



4853691

КОШЕЛЕВ ВАЛЕРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ДРОССЕЛИРУЮЩИХ
УСТРОЙСТВ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН
МАЛОЙ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

03 ФЕВ 2011

Санкт Петербург
2010

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота», г. Калининград

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Альгирдас Иозапович Ейдеюс

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Владимир Александрович Пронин

кандидат технических наук
Андрей Олегович Цимбалист

Ведущая организация Калининградский государственный
технический университет

Защита диссертации состоится 16 февраля 2011 г в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.234.01 при Санкт-Петербургском государственном университете низкотемпературных и пищевых технологий по адресу: 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9, тел/факс (812) 315-30-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУНИПТ.

Автореферат разослан 12 января 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.234.01,
доктор технических наук, профессор



В.А. Рыков

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Необходимость повышения энергоэффективности холодильных машин малой холодопроизводительности (ХМ), перевод их на новые озонобезопасные хладагенты определяют актуальность настоящего исследования. Повышением эффективности работы компрессоров, теплообменных аппаратов отечественные и зарубежные ученые занимаются давно и успешно. Дросселирующие устройства являются малоисследованными элементами ХМ. Расширяющееся производство реверсивных ХМ, чаще применяющихся в системах кондиционирования воздуха (СКВ), обострило проблему подбора и анализа работы дросселирующих устройств. Выполняя пассивную роль заполнения испарителя жидким хладагентом, дросселирующие устройства, тем не менее, существенно влияют на энергоэффективность и безопасность работы ХМ. В качестве дросселирующих устройств ХМ в настоящее время применяют механические терморегулирующие вентили (ТРВ), электронные регулирующие вентили (ЭРВ), капиллярные трубки (КТ). При заметной тенденции использования для дросселирования хладагента ТРВ, в реверсивных ХМ они оказались малопригодны, т.к. имеют сравнительно узкий диапазон и усложняют схему циркуляции хладагента. ЭРВ с шаговыми двигателями могут поддерживать заданный перегрев отсасываемого из испарителя пара в широком диапазоне режимов и нагрузок и считаются более универсальными, но они пока не выпускаются в нашей стране и являются дорогостоящими. КТ обеспечивают оптимальную степень заполнения испарителя хладагентом лишь в расчетном режиме. В нерасчетных условиях возникают необратимые потери из-за недостаточной подачи и опасность влажного хода компрессора при чрезмерной подаче хладагента. Оптимальные размеры КТ при работе СКВ в расчетных режимах охлаждения и обогрева не совпадают. Поэтому дросселирующие устройства реверсивных ХМ нередко komponуют из нескольких КТ и обратных клапанов (ОК). Не смотря на это, применение КТ в настоящее время и в перспективе остается целесообразным как в качестве самостоятельного элемента ХМ, так и в комбинации с другими дросселирующими устройствами. К примеру, в современных СКВ производительностью до 50 кВт даже при применении ЭРВ используется до десяти КТ выполняющих различные функции.

На основе анализа доступных источников информации можно констатировать, что в настоящее время:

- недостаток информации по ЭРВ и микроконтроллерам в общедоступной литературе и технической документации поставщиков не способствует их внедрению в отечественную холодильную технику, затрудняет монтаж и техническую эксплуатацию автоматизированных ХМ;

- экспериментальное исследование процессов дросселирования хладагентов в КТ отечественными специалистами либо не проводилось, либо результаты опытов не опубликованы;

- известные методы подбора КТ не распространяются на новые хладагенты и не пригодны для анализа работы ХМ на нерасчетных режимах;

- отсутствуют методики точного расчета труб при движении насыщенного, слегка перегретого пара или реального газа с высокими скоростями.

Для рационального проектирования отечественных и анализа работы ХМ зарубежного производства необходима методика расчета КТ.

Целью настоящей работы является повышение энергоэффективности ХМ за счет научно обоснованного подбора дросселирующих устройств, оптимальной их настройки и внедрения новых технических решений. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- рассмотрение принципа действия ЭРВ с шаговыми двигателями; анализ формирования пропорционально-интегрального регулирования перегрева пара на основе широтно-импульсной модуляции клапана с электромагнитным приводом; разработка устройства контроля влажного хода компрессора; испытания автоматизированной VRF-системы в переходных процессах;

- анализ факторов, влияющих на энергоэффективность современных ХМ в расчетных и нерасчетных режимах работы;

- анализ способов и средств эффективного управления циркуляцией хладагента и потоками тепло-хладоносителей в СКВ; разработка новых схем регулятора температуры жидкого тепло-хладоносителя;

- создание методики расчета КТ при дросселировании хладагентов с известными свойствами, основанной на закономерностях гидродинамики двухфазных потоков, позволяющей прогнозировать эффективность использования дросселирующих устройств с КТ при эксплуатации ХМ;

- проверка применимости известных моделей определения истинного объемного паросодержания двухфазных потоков к расчету КТ; подтверждение адекватности методики сравнением результатов расчета с опытными и эмпирическими данными разных исследователей; оценка влияния КТ на эффективность работы ХМ в нерасчетных режимах;

- разработка методики расчета КТ при адиабатическом дросселировании паробразных хладагентов; сопоставление результатов расчета при разных значениях перегрева пара с данными, полученными по безразмерным соотношениям газовой динамики.

Научная новизна. Разработана и апробирована обобщенная методика гидродинамического расчета КТ, учитывающая не только состояние хладагента перед трубкой, но и изменение основных параметров двухфазного адиабатного потока в процессе дросселирования; методика распространена на расчет параметров высокоскоростного потока пара или реального газа в длинном трубопроводе. По новому сформулированы условия наступления критического режима течения, не требующие данных о скорости распространения звука в двухфазных средах с переменным по ходу движения паросодержанием.

Практическая значимость работы. Разработанная методика численного расчета КТ реализована в виде программы для ЭВМ с насыщением базы исходных данных показателями свойств 12 хладагентов. Получены эмпирические уравнения для расчета расхода хладагента и длины КТ при дроссе-

лировании ряда хладагентов. Выявленные особенности работы КТ и ЭРВ предназначены для использования при проектировании реверсивных ХМ разного назначения и производительности. Предложены новые технические решения для регулятора подачи жидкого тепло-хладоносителя и устройства контроля влажного хода компрессора.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на Всесоюзной конференции Центрального правления НТО пищевой промышленности, 1984 г.; на шестой международной конференции, Калининград: БГАРФ, 2007 г.; на научных конференциях аспирантов, докторантов и соискателей БГАРФ, Калининград 2008+2010 г.; на межвузовских конференциях 1983+2010 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано: 16 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ; 2 патента на изобретения; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- эффективность реверсивных ХМ в расчетных и нерасчетных режимах работы зависит от правильного подбора дросселирующих устройств, оптимальной их настройки и внедрения новых технических решений;

- для подбора размеров и построения расходных характеристик КТ целесообразно применять гомогенную модель двухфазного потока с учетом шероховатости трубки и определять коэффициент трения с использованием приведенных скоростей жидкой и паровой фаз, которые зависят от паросодержания смеси в соответствующем сечении трубки;

- КТ для ХМ следует подбирать по параметрам окружающей среды, характерным для конкретного региона, или компоновать дросселирующие устройство из нескольких КТ с возможностью управления изменением общего гидравлического сопротивления дросселирующего устройства при изменении давления конденсации хладагента;

- при расчете высокоскоростных потоков пара необходимо учитывать изменение действительных значений его плотности и вязкости, отличающихся от аналогичных показателей для идеального газа.

Объём и структура диссертация. Диссертация изложена на 136 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и пяти приложений. Содержит 21 таблицу, 47 рисунков, 140 литературных источников, 15 из которых зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Из работ Е.С.Курьлева и других ученых следует, что регулирующий вентиль парокompрессорной ХМ в любых режимах ее работы должен обеспечивать заданную степень заполнения испарителя жидким хладагентом. Поэтому согласование характеристик дросселирующего устройства и остальных узлов ХМ актуально при проектировании любой холодильной системы. Широкое использование реверсивных ХМ в СКВ еще больше осложняет задачу. Если подбору и настройке ТРВ уделено достаточно внимания, то устройство и принцип действия ЭРВ в популярной технической литературе, кроме нескольких озабочивающих статей в специализированных журналах, практически не освещены. Вопросы подбора и усовершенствования КТ рассматриваются в работах Бабакина Б.С., Вейнберга Б.С., Захарова Ю.В., Елагина М.Ю., Иванова О.П., Чернявского С.А., Шляховецкого С.А., Якобсона В.Б., Голдшмидта, Х.Вахайя, Д.Вольфа, Ц.Вейя, С.Мотта, С.Кима, Л.Янга, В.Ванга, С.Мело и др.

Обстоятельные исследования гидродинамики двухфазных потоков в нашей стране проводили известные ученые: Кутателадзе С.С., Стырикович М.А., Миропольский З.Л., Лабунцов Д.А., Стерман Л.С., Дейч М.Е. и другие. Основное внимание уделялось движению пароводяных и водовоздушных потоков. Экспериментальные исследования и обобщение результатов опытов с использованием теории подобия позволили получить безразмерные уравнения движения двухфазных сред в каналах при наличии и отсутствии теплообмена. Применение этих уравнений к расчету КТ сдерживается отсутствием данных об изменении истинного объемного паросодержания хладагентов в процессе дросселирования.

Разработкой методов расчета КТ более 60 лет занимаются специалисты американского общества ASHRAE. Широкое распространение получила методика с использованием номограммы Хопкинса, построенной на основе испытаний базовой трубки диаметром $d_t=1,625$ мм, длиной $l=2030$ мм при дросселировании хладагентов R12 и R22. В отечественную практику эту номограмму ввел Б.С. Вейнберг, сделавший заключение о нецелесообразности аналитического расчета КТ из-за сложности протекающих в ней процессов и большого числа влияющих факторов. По мере перехода на новые хладагенты исследования процессов дросселирования в КТ активизировались в разных странах (США, Германия, Китай, Южная Корея, Таиланд, Новая Зеландия и др.). В 2002 году общество ASHRAE представляет обобщенное уравнение расчета пропускной способности КТ при дросселировании трех видов хладагентов. В 2006 году появилась интернет программа DanCap по расчету длины КТ для 8 видов хладагентов. В 2008 году специалисты Шанхайского университета представили обобщенное уравнение с безразмерными переменными для расчета 8 хладагентов. В проведенных исследованиях в основном уделяется внимание вопросам определению пропускной способности КТ принятого размера и обработке результатов экспериментов. Результаты исследований не предусматривают возможность распространения их на новые хладагенты, проведение анализа работы ХМ в нерасчетных режимах,

учета влияния конструктивных и технологических особенностей КТ на процесс дросселирования, без отслеживания изменения параметров рабочей среды по длине КТ. Поэтому назрела необходимость разработки методики расчета КТ и анализа влияния дросселирующих устройств на работу ХМ.

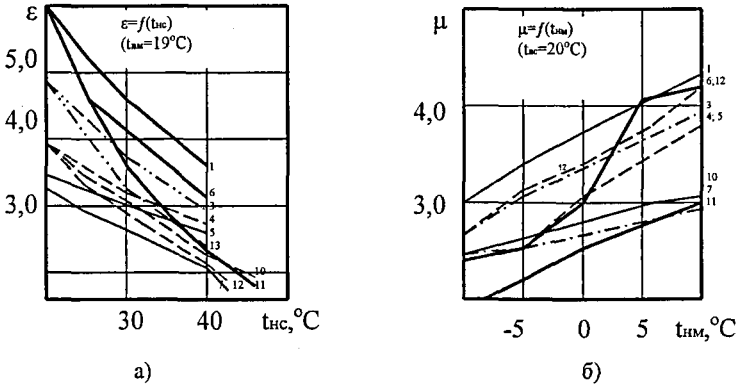


Рис.1. Влияние температуры наружного воздуха на эффективность СКВ
а) в режиме охлаждения; б) в режиме теплового насоса

(Модели: 1-RXS20D; 3-RXG25C; 4-RXD50B; 5-RXD60B; 6-RZQ71BV; 7-Y22DB7V1;
10-RY60FAV1; 11-RQ71BV; 12-ARY20D; 13-RXE25B)

При анализе энергоэффективности СКВ ведущих производителей, использующих реверсивные ХМ, по данным технической документации определялись значения холодильного коэффициента ϵ и коэффициента преобразования μ . В качестве примера на рис.1 для 12 моделей одноблочных СКВ производительностью до 10 кВт показана зависимость их энергоэффективности от внешних условий. К примеру, СКВ модели RSX20D (линия 1) с хладагентом R410A, укомплектованные свинг-компрессором с инверторным приводом постоянного тока и ЭРВ, обеспечивают эффективность около четырех как в режиме охлаждения, так и в реверсивном режиме. Анализ технических характеристик более 850 моделей СКВ не показал влияния определенного конструктивного фактора на эффективность холодильной машины, лишь совокупность всех факторов обеспечивает их высокую эффективность.

Особое внимание уделено применению КТ как самостоятельно, так и в сочетании с другими элементами. На рис.2 приведены фрагменты схемных решений холодильных машин СКВ с использованием КТ.

Оценить влияние КТ на эффективность СКВ возможно только при наличии характеристик всех элементов ХМ (рис.3). Подбор КТ невозможен без соответствующей методики их расчета. Сложность подбора КТ обусловлена большим числом факторов, влияющих на процесс дросселирования хладагента. В случае поступления к КТ переохлажденного хладагента на начальном ее участке течет жидкость, а затем – парожидкостная смесь. Начальное переохлаждение хладагента увеличивает пропускную способность КТ, а начальное паросодержание - уменьшает. Особенность дросселирования хлада-

гента в КТ обусловлена критическим течением парожидкостной смеси, при котором понижение давления на выходе КТ (в испарителе) не влияет на расход хладагента. Основными показателями критического режима течения являются: давление $p_{кр}$, скорость $w_{кр}$, паросодержание $x_{кр}$ и расстояние $l_{кр}$ от входного

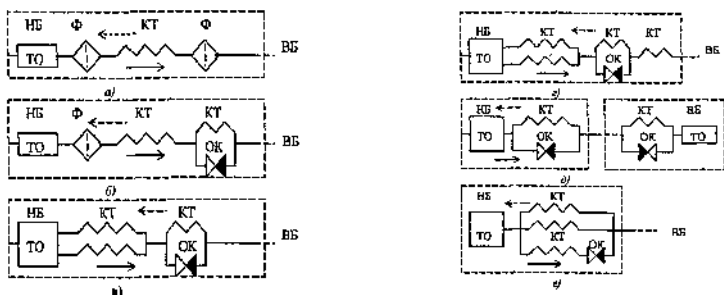


Рис.2. Фрагменты схем реверсивных ХМ с использованием КТ

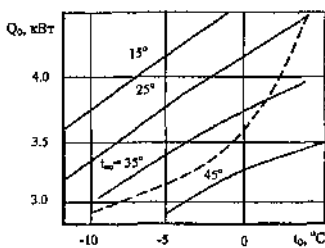


Рис.3. Характеристика ХМ с КТ

до критического сечения. При фиксированных размерах КТ показатели критического режима зависят от вида хладагента, давления p_1 , температуры t_1 и паросодержания x_1 на ее входе. Учесть влияние всех факторов на расход хладагента через КТ не удается, поэтому после ее подбора проводится проверка работы головного образца ХМ.

Анализ работ по исследованию двухфазных потоков и проверочные расчеты позволили прийти к выводу, что для условий движения потока в КТ следует использовать модель гомогенного течения. Дросселирование в КТ рассматривать как адиабатический процесс, при этом плотность смеси определяется с учетом массового или объемного расходного паросодержания. Режим течения считается стационарным. При диаметре $d_p > 0,5$ мм капиллярные свойства жидкости не проявляются.

Основными характеристиками парожидкостных потоков являются: массовое x , объемное расходное β и истинное объемное ϕ паросодержания, массовая скорость ρw , приведенные скорости жидкой w_0' и паровой w_0'' фаз, скорость циркуляции w_0 , которые могут быть выражены через параметры потока:

$$x = G'' / (G' + G'') = (t_c - i) / (i'' - i); \quad \phi = x / [x + (1-x) \cdot K_c \cdot (v'/v'')]$$

$$\beta = V'' / (V' + V'') = w_0'' / (w_0' + w_0'') = x \cdot \rho' / [x \cdot \rho' + (1-x) \cdot \rho''] = x / [x + (1-x) \cdot (v'/v'')];$$

$$\rho_c \cdot w_c = G/S; \quad w_0' = V'/S, \quad w_0'' = V''/S; \quad w_0 = \rho_c \cdot w_c \cdot \rho' = G / (S \cdot \rho')$$

где G , G' и G'' массовые расходы парожидкостной смеси, жидкой и паровой фаз; i_c , i' и i'' - энтальпия смеси, насыщенной жидкости и насыщенного пара; V' и V'' - объемный расход жидкой и паровой фаз; ρ_c , ρ' и ρ'' - плотность смеси, насыщенной жидкости и пара; v' и v'' - удельный объем насыщенной жидкости и пара; S - площадь проходного сечения трубки; w_c - скорость смеси; K_c - коэффициент скольжения фаз.

Плотность и динамическая вязкость смеси при $K_c=1$ в данной работе определяются по выражениям:

$$\rho_c = \rho'' \cdot \beta + \rho' \cdot (1 - \beta) \quad \text{и} \quad \mu_c = \mu'' \cdot \beta + \mu' \cdot (1 - \beta). \quad (1)$$

Процесс изменения параметров смеси хладагента описан уравнениями сохранения массы и количества движения для двухфазного потока:

$$d\{\rho'' \phi w'' + \rho'(1 - \phi)w'\}/dz = dw_0'/dz + (\rho''/\rho') (dw_0''/dz) = 0; \quad (2)$$

$$dp/dz + 4\tau_c/d_x + d\{\rho'' \phi w''^2 + \rho'(1 - \phi)w'^2\}/dz + \rho_c g \sin \theta = 0 \quad (3)$$

где: w' , w'' - истинные скорости фаз; τ_c - напряжение трения на стенке; θ - угол наклона трубки; z - координата по направлению движения среды.

На основе уравнения сохранения энергии при адиабатическом движении устанавливается взаимосвязь между изменением паросодержания и скоростей фаз по длине трубки. Преобразование энергии для рассматриваемого процесса практически определяется перепадом давления на коротком участке КТ соответствующем одинаковому значению понижения температуры насыщения. Общій перепад давления Δp складывается из перепадов давления по длине КТ на преодоление: нивелирного напора Δp_n , на трение Δp_T , местные сопротивления Δp_m , на ускорение Δp_y :

$$\Delta p_i = \Delta p_n + \Delta p_T + \Delta p_m + \Delta p_y. \quad (4)$$

Потери на преодоление нивелирного напора в дальнейшем расчете не учитывались, т.к. являются несущественными. Потери на трение для гомогенного потока определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_T = \xi (\rho_{cp} \cdot w_{cp}^2 / 2) (\Delta l / d_T) = \xi \cdot [(G/S)^2 / (2\rho^2)] \cdot [1 + \chi \cdot ((\rho'/\rho'') - 1)] (\Delta l / d_T), \quad (5)$$

где ξ - коэффициент сопротивления трения, определяемый с использованием приведенных скоростей фаз и соотношения $\xi = \xi'_c - \chi(\xi'_c - \xi'')$.

Местное сопротивление Δp_m определяется на входе в трубку, а в докритических режимах и на выходе из нее. Сопротивление, обусловленное изменением направления потока, учитывается поправочным коэффициентом.

Потеря давления на ускорение Δp_y определяется разностью количества движения в конечном («к») и начальном («н») сечениях рассматриваемого участка:

$$\Delta p_y = \rho_k w_k^2 - \rho_n w_n^2 = (G/S) (w_k - w_n) = (G/S)^2 (v_k - v_n). \quad (6)$$

Задаваясь понижением температуры насыщения на коротком участке Δt_i , можно без приближений определить параметры хладагента на его входе и выходе, а также потери на ускорение Δp_y и трение $\Delta p_r = \Delta p_i - \Delta p_y$. Расчет Δp_r проводится при осредненных по длине участка значениях $\xi_{ср}$, $x_{ср}$, и $w_{ср}$ (5). Величина Δp_r позволяет по значениям скорости смеси и коэффициента трения найти длину участка Δl_i . При достижении условия $-dp/dz = \infty$, что соответствует неравенству $\Delta p_r < 0$, расчет прекращается, т.е. наступает критический режим течения. Суммируя длины предыдущих участков, определяем длину КТ.

Для удобства пользователей составлена обобщенная программа определения длины КТ и построения ее расходных характеристик с заполнением базы исходных данных параметрами свойств 12 хладагентов и возможностью дальнейшего ее расширения. Расходная характеристика КТ $d_i = 1,6 \text{ мм}$, $l_r = 5 \text{ м}$ при дросселировании R407C приведена на рис. 4.

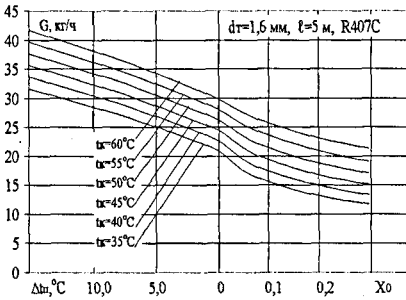


Рис. 4. Расходная характеристика КТ для хладагента R407C

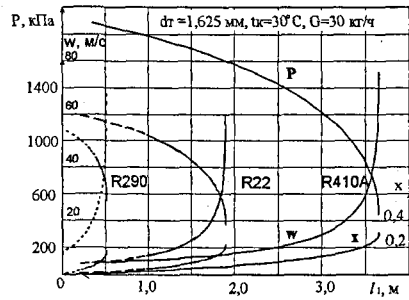


Рис. 5. Изменение параметров хладагента по длине КТ

В отличие от уравнений, направленных на определение пропускной способности КТ по параметрам хладагента на входе и ее размерам, расчетная методика дает возможность проследить изменение параметров хладагента (давления, скорости, паросодержания, энтальпии, вязкости, удельного объема) по длине КТ, вплоть до достижения критического режима или давления кипения в испарителе, если оно выше критического. Характер изменения основных параметров хладагентов по длине КТ приведен на рис. 5.

Достоверность расчетной методики оценивалась сопоставлением результатов расчета длины КТ с опытными и эмпирическими данными разных исследователей. В широком диапазоне начальных условий для дросселирования хладонов R12 и R22 при учете шероховатости трубок по зависимости А.Д.Альтшуля отношения расчетной длины к длине, определенной по номограмме Хопкинса, для 88 вариантов близки к единице и среднее арифметическое составляет $C_{ар} = 0,982$ при стандартном отклонении $\sigma = 0,1146$.

Результаты расчета длины КТ, полученные по модели гомогенного потока сопоставлялись с результатами расчетов гидродинамики водовоздушных и пароводяных моделей, учитывающих истинное объемное паросодержание ϕ или коэффициент скольжения фаз $K_{ск}$. Для сравнения использованы четыре модели: модель У.Фроста, модель Г.Уоллиса с параметром Локкарта-Мартинелли, модель Н.Г.Стюшина, модель З.Л. Миропольского. Сравнение показало, что гомогенная модель обеспечивает лучшее совпадение расчетных длин с найденными по номограмме Хопкинса.

Сопоставление результатов расчета пропускной способности с опытными данными Kim для КТ длиной 1 метр, по хладагентам R22, R407C и R410A, а так же данным Wijaya для КТ диаметром 0,787 мм и разных значениях длины и температуры конденсации хладагента составило $Cap=0,95505$ при $\sigma=0,03514$.

Пример сопоставления пропускной способности определенной по расчетной методике G_p для КТ ($d_t=1\text{мм}$ $l_t=3\text{м}$) с расчетными значениями, полученными по данным ASHRAE (G_a), программы Dan Cap (G_D), обобщенному уравнению Шанхайского университета (G_k) и номограмме Хопкинса (G_n) иллюстрируется в таблице. Дросселирование хладагентов принято для начальных условий: $t_k=50^\circ\text{C}$, $\Delta t_n=0^\circ\text{C}$, $x_0=0$.

Таблица. Пропускная способность трубки по разным источникам

Параметр	R12	R22	R134a	R290	R404a	R407C	R410a	R502	R600	R600a
p_k , кПа	1214,0	1939,5	1317,6	1711,4	2309,2	2185,1	3061,3	2101,3	490,76	691,6
$w_{кр}$, м/с	68,25	81,0	77,01	119,77	96,45	91,07	94,36	80,66	90,9	95,09
$t_{кр}$, $^\circ\text{C}$	-7	-10	-3	-11	-11	-9	-10	-11	1	-2
$x_{кр}$	0,36	0,35	0,38	0,41	0,56	0,43	0,44	0,48	0,31	0,35
G_p , кг/ч	7,38	9,6	7,22	5,8	9,91	10,1	12,9	10,5	2,275	2,95
G_a , кг/ч	-	8,64	7,8	-	-	-	14,03	-	-	-
G_D , кг/ч	5,28	10,6	5,03	5,0	13,1	9,53	-	-	-	2,81
G_k , кг/ч	7,66	9,38	7,49	6,01	11,34	10,89	14,14	11,36	2,36	3,05
G_n , кг/ч	6,9	9,75	-	-	-	-	-	-	-	-
G_p/G_a	-	1,11	0,93	-	-	-	0,92	-	-	-
G_p/G_D	1,398	0,906	1,435	1,16	0,756	1,06	-	-	-	1,05
G_p/G_k	0,963	1,023	0,964	0,965	0,874	0,927	0,912	0,924	0,964	0,967
G_p/G_n	1,069	0,985	-	-	-	-	-	-	-	-

Анализ результатов сопоставления показал, что уравнение специалистов

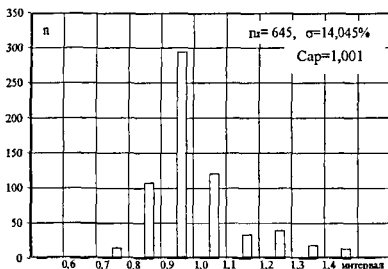


Рис.6. Распределения G_p/G_k

Шанхайского университета справедливо лишь при начальном паросодержании $x_0 < 0,05$. С учетом этого проведено более обстоятельное сравнение расчетных значений G_p с найденными по обобщенному уравнению расходами G_k (645 вариантов). Распределение отношений G_p/G_k по интервалам показано на рис.6. Среднее

значение $C_{ap}=1,001$ при стандартном отклонении $\sigma=0,1404$.

Ввиду хорошего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными и эмпирическими данными разных исследователей разработанная методика может быть рекомендована для подбора КТ, используемых в ХМ и СКВ.

Оценить влияние КТ на работу ХМ в нерасчетных режимах можно по изменению массового расхода дросселируемого хладагента. Для примера выполнены расчеты применительно к ХМ с номинальной $t_k=55^\circ\text{C}$ при дросселировании насыщенного хладагента в КТ $d_t=1,6$ мм и $l=4$ м. Отношение расходов G_i при пониженных температурах конденсации к номинальному значению G_n некоторых хладагентов приводятся на рис. 7. Понижение температуры конденсации на 20°C приводит к понижению массового расхода хладагента на $23\div34\%$. Данный пример, показывает, что КТ должны подбираться по характерным для каждого региона условиям работы ХМ. Снижение температуры кипения слабо влияет на пропускную способность КТ.

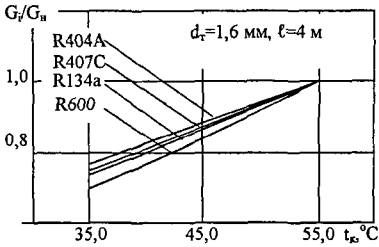


Рис. 7. Снижение пропускной способности КТ в нерасчетных режимах

При использовании КТ для выполнения вспомогательных функций в ней может циркулировать парообразный хладагент, что сопровождается нелинейным изменением параметров потока по ходу движения пара. Повышение скорости пара в КТ до скорости распространения звука в нем приводит к критическому режиму движения.

Предлагаемая методика расчета КТ при движении пара аналогична расчету двухфазного потока. Трубка также делится на участки, но с одинаковым заданным значением понижения давления на каждом из них. Плотность и вязкость пара при этом определяются по справочным данным или эмпирическим зависимостям. На рис. 8 представлена зависимость изменения параметров пара хладагента R134a в КТ для разных значений его перегрева и расхода. Представленная зависимость показывает, что при повышении перегрева пара и расхода критический режим течения начинается раньше.

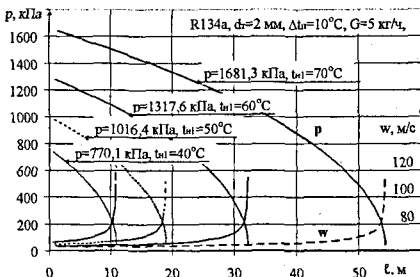


Рис. 8. Изменение параметров пара в КТ при разных значениях его перегрева

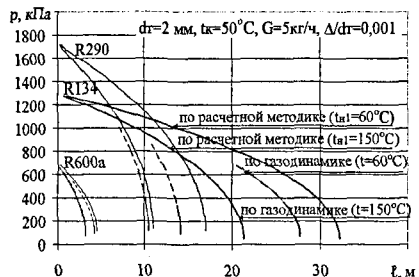


Рис. 9. Сравнение расчетных значений для разных хладагентов

Рассчитанные по предлагаемой методике изменения давления дросселируемого пара по длине трубки для различных хладагентов сравнивались с результатами расчета, полученными по соотношениям газодинамики, в которых параметры дросселируемого пара определялись по зависимостям для идеального газа. Условия и состояние хладагента на входе в КТ, геометрические размеры КТ приняты одинаковыми. Сопоставление результатов расчетов показало, что для низких значений перегрева длина трубки по соотношениям газодинамики отличается на 15÷20% от длины определенной по расчетной методике, рис.9. Существенное расхождение расчетных параметров потока хладагента в режимах, близких к критическим, показывает, что при высоких скоростях реальных газов для гидравлического расчета трубопроводов целесообразно применять методику численного расчета с использованием достоверных данных об изменении плотности и вязкости газа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ технических характеристик современных СКВ показывает, что энергоэффективность их сложным образом зависит от целого ряда факторов. Подготовлен перечень научно-технических мероприятий, направленных на совершенствование судовых СКВ. На конкретном примере установлено влияние КТ на снижение эффективности ХМ в нерасчетных режимах. Оно обусловлено уменьшением пропускной способности КТ при снижении давления конденсации. Предложено подбирать размеры КТ для одноблочных СКВ по характерным для конкретного региона параметрам окружающей среды.

2. Выявлены особенности циркуляции хладагента и стабилизации температурного режима в реверсивных ХМ для СКВ при использовании дросселирующих устройств разного типа. Приводятся характерные схемы включения КТ. Показано широкое применение дроссельных трубок в современных ХМ для выполнения вспомогательных функций.

3. Отмечены достоинства использования электронных регулирующих вентилей в контурах регулирования подачи жидкого хладагента и поддержания температуры воздуха в помещении. Рассмотрены разновидности исполнительных устройств ЭРВ. Получено уравнение, по которому формируется ПИ-закон в системе импульсного регулирования перегрева пара на выходе из воздухоохладителя. Приводится классификация и описание работы шаговых двигателей с учетом способа питания и коммутации обмоток.

4. Разработана схема устройства контроля влажного хода компрессора на базе дифференциальной термопары и электронного блока, который срабатывает при снижении перегрева пара лишь во время работы компрессора (патент №2362948). Предложено использовать для регулирования температуры в вентиляторных доводчиках СКВ с жидким тепло-хладоносителем дросселирующее устройство в виде биметаллических дисков (патент №1795427).

5. Разработана методика расчета капиллярных трубок, основанная на закономерностях гидродинамики двухфазных потоков и пригодная для разных хладагентов с известными свойствами. За основу принята гомогенная мо-

дель адиабатного движения вскипающего хладагента. Решены вопросы определения коэффициента трения парожидкостной смеси, осреднения ее плотности и вязкости. Дана математическая формулировка условий наступления критического режима. Установлено влияние шероховатости медных трубок на движение дросселируемого хладагента.

6. Методика численного расчета КТ, с делением ее на короткие участки переменной длины, реализована в виде программы для ЭВМ с базой исходных данных для 12 хладагентов. Обобщенная программа представлена в удобном для пользователей виде. Она позволяет приняв диаметр КТ, вид и параметры хладагента на входе в трубку определить длину КТ, при которой наступает критический режим или давление потока совпадает с заданным давлением кипения хладагента в испарителе. Опробованы 4 модели влияния истинного объемного паросодержания смеси на результаты расчета. Лучшее совпадение с опытными данными обеспечивает гомогенная модель. Тем не менее, в программу расчетов введен коэффициент скольжения фаз, при равенстве которого единице истинное и расходное объемные паросодержания совпадают.

7. Приведен порядок построения основной и дополнительной характеристик КТ, первая из которых отражает зависимость массового расхода, вторая - зависимость критической температуры (давления) насыщения от состояния дросселируемого хладагента при фиксированных размерах трубки. Получены эмпирические уравнения для расчета длины и пропускной способности КТ при дросселировании ряда хладагентов.

8. Сопоставление результатов многочисленных расчетов КТ с опытными и эмпирическими данными зарубежных специалистов показывает в целом хорошее их совпадение. Обнаруживаются некоторые расхождения между данными разных исследователей. В частности, с использованием методики расчета выявлены неточности в безразмерном уравнении и одном из графиков, приведенных в ASHRAE Handbook 2002 г. Установлена ограниченная область применения обобщенного уравнения представленного специалистами Шанхайского университета.

9. Методика распространена на расчет адиабатического движения однофазной сжимаемой среды в трубопроводах с трением. На примере дроссельной трубки с парообразным хладагентом показаны ее преимущества перед полученными в газовой динамике безразмерными соотношениями, основанными на зависимостях идеального газа. Установлено существенное влияние сжимаемости пара или газа на потери давления при скоростях выше 40 м/с.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ:

1. Кошелев В.Л. Исследование процессов при кипении фреонов в змеевиковом испарителе. // Сборник тезисов докладов. XI межвузовской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Калининградских вузов Минрыбхоза СССР. - Калининград, 1983, с.69.

2. Кошелев В.Л. Средства автоматизации судовых холодильных установок. Гл.2 в кн.: Системы и средства автоматизации холодильных установок. / Под ред. Л.И.Константинова. –М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983, с.25-51.
3. Константинов Л.И., Кошелев В.Л. Исследование тепло- и массообмена при кипении фреона-22 в горизонтальном змеевиковом испарителе.// «Пути увеличения выпуска и улучшения качества пищевых продуктов; внедрение безотходных и малоотходных технологий на основе использования искусственного холода»: Сб. тезисов докладов Всесоюзной конференции –М.: Центральное правление НТО пищевой промышленности, 1984, с.76.
4. Кошелев В.Л. Исследование процессов при кипении фреона-22 в горизонтальном змеевиковом испарителе.// Сборник тезисов докладов XII межвузовской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Калининградских вузов Минрыбхоза СССР. – Калининград, 1984, с.91-92.
5. Пат. №1795427 Российская Федерация, Дроссельное устройство / Кошелев В.Л.; Действует с 28.07.1993 г. РОСПАТЕНТ.
6. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л. Эффективность работы кондиционеров с капиллярной трубкой на нерасчетных режимах.// АВОК, 2007, №5, с.42-46.
7. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л. Научное оборудование в создании высокоэффективного климатического оборудования.// «Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN'2007»: Материалы шестой международной конференции - Калининград: БГАРФ, 2007, с.230-233.
8. Кошелев В.Л., Ейдеюс А.И. Энергетическая эффективность современных систем кондиционирования воздуха.// «Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN'2007»: Материалы шестой международной конференции. - Калининград: БГАРФ, 2007, с.249-252.
9. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л. Гидродинамический расчет капиллярных трубок. // Вестник МАХ, 2008, №3, с.36-39.
10. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л. Адиабатическое течение реальных газов в длинном трубопроводе.// Компрессорная техника и пневматика, 2008, №8, с.28-30.
11. Ейдеюс А.И., Сластихин Ю.Н., Кошелев В.Л., Никишин М.Ю. Работа испарителей с импульсным регулятором перегрева пара.// Вестник МАХ, 2008, №4, с.4-7.
12. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л. Определение характеристик капиллярных трубок.// Вестник МАХ, 2009, №1, с.25-27.

13. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л., Никишин М.Ю. Предотвращение влажного хода холодильных компрессоров.// Компрессорная техника и пневматика, 2009, №3, с.28-30.
14. Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л. Применение шаговых двигателей для привода регулирующих клапанов судовых систем.// «Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров»: Материалы научной конференции аспирантов, докторантов и соискателей. - Калининград: БГАРФ, 2009, с.118-122.
15. Кошелев В.Л., Ейдеюс А.И. Падение давления в трубопроводах при высоких скоростях движения пара. // «Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров»: Материалы научной конференции аспирантов, докторантов и соискателей. - Калининград: БГАРФ, 2009, с.112-118.
16. Кошелев В.Л. Биметаллический регулятор температуры теплоносителя.// «Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров»: Материалы научной конференции аспирантов, докторантов и соискателей. - Калининград: БГАРФ, 2009, с.109-112.
17. Пат. №2362948 Российская Федерация «Устройство для контроля влажного хода компрессора холодильной машины», Патентообладатель «Балтийская государственная академия РФ», авторы: Ейдеюс А.И. (RU), Кошелев В.Л. (RU), Никишин М.Ю. (RU). Зарегистрировано в Государственном Реестре изобретений РФ 27 июля 2009 г.
18. Кошелев В.Л., Ейдеюс А.И., Семакин А.В. Сравнительные расчеты капиллярных трубок.// Вестник МАХ, 2009, №4, с10-13.
19. СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613417 «Программа для гидродинамического расчета капиллярных трубок при дросселировании разных хладагентов». Правообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота» (RU). Авторы: Ейдеюс А.И., Кошелев В.Л., Семакин А.В. (RU). Заявка №2010610688. Дата поступления 15 февраля 2010г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24 мая 2010 г.