

№8, 1982, Т.55, с. 1780.

2. Костенко Г.С., Кутепов А.М., Жихарев А.С., Касьяненко М.К. Исследование сепарации вторичных паров методом частичной конденсации при продольном обтекании одиночного элемента//Журнал прикладной химии,1982. №8, с. 1801.
3. Жихарев А.С. Сепарация пара методом частичной конденсации на трубном пучке//Известия МГТУ «МАМИ» №3(17), 2013, т.2, с. 69 – 73.
4. Жихарев А.С., Черепанова О.А. Расчёт эффективности улавливания капель в осевых центробежных сепараторах с лопастными завихрителями//Известия МГТУ «МАМИ» №1(15), 2013, т. 4, с. 86-89.
5. Жихарев А.С. Расчет уноса капель при сепарации пара методом частичной конденсации на трубном пучке при минимальной степени конденсации// Известия МГТУ «МАМИ» №1(19), 2014, т.3, с. 18 – 23.

***Рабочие тела высокотемпературных тепловых насосов.  
Современное состояние вопроса и направления развития***

Малафеев И.И., Ильин Г.А., к.т.н. доц. Крысанов К.С.

*Университет машиностроения*

*8 (495) 223-05-23, malafeev\_ilya@mail.ru*

*Аннотация.* Рассмотрены рабочие вещества, отвечающие требованиям для использования в пароконденсационных высокотемпературных тепловых насосах, работающих по обратному термодинамическому циклу. Выполнено сопоставление термодинамической эффективности рабочих веществ в диапазоне температур работы одноступенчатого теплонасосного дистиллятора.

*Ключевые слова:* рабочее вещество низкого давления, высокотемпературный тепловой насос, теплонасосный дистиллятор

Энергосбережение – одна из основных проблем, решаемых мировым сообществом в настоящее время. Усилия в этом направлении сосредоточены на двух целях: сохранение невозобновляемых энергоресурсов и сокращение вредных выбросов в атмосферу продуктов сгорания, являющихся основным фактором глобального потепления. Развитие альтернативной энергетики, в частности использование источников низкопотенциального тепла в сочетании с тепловыми насосами (ТН), направлено на рациональное использование энергетических ресурсов и снижение деструктивного антропогенного воздействия на природную среду.

Теплонасосные установки (ТНУ), осуществляя обратный термодинамический цикл на низкокипящем рабочем веществе, утилизируют низкопотенциальную теплоту естественных, промышленных и бытовых источников, генерируют теплоту высокого потенциала, затрачивая при этом в пределе до 2,5 раз меньше первичной энергии, чем при прямом сжигании топлива. ТН находят все большее применение в системах теплоснабжения жилых и производственных зданий, в качестве установок обеспечения тепловой энергией нужного потенциала ряда технологических процессов (сушка, дистилляция, тепловая обработка), в системах утилизации тепла промышленных предприятий и энергетических комплексов, включая АЭС, а также в системах коге- и тригенерационных установках для выработки электроэнергии, тепла и холода.

Применение рабочих веществ с наиболее благоприятными термодинамическими свойствами имеет первостепенное значение для создания высокоэффективных ТН. Термодинамические циклы холодильных машин и ТН основаны главным образом на фазовых превращениях рабочих веществ. В компрессионных машинах образующийся в испарителе пар при низком давлении нагнетается компрессором в конденсатор (газоохладитель) для передачи теплоты цикла потребителю.

Выбор рабочего вещества – основополагающий этап создания ТНУ, оказывающий влияние на все ее характеристики. На сегодняшний день известно более 100 рабочих веществ, используемых в холодильных и теплонасосных установках. Вместе с тем большое количество специфических требования, предъявляемых к рабочим веществам ТНУ, и ограничения, накладываемые Монреальским и Киотским протоколами, существенно сужают возможности выбора. Особенно немногочисленным становится перечень рабочих веществ, пригодных для использования в высокотемпературных тепловых насосах (ВТН) с температурой источника высокопотенциального тепла более 80 °С.

В данной статье рассматривается проблема выбора рабочего вещества для ВТН на примере установки для дистилляции воды, основанной на рекуперации тепла фазовых превращений воды с использованием обратного термодинамического цикла.

*Требования к рабочим веществам.* Идеальное рабочее вещество должно характеризоваться химической стабильностью (отсутствие разложения и полимеризации при рабочих температурах), химической инертностью по отношению к конструкционным материалам и смазочным маслам, невоспламеняемостью, нетоксичностью, доступностью и низкой стоимостью, невысоким давлением конденсации (не более 2 МПа), высокой (относительно температуры конденсации) критической температурой, а также высокой эффективностью термодинамического цикла. Последнее требование является комплексным: более эффективными являются холодильные агенты, характеризующиеся меньшим отношением давлений при заданных температурах конденсации и кипения; более близким к единице показателем изоэнтропии; более высоким отношением теплоты парообразования к теплоемкости жидкости; меньшим коэффициентом динамической вязкости (особенно в газовом состоянии); и таким сочетанием теплофизических свойств, которое обуславливает более высокие коэффициенты теплоотдачи в аппаратах.

Поскольку не существует холодильного агента, который бы отвечал всем перечисленным требованиям во всем диапазоне температур кипения и конденсации, то применяют рабочие вещества, удовлетворяющие лишь наиболее важным требованиям: термодинамическая эффективность, технико-экономические и экологические требования, безопасность при эксплуатации.

Рабочие вещества пригодные для использования в высокотемпературных тепловых насосах должны относиться к группе низкого давления и иметь нормальную температуру кипения выше минус 10 °С и достаточно высокую критическую температуру для осуществления субкритического пароконденсационного цикла, минимальная величина которой определяется требуемыми температурами горячего теплоносителя.

В одноступенчатом теплонасосном дистилляторе, работающем при атмосферном давлении, температуры кипения и конденсации находятся на уровне 90 °С и 110 °С, соответственно. Такие высокие значения температур обусловлены температурой кипения воды и минимальными температурными напорами на теплообменных аппаратах, при которых достигаются удовлетворительные массогабаритные показатели.

*Сопоставление рабочих веществ низкого давления.* В таблице 1 приведены рабочие вещества с нормальной температурой кипения в районе минус 12 °С и выше, имеющие наибольшую распространенность и рассматриваемые в международных правовых актах об использовании хладагентов.

Для сравнения термодинамической эффективности рабочих веществ были рассчитаны удельные параметры базового цикла теплонасосного дистиллятора (см. рисунок 1) с одноступенчатым сжатием (изоэнтропный КПД компрессора 0,7) из состояния перегретого пара ( $\Delta t_{\text{п}}=5$  К) при температуре кипения рабочего тела  $P_0$  ( $t_0=90$  °С) и расширения конденсата рабочего тела по изоэнтальпе из состояния насыщенной жидкости при давлении конденсации  $P_{\text{к}}$  ( $t_{\text{к}}=110$  °С). Результаты расчетов, полученные с использованием прикладной программы CoolPack 1.46, представлены в таблице 2.

## Основные характеристики рабочих веществ низкого давления

Хладагент	Нормальная температура кипения (P=1атм), T <sub>нк</sub> , К	Критическая температура, T <sub>кр</sub> , К	Критическое давление, РКР, бар	Плотность паров при атмосферном давлении, кг/м <sup>3</sup>	Молекулярная масса, М, кг/моль	Классификация по безопасности	ПДК/ПНК мг/м <sup>3</sup>	Горючесть	НКПВ кг/м <sup>3</sup>	Потенциал разрушения озона ODP	Потенциал глобального потепления GWP
<b>Озоноактивные рабочие вещества</b>											
R11	296,95	471	44,07	5,824	137,4	A1	0,006	нет	—	1	4600
R113	319,82	487	33,92	3,467	187,38	A1	0,02	нет	—	0,8	5000
R114	276,95	418,7	32,57	7,207	170,92	A1	0,14	нет	—	1	9800
R123	300,9	455	36,68	5,872	152,9	B1	0,057	нет	—	0,02	90
R124	262	395,4	35,7	5,728	136,476	A1	0,056	нет	—	0,03	480
R141b	305,05	477,4	42,12	3,826	116,95	A2	0,012	да	0,287	0,11	630
R142b	283,15	410,26	40,55	4,223	100,5	A2	0,103	да	—	0,065	2400
R21	281,85	451,48	51,81	4,5578	102,923	A1	—	нет	—	0,01	0,05
<b>Вещества с большим потенциалом глобального потепления</b>											
R236fa	271,75	398,07	32	6,418	152	A1	0,34	—	Н.п.	0	9400
R245fa	288	427,16	36,51	5,689	134	B1	0,19	—	Н.п.	0	950
R365mfc	313,3	460	32,66	5,961	148,07	—	—	да	—	0	<1500
RC318	267	388,38	27,78	8,429	200	A1	0,81	—	Н.п.	0	10000
<b>Экологически безопасные рабочие вещества</b>											
R600	272,5	425	37,96	2,45	58,1	A3	0,002	да	0,048	0	3
R600a	261,42	407,85	36,846	2,44	58,12	A3	0,06	да	0,038	0	3
R601	309,1	469,6	33,7	2,058	72,1	A3	0,003	да	0,035	0	3
R601a	300,95	460,35	33,78	2,786	72,1	A3	0,003	да	0,003	0	3

*Синтетические рабочие вещества.* Наиболее выигрышно с точки зрения энергоэффективности и эксплуатационных качеств выглядят синтетические рабочие вещества. Наибольший коэффициент преобразования в расчетном цикле достигается при использовании озоноактивных R11, R13, R123a и R141b. Другими преимуществами данных рабочих веществ являются небольшие значения давлений и взрывопожаробезопасность. Тем не менее, график, предусмотренный Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, предписывает к 1 января 2015 года сократить уровень потребления ГХФУ в Российской Федерации до 10% от базового значения, то есть до 399,6 тонн ОРП ежегодно. Кроме того, согласно постановлению Правительства РФ № 228 от 24 марта 2014 года, с 1 января 2015 г. существенно ужесточаются нормы, регламентирующие оборот ГХФУ в стране. Таким образом окончательно выводятся из оборота рабочие вещества, содержащие атомы хлора.

Также стоит отметить, что Европейский парламент ввел ограничения, запрещающие с 2011 года применение в системах кондиционирования воздуха новых моделей автомобилей фторсодержащих хладагентов с потенциалом глобального потепления (GWP) выше 150, а к 2010 году – в холодильных системах и стационарных системах кондиционирования воздуха. Можно предполагать, что требования по этому параметру будут только ужесточаться.

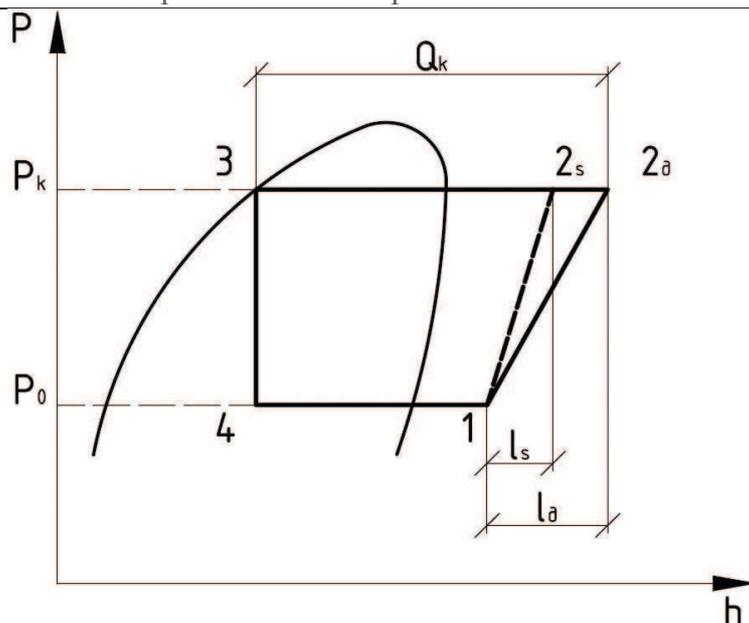


Рисунок 1. Одноступенчатый цикл теплового насоса в P-h координатах

Таблица 2

Результаты расчетов основных параметров термодинамического цикла теплового насоса для рабочих веществ низкого давления

Хладагент	Давление кипения при 90 °С, P <sub>0</sub> , бар	Давление конденсации при 110°С, P <sub>к</sub> , бар	Удельная массовая теплопроизводительность, q <sub>кв</sub> , кДж/кг	Действительная работа сжатия, l <sub>дв</sub> , кДж/кг	Коэффициент преобразования, μ	Удельная объемная теплопроизводительность, q <sub>об</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
Озоноактивные рабочие вещества						
R11	6,58	10,12	147,80	11,92	12,40	5011,87
R113	3,48	5,56	109,82	8,79	12,50	2829,79
R114	11,48	17,10	82,95	7,57	10,96	6874,61
R123	6,25	9,75	130,58	10,71	12,19	4788,41
R124	19,46	28,83	76,44	8,13	9,40	9800,12
R141b	5,38	8,41	183,83	14,73	12,48	4278,70
R142b	17,01	25,06	128,37	11,94	10,75	9839,80
R21	10,78	16,33	179,69	14,79	12,15	7805,95
Вещества с большим потенциалом глобального потепления						
R236fa	15,65	23,83	74,05	7,79	9,51	8343,66
R245fa	10,03	15,70	128,60	11,31	11,37	7079,38
R365mfc	4,58	7,42	147,52	12,30	11,99	3711,19
RC318	16,68	25,04	41,30	5,31	7,78	6776,05
Экологически безопасные рабочие вещества						
R600	12,36	18,32	245,89	22,43	11,36	7442,33
R600a	16,66	24,15	195,88	19,36	10,12	8532,47
R601	4,70	7,37	284,53	23,44	12,14	3608,68
R601a	5,78	8,91	261,83	21,89	11,96	4171,86

Озонобезопасные хладагенты R236fa, R245fa и RC318 были разработаны в качестве замены хлорфторуглеродов. Однако, невысокие показатели коэффициента преобразования и большие значения GWP не позволяют расценивать эти рабочие вещества в качестве адекватной замены хлорфторуглеродов для применения в ВТН.

Недавно разработанный хладагент R-1234yf не обеспечивает всех потребностей систем, основанных на принципе трансформации тепла. Для сравнения, его критическая температура 96 °C на 5 градусов ниже, чем у R-134a, следовательно, этот хладагент не может быть рекомендован для использования в условиях работы ВТН.

*Смесевые рабочие вещества.* Смесевые хладагенты широко применяются в холодильной технике, однако возможность их использования в качестве рабочих веществ ТН исследована не полностью. Особого внимания заслуживают зеотропные (неазеотропные) требует дальнейшего исследования. Эффективность их использования в ТН отмечена еще в [1]: «Используя это обстоятельство (температурный глайд зеотропной смеси в процессах конденсации/испарения), можно в ряде случаев подобрать хладагент так, чтобы изменение его температуры в конденсаторе проходило эквидистантно изменению температуры идущей противотоком воды (или воздуха), а в испарителе – хладоносителя (если его температура переменна). В результате можно уменьшить потери от необратимости...». В отдельной проработке нуждаются вопросы о взаимном влиянии составных компонентов смеси на общий процесс теплообмена и эффективности расширения зоны «глайда» циклов тепловых насосов на основе промышленно выпускаемых хладагентов, с учётом их различной токсичности, воспламеняемости и воздействия на озоновый слой.

Необходимо отметить, что используемые сегодня в холодильной технике распространенные смесевые рабочие вещества, обладая относительно низкой температурой кипения (ниже минус 30 °C) и критической точкой (не более 100 °C), не удовлетворяют вышеописанным критериям для применения в ВТН.

*Природные рабочие вещества.* В настоящее время в связи с отсутствием пригодных к использованию синтетических рабочих веществ главным направлением развития высокотемпературной теплонасосной техники является использование природных рабочих веществ, с учётом их термодинамических, теплофизических и эксплуатационных особенностей.

Изобутан, пропан и другие углеводороды (R-600a, R-290 и другие соединения  $C_nH_m$ ) имеют относительно хорошие термодинамические свойства, дешевы и доступны, но горючи и взрывоопасны. Не воздействуют на озоновый слой и не создают парниковый эффект. Н-бутан (R600) является наиболее предпочтительным с точки зрения энергоэффективности, но обладает относительно высоким уровнем давления в рабочем диапазоне температур. Перспективным практическим преимуществом изобутана (R-600a) является возможность его использования как в стандартных пароконденсационных тепловых насосах для нагрева теплоносителя системы отопления до 100 °C, так и в энергетических установках на низкокипящих рабочих телах, утилизирующих возобновляемое тепло геотермальных месторождений и сбросное тепло промышленных предприятий. При соблюдении мер пожарной безопасности это рабочее тело вполне применимо для использования в зонах рекреации с применением стандартного теплонасосного оборудования.

В последние годы использование углеводородов в системах холодоснабжения, кондиционирования воздуха и тепловых насосах, используемых в целях комфортного жизнеобеспечения людей становится все более распространенным. Этой тенденции способствует рациональная законодательная политика в области применения углеводородов и постоянное совершенствование конструкций холодильной и теплонасосной техники; так в первой половине XX века заправка домашнего холодильника составляла 250 г пропана, для современных же моделей достаточно 20 г. Допустимые же нормы по европейским стандартам по заправке составляют порядка 230 г пропана при установке на уровне 1 м от пола. С увеличением высоты размещения устройства относительно пола величина допустимой заправки возрастает,

что позволяет использовать достаточно мощные кондиционеры и тепловые насосы на углеводородах в домашних условиях.

Актуальной задачей является разработка смеси пропан/бутан для снижения величины избыточного давления в контуре. При оценке использования такой смеси в качестве рабочего тела теплонасосного дистиллятора важным фактором является температурный глайд, величина которого может существенно влиять на величину минимальных температурных напоров в теплообменных аппаратах.

Для температур конденсации в пределах 90 °С используются также и такие природные рабочие вещества, как аммиак и уголекислота. Однако известные трудности с высокими рабочими давлениями, большим перегревом в процессе сжатия паров и коррозионной активностью к медьсодержащим материалам (аммиак) и низкой критической точкой (уголекислота) существенно сдерживают применение данных рабочих веществ при высоких температурах.

#### **Выводы**

Проведенный обзор показывает ограниченность вариантов выбора законодательно разрешенных рабочих веществ низкого давления для применения в высокотемпературных тепловых насосах. По мнению авторов, целесообразность однозначного запрета на использование синтетических рабочих веществ в условиях отсутствия равноценной замены должна быть четко обоснована с учетом комплексной оценки воздействия на окружающую среду и таких показателей, как TEWI (Total Equivalent Warming Impact – полный эквивалент глобального потепления).

#### **Литература**

1. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат. 1981. – 320 с.
2. Цветков О.Б. Холодильные агенты: Монография. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУ-НиПТ. 2004. – 216 с.
3. Теплофизические основы получения искусственного холода / под редакцией А.В. Быкова. – М.: Пищевая промышленность. 1980. – 233 с.
4. Елистратов С.Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: дисс. ... д-ра техн. наук; – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 378 с.
6. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Оценка эффективности термодинамических циклов пароконпрессионных холодильных машин и тепловых насосов // Холодильная техника. 2006, №3. – с. 16 – 25.
7. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой, к Венской конвенции об охране озонового слоя, Оттава, 1987.
8. BS EN 378-1:2008+A1:2010 Refrigerating systems and heat pumps. Safety and environmental requirements. Basic requirements, definitions, classification and selection criteria. – Введ. 29.08.2008

#### **Новые области применения регенеративных холодильно-газовых машин**

Порутчиков А.Ф., к.т.н. Крысанов К.С., Королев И.А.  
*Университет машиностроения*  
*student-msuie@mail.ru*

*Аннотация.* Описаны области применения низкотемпературного охлаждения. Приведены наиболее актуальные схемы получения низкотемпературного теплоносителя для нужд криохимических технологий, с помощью холодильно-газовой машины Стирлинга.

*Ключевые слова:* холодильно-газовые машины Стирлинга, низкотемпературное охлаждение, охлаждение в криохимии