную теплоту парообразования где g - массовая теплота парообразования вещества (кДж/кг); v'' - удельный объём насыщенного пара (м³/кг). Результаты расчёта зависимости величины gv от температуры для вышеприведенных холодильных агентов представлены на рис.1. Рис. 1 - Зависимость gv от T_0 : 1 - R410a, 2 - R404a, 3 - R22, 4 - R407a, 5-R717, 6 - R12, 7 - R134a, 8 - R600a Полученные результаты в целом качественно согласуются с результатами расчётов удельной объёмной холодопроизводительности для одноступенчатых циклов ПХМ, работающих на различных холодильных агентах [4]. В частности, достоверно отражается снижение ожидаемой холодопроизводительности со снижением температуры кипения в холодильном цикле ПХМ, которую в данном случае представляет температура, при которой определяется теплота парообразования. Тем не менее, оценку по величине gv вряд ли можно рекомендовать к практическому использованию. Дело в том, что на величину холодо-производительности цикла

ПХМ существенное влияние оказывает угол наклона пограничной кривой (линии насыщенной жидкости), но это никак не учитывается при оценке при помощи g_v . Это приводит к заниженным прогнозам для холодильных агентов с малым углом наклона кривой и завышенным для агентов с большим наклоном. Тем не менее, величина g_v для данных агентов представляет самостоятельный интерес, поскольку показывает максимальную величину возможной холодопроизводительности цикла ПХМ, к которой можно стремиться путём совершенствования холодильного цикла. Методами такого совершенствования являются использование регенерации, переход к многоступенчатому дросселированию и многоступенчатому сжатию. Из графика (рис.1) следует, что R717, R22 и R407a образуют группу агентов с близкими характеристиками. Несколько выше величина g_v у хладагента R404a. Еще одну группу образуют R12 и R134a, которые уступают первой группе по величине g_v около 20%. Наилучшая характеристика из рассмотренных агентов у R410a и заметно всем проигрывает R600a. Более точным критерием для оценки холодильных агентов по ожидаемой холодопроизводительности будет величина $q = q_0 / v''$. Здесь q_0 - величина теплоты процесса $4i-1$ - фазового перехода парожидкостной смеси холодильного агента в состояние насыщенного пара. Геометрическим образом этой величины (рис.2) будет площадка $b-4i-1-v$. От теплоты парообразования (геометрический образ-пл. $d-0-1-v$) q_0 отличается на величину площадки $d-0-4i-b$, что связано с парообразованием части жидкого холодильного агента в процессе дросселирования $3-4i$. Площадка $d-0-4i-b$, в свою очередь, состоит из площадки $d-0-4s-a = \Delta S' \cdot T_0$ и площадки, характеризующей потери от дросселирования [2] - пл. $a-4s-4i-b = \Delta q_0 = \delta S_g \cdot T_0$. Величины этих площадок можно определить по следующим уравнениям [2], где cx' - теплоёмкость холодильного агента в процессе, идущем по линии насыщенной жидкости; T_k , T_0 - соответственно температуры конденсации и кипения холодильного агента. Тогда критерий q можно записать в виде следующего выражения Величина q достаточно близка к величине удельной объёмной холодопроизводительности. При этом не учитываются лишь такие процессы холодильного цикла ПХМ, как перегрев в испарителе перед всасыванием в компрессор и переохлаждение жидкости перед дросселированием. В данном критерии из массовой теплоты парообразования вычтена величина снижения холодопроизводительности холодильного цикла связанная с образованием балластного (не производящего холодильный эффект в испарителе) пара в процессе дросселирования [2]. Это позволяет учесть влияние формы линии насыщенной жидкости, но при этом вносит в определение величины критерия температурные границы холодильного цикла T_k и T_0 , которые не являются характеристикой вещества. Однако, при этом следует учесть, что величина T_0 , как и в предыдущем случае, выступает в качестве параметра характеристик сравнения холодильных агентов, а величина T_k в летних режимах эксплуатации ПХМ меняется в незначительных пределах и

может быть принята фиксированной при расчётах. В данном случае расчёты выполнены (рис.3) при $T_k = 30^\circ\text{C}$, что характерно при применении водяных конденсаторов и $T_k = 40^\circ\text{C}$ (рис. 4), что характерно для воздушных конденсаторов. Величина теплоёмкости sx' при выполнении расчётов определялась, в соответствии с допущениями принятыми при выводе формул [2] и построением (рис.2), как . Рис. 3 - Зависимость Q от T_O : 1 - R717; 2 - R12; 3 - R22; 4 - R404a; 5 - R134a; 6 - R407c; 7 - R410a; 8 - R600a Рис. 4 - Зависимость Q от T_O : 1 - R717; 2 - R12; 3 - R22; 4 - R404a; 5 - R134a; 6 - R407c; 7 - R410a; 8 - R600a Для одноступенчатых циклов ПХМ критерий q вполне может применяться для сравнения холодильных агентов, обеспечивая при этом достоверные результаты. Учёт потерь холодопроизводительности из-за образования балластного пара привёл к некоторым качественным изменениям соотношений между рассмотренными холодильными агентами. Так характеристики аммиака R717 выросли по отношению к остальным, и он по ожидаемой холодопроизводительности вышел на второе место после R410a. Характеристики R404a и R22 практически сравнялись. Объяснение этим изменениям можно дать, если проанализировать изменение степени сухости x парожидкостной смеси холодильных агентов после дросселирования, в точке $4i$ (рис.2) холодильного цикла. График таких зависимостей дан на рис. 5. Рис. 5 - Зависимость степени сухости x от T_O : 1 - R410a, 2 - R404a, 3- R22, 4 - R407c, 5 - R717, 6 - R12, 7- R134a, 8 - R600a Величину x (относительное содержание пара в жидкости) также можно представить, как относительную величину потери холодопроизводительности цикла по отношению к максимально возможной величине. Из графика следует, что меньшими потерями холодопроизводительности в порядке малости их величины обладают R717, R22 и R12, то есть холодильные агенты наиболее широко распространенные в середине 20-го века. При этом R717 значительно выигрывает у всех остальных органических холодильных агентов. Холодильные агенты, разработанные на замену вышеперечисленных, имеют большую, но близкую к R12 величину потерь. Кроме R404a, у которого x (величина потерь) значительно выше, чем у остальных агентов. Из этого следует, что при росте разности температур, как за счёт роста температуры конденсации, так и за счёт снижения температуры кипения, снижение холодопроизводительности у этих агентов будет проходить с большей скоростью, чем у R717, R22 и R12. Это можно наблюдать, например, сравнивая между собой (рис.3) характеристики R12 и R134a. Но особенно эта тенденция касается R404a. Так при $T_k = 40^\circ\text{C}$ (рис. 4) R404a уже проигрывает по холодопроизводительности R22. Из этого можно сделать предварительный вывод, что для таких агентов, как R404a, R410a и R134a переход от одноступенчатого к двухступенчатому холодильному циклу должен осуществляться на более ранних стадиях, чем у R717, R22 и R12. Однако, окончательное решение о таком переходе, как правило, должно приниматься на основании технико-экономических показателей. Некоторым

исключением при сравнении холодильных агентов по величине q является R600a. Это связано со спецификой холодильного цикла ПХМ домашнего холодильника, в котором для увеличения холодопроизводительности и охлаждения плюсового отделения принимается большая величина перегрева на всасывании в компрессор. У R600a отсутствуют первичные потери от перегрева [3], что позволяет заметно увеличить его холодопроизводительность, за счет перегрева на всасывании, без существенного увеличения энергетических потерь.