

На правах рукописи
УДК 621 59 621 565

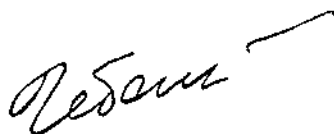


Чебан Сергей Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ХЛАДАГЕНТА RЕ170 (DMЭ) В ЖИДКОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗЕ**

Специальность 05 04 03 – Машины, аппараты и процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



22 СЕН 2008

Диссертация выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н Э Баумана

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор Жердев А А

Официальные оппоненты доктор технических наук,
профессор Арутюнов Б А

доктор технических наук,
профессор Чернышев А В

Ведущая организация ГНУ ВНИХИ Россельхозакадемии, г Москва

Защита диссертации состоится «1» октября 2008 г в 14 30 на заседании диссертационного совета Д 212 141 16 при Московском государственном техническом университете имени Н Э Баумана по адресу 107005, Москва, Лефортовская наб, д 1, корпус факультета «Энергомашиностроение».

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им Н Э Баумана

Автореферат разослан «18» августа 2008 г

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212 141 16,
кандидат технических наук, доцент



Колосов М А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Развитие холодильной техники в настоящее время находится под влиянием следующих международных документов

- Венская конвенция об охране озонового слоя (1985г) и дополняющий ее Монреальский протокол (1987г) о прекращении потребления веществ, разрушающих озоновый слой (в первую очередь хладон R12), и о временном и количественном ограничении применения веществ переходной группы (в том числе хладон R22), имеющих малый потенциал разрушения озонового слоя (ODP),

- Киотский протокол (1997г) к рамочной конвенции ООН об изменении климата и регулировании эмиссии парниковых газов (веществ, имеющих высокий потенциал глобального потепления - GWP), к которым относятся широко применяемые хладоны R22, R134a и многие другие вещества, используемые в холодильной технике

Обзор литературных данных показал, что равноценной замены хладону R12 в холодильной технике пока не найдено, особенно для действующего оборудования Одним из перспективных направлений поиска явилось использование «природных» хладагентов Также стоит принять во внимание ГОСТ Р МЭК 66035-2-24-2001, разрешающий использование в приборах бытовой холодильной техники углеводородов при ограниченной массе заправки (до 150г) Данный документ открывает возможность использования хладагента RE170 (ДМЭ) - диметилового эфира в качестве замены хладона R12 Подобные исследования ведутся в МГТУ им НЭ Баумана уже более 10 лет Однако, отсутствие исчерпывающих данных по переносным свойствам ДМЭ затрудняет расчет и проектирование машин и аппаратов холодильной техники

ДМЭ является также перспективным альтернативным топливом для дизельных двигателей Применение ДМЭ позволяет снизить содержание вредных веществ в отработанных газах до норм Euro-3 без использования нейтрализаторов как на выпускаемых автомобилях, так и находящихся в эксплуатации Сырьем для производства ДМЭ является природный газ Учитывая это, RE170 (ДМЭ), очевидно, будет широко использоваться как рабочее тело транспортных холодильных установок

Одним из важнейших теплофизических свойств, используемых при расчете теплообменного оборудования, является коэффициент теплопроводности Отсутствие строгой теоретической методики определения коэффициента теплопроводности в жидкой и газовой фазе без привлечения точной экспериментальной информации делает актуальной задачей экспериментальное изучение теплопроводности перспективных рабочих тел По коэффициенту теплопроводности RE170 в газовой фазе некоторые данные опубликованы, но они неполные для области параметров, используемых в холодильной технике, и часть из них вызывает сомнение Особо стоит отметить отсутствие данных по коэффициенту теплопроводности RE170 в жидкой фазе

Цель работы Теоретическое и экспериментальное определение коэффициента теплопроводности хладагента RE170 (ДМЭ) в жидкой и газовой фазе, с целью использования в традиционной методике расчета теплообменных аппаратов холодильной техники

Задачи исследования

- 1 Анализ существующих теоретических и экспериментальных методов исследования коэффициента теплопроводности. Выбор наиболее подходящего метода с точки зрения возможности реализации и получения достоверных результатов
- 2 Создание и градуировка экспериментальной установки по определению коэффициента теплопроводности хладагентов
- 3 Получение экспериментальных данных по коэффициенту теплопроводности хладагента RE170 и сопоставление их с результатами теоретических методов расчета, сравнение с данными по коэффициенту теплопроводности других хладагентов
- 4 Анализ влияния коэффициента теплопроводности и других теплофизических свойств на размеры теплообменной аппаратуры при замене хладона R12 на хладагент RE170 в действующих и вновь разрабатываемых установках

Научная новизна

- 1 Модифицирован относительный стационарный метод измерения коэффициента теплопроводности. Благодаря использованию термопреобразователей сопротивления (ТСР) удалось с помощью программных методов в простой форме учитывать необходимые поправки. Контроль за состоянием рабочего участка измерительной ячейки осуществлялся косвенным образом без прецизионных геометрических измерений, через градуировочный эксперимент
- 2 Получены экспериментальные данные по коэффициенту теплопроводности хладагента RE170 в жидкой и газовой фазе. Данные по коэффициенту теплопроводности жидкости получены впервые
- 3 На базе экспериментальных данных получены расчетные зависимости для определения коэффициента теплопроводности хладагента RE170 и приведены рекомендации по применению теоретических методов расчета простых эфиров, в области параметров, характерных для холодильной техники
- 4 Проведен анализ использования хладагента RE170 в теплообменной аппаратуре действующих и вновь разрабатываемых холодильных установок в сравнении с другими хладагентами. Определена зависимость удельного теплового потока от температуры при кипении и конденсации хладагента RE170, что позволяет использовать традиционную методику расчета воздушного конденсатора и испарителя-воздухоохладителя

Практическая значимость

- 1 Создана экспериментальная установка по определению коэффициента теплопроводности хладагентов относительным стационарным методом коаксиальных цилиндров, исследованы ее характеристики
- 2 Экспериментальная информация передана в рабочую группу «Свойства хладагентов и теплоносителей» по комплексной проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика» РАН
- 3 Получены практические рекомендации по использованию воздушного конденсатора и испарителя-воздухоохладителя при замене хладона R12 на хладагент RE170
- 4 Полученные расчетные зависимости использованы в учебном процессе на кафедре Э4 МГТУ им НЭ Баумана при выполнении курсовых проектов и в курсах лекции «Теоретические основы холодильной техники», «Приборы и техника низкотемпературного эксперимента»

Достоверность научных положений обуславливается соответствием полученных экспериментальных данных для апробационного вещества (хладон R12) с результатами ранее проведенных исследований других авторов и табличными значениями фундаментального справочного издания «Справочник по теплопроводности жидкостей и газов» НБ Варгафтик, ЛП Филиппов, АА Тарзиманов, ЕЕ Тоцкий, 1990г

На защиту выносятся

- 1 Методика проведения и обработки результатов эксперимента, позволяющая, учитывая поправки, присущие относительному стационарному методу коаксиальных цилиндров, получать данные по коэффициенту теплопроводности в процессе измерений, одновременно с проведением опыта
- 2 Результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности хладагента RE170 в жидкой и газовой фазе в области параметров, характерных для холодильной техники ($t = -40 \text{ } ^\circ\text{C}$, $p \leq 4 \text{ МПа}$)
- 3 Определение зависимостей удельного теплового потока от температуры при кипении и конденсации хладагента RE170, позволяющих использовать традиционную методику расчета теплообменных аппаратов

Апробация работы Материалы отдельных разделов диссертации докладывались и обсуждались на XI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ, Санкт-Петербург 2005г, и научно-технической конференции с международным участием «Сто лет, которые изменили мир», Санкт-Петербург 2008г

Публикации Тема диссертации отражена в четырех научных работах. Из них в научных журналах, включенных ВАК РФ в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов от соискания ученой степени кандидата наук - две

Структура и объем диссертации Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (115 наименования) Диссертация изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 25 таблиц и 52 рисунок

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подчеркивается актуальность проблемы перевода холодильной техники на экологически безопасные хладагенты, формулируется цель работы, показана научная и практическая необходимость проведения данного исследования.

В первой главе при анализе литературы рассмотрены основные методы экспериментального изучения коэффициента теплопроводности хладагентов Были выделены три большие группы методов стационарные, косвенные (оптические), нестационарные

Особо стоит отметить работы исследовательских групп Цветкова О Б (стационарный метод коаксиальных цилиндров, стационарный метод нагретой нити, метод регулярного разогрева в однофазной области и вблизи критической точки), Груздева В А (стационарный метод коаксиальных цилиндров в жидкой и газовой фазе), Геллера В З (стационарный метод нагретой нити в жидкой и газовой фазе) внесших большой вклад в разработку экспериментальных методов исследования коэффициента теплопроводности хладагентов Также стоит отметить работы Тимофеева Б Д с соавторами по разработке относительного стационарного метода коаксиальных цилиндров

В результате анализа, в соответствии с поставленной в работе задачей, был выбран относительный стационарный метод коаксиальных цилиндров, как наиболее подходящий с точки зрения возможности реализации и получения достоверных результатов Метод зарекомендовал себя как достаточно надежный для исследований коэффициента теплопроводности хладагентов На основе проведенного анализа литературы были сформулированы задачи экспериментальной части исследования

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию коэффициента теплопроводности RЕ170 в газовой и жидкой фазе В главе приведено описание основных теоретических зависимостей для определения коэффициента теплопроводности

Коэффициент теплопроводности в газовой фазе может быть определен из следующих аналитических соотношений.

$$\text{уравнение Эйкена } \lambda_G = \frac{1752 \cdot 10^4 \eta}{M} (C_v + 1068), \quad (1)$$

$$\text{уравнение Бромли } \lambda_G = \frac{1752 \cdot 10^4 \eta}{M} (130C_v + 0875 - 03C_{ir} - \frac{0165}{T_r} - 3\alpha), \quad (2)$$

$$\text{уравнение Мисика-Тодоса } \lambda_G = 8061 \cdot 10^{-3} (1452T_r - 514)^{2/3} \frac{C_p P_c^{2/3}}{T_c^{1/6} M^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\text{уравнение Роя-Тодоса } \lambda_G = 8\,061\,10^{-3} (\lambda_{Gr} + \lambda_{Gint}) \frac{P_c^{2/3}}{T_c^{1/6} M^{1/2}}, \quad (4)$$

где λ_G - коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м К), η - коэффициент динамической вязкости газа, Па с, C_v - мольная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(моль К), C_p - мольная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(моль К), M - молекулярная масса, кг/кмоль, C_{ir} - составляющая теплоемкости, обусловленная внутренним вращением, Дж/(моль К), T_c - критическая температура, К, $T_r = T/T_c$ - приведенная температура, α - поправка на усиление взаимодействия при каждом соударении, обусловленное полярным характером сталкивающихся молекул, Дж/(моль К), P_c - критическое давление, МПа, λ_{Gr} - составляющая теплопроводности, относящаяся к энергии поступательного движения, λ_{Gint} - составляющая теплопроводности, учитывающая взаимный обмен энергией вращения, колебания и т.д.

Коэффициент теплопроводности в жидкой фазе может быть определен из следующих аналитических соотношений уравнение Роббинса и Кингри

$$\lambda_L = 0\,042 \frac{(88\,0 - 4\,94H)}{\Delta S^*} \left(\frac{0\,55}{T_r} \right)^N C_p \left(\frac{\rho}{M} \right)^{4/3}, \quad (5)$$

$$\text{модифицированное уравнение Роббинса и Кингри } \lambda_L = 6\,774\,10^{-3} \frac{\rho^{4/3}}{T}, \quad (6)$$

$$\text{уравнение Сато-Риделя } \lambda_L = \frac{1\,105}{M^{1/2}} \frac{3 + 20(1 - T_r)^{2/3}}{3 + 20(1 - T_{rb})^{2/3}}, \quad (7)$$

уравнение Миссенара-Риделя

$$\lambda_L = \frac{2\,848\,10^{-4} (T_b \rho_0)^{1/2} C_{p0}}{M N^{1/4}} \frac{3 + 20(1 - T_r)^{2/3}}{3 + 20(1 - 273/T_c)^{2/3}}, \quad (8)$$

где λ_L - коэффициент теплопроводность жидкости, Вт/(м К), T_b - нормальная температура кипения, К, $T_{rb} = T_b/T_c$ - приведенная температура при нормальной температуре кипения, C_p - мольная теплоемкость жидкости при постоянном давлении, Дж/(моль К), C_{p0} - мольная теплоемкость жидкости при постоянном давлении и 0°C, Дж/(моль К), ρ - плотность жидкости кг/м³, ρ_0 - плотность жидкости при 0°C, кг/м³, N_1 - число атомов в молекуле (для RE170 $N_1=9$), H , N -параметры исследуемого вещества (для RE170 в области исследуемых параметров $H=2$, $N=1$)

Результаты расчетов по перечисленным методам приведены на рисунках 7, 8 Как видно, теоретические методы имеют достаточно большой разброс друг относительно друга, не дают качественной картины изменения λ в области исследуемых параметров, а данные приведенные в литературе крайне малочисленны и некоторые из них вызывают сомнение

Из чего стала очевидна необходимость проведения экспериментального исследования λ RE170

Третья глава посвящена экспериментальному изучению λ RE170

Теплопроводность методом коаксиальных цилиндров определяется

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) Q}{2\pi L (t_1 - t_2)}, \quad (9)$$

в относительном варианте измерения соотношение (9) принимает вид

$$\lambda = \frac{Qx_1}{[1 + \alpha(t - t_0)][\Delta t - Q(x_2 - x_3t)]}, \quad (10)$$

где λ - коэффициент теплопроводности исследуемого вещества, Вт/(м К),
 Q - тепловой поток на длине L , Вт, $\Delta t = t_1 - t_2$ - температурный перепад в теплопередающем зазоре, °С, α - коэффициент линейного расширения материала ячейки, 1/°С, x_1 x_3 - коэффициенты, определяемые при градуировке рабочего участка Составляющая $Q(x_2 - x_3t)$ учитывает перепад температур на стенках рабочей ячейки

Тепловой поток определяется по мощности электронагревателя R

$$Q = I\Delta U, \text{ Вт}, \quad (11)$$

где I - сила тока, А, ΔU - падение напряжения на нагревателе, В

Экспериментальное определение λ RE170 проводилось на разработанном и изготовленном в лаборатории кафедры Э4 МГТУ им Н Э Баумана экспериментальном стенде Экспериментальная установка (рис 1) включает в себя рабочий участок и следующие системы термостатирования, создания давления, систему очистки рабочего контура, электрических измерений и регулирования, визуального контроля и обработки данных Рабочий участок (поз 1) представлял собой цилиндрический блок, в котором размещена теплопроводящая ячейка На рабочей длине теплопроводящей ячейки L размещен блок ТСП 1199 t_1 t_6 для определения перепада температуры в теплопередающем зазоре с учетом поправок на термическое сопротивление стенок ячейки Радиальный тепловой поток в ячейке создавал линейный электрический нагреватель R Выравнивание температуры рабочего участка обеспечивал трехсекционный нагреватель $R1$ $R3$ по сигналу от термопреобразователей t_{p1} t_{p3} типа ТСП 1199 Измерение λ в области низких температур проводилось при охлаждении рабочего участка жидким азотом, поступающим из охлаждающего устройства (поз 4) в змеевик рабочего участка Заполнение рабочей ячейки исследуемым веществом проводилось через запорочно-эвакуационное устройство (поз 3) после вакуумирования системы из загрузочной емкости E по жидкой фазе с контролем по измерителю давления P_0 типа Cerabar S класса 0 1. Необходимое давление при измерении λ достигалось за счет работы термокомпрессора T , путем его разогрева электрическим нагревателем RT

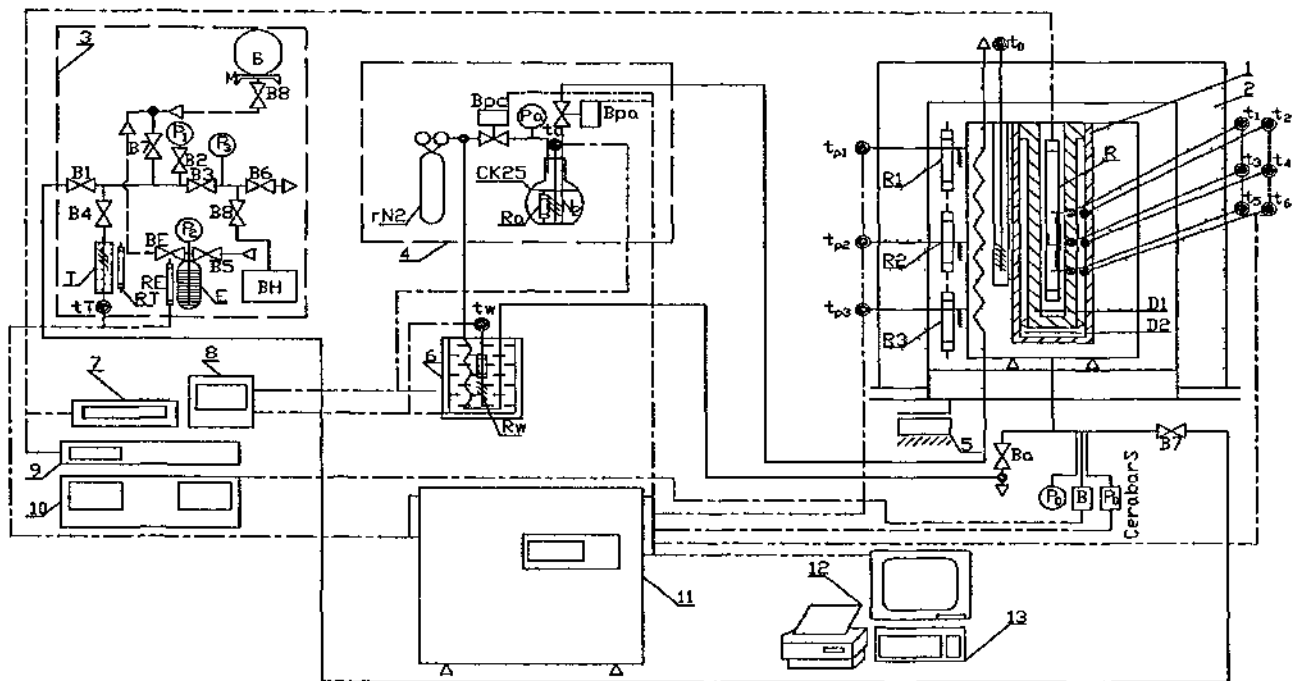


Рис 1 Принципиальная схема экспериментального стенда 1 - рабочий участок, 2 - корпус внешний, 3 - заправочно-эвакуационное устройство, 4 - охлаждающее устройство, 5 - стол установочный, 6 - система очистки рабочего контура, 7 - источник постоянного тока Б5-43А, 8 - ИР «Сосна-004», 9 - вольтметр В7-34А, 10 - вакуумметр ВИГ-3, 11 - стойка автоматики, 12 - устройство вывода на печать, 13 - ЭВМ

Датчики температуры и датчик давления опрашивались с периодичностью 2с, данные с АЦП поступали в общую базу данных (Paradox 7) и отображались на дисплее ЭВМ, благодаря чему выстраивалась четкая картина изменения параметров в рабочей ячейке во времени. После вакуумирования установка приводилась к стационарному режиму на заданном температурном уровне и заданной мощности радиального теплового потока. Стационарность теплового режима определялась из условия равенства нулю производной температур на внутренней и внешней стенке теплопроводного зазора t_1 , t_6 по времени. Опыт состоял из 500 замеров, объединенных общим отрезком времени, около 17 минут. Под замером подразумевается одновременная фиксация значений со всех датчиков температур и датчика давления при постоянной мощности центрального нагревателя R. По команде оператора организовывался SQL запрос из общей базы данных, в результате чего образовывалась дочерняя база со значениями всех параметров в 500 точках, дочерняя база дублировалась на жестком диске ЭВМ в формате MS Excel. Значения параметров дочерней базы поступали в расчетную часть программы, где усреднялись и обрабатывались по формуле (10), в результате чего непосредственно получалось значение λ . Значение λ заносилось в таблицу и на общий график в режиме реального времени. Величина критерия Релея при этом не превышала 800, а экспериментально определенное значение λ не зависело от тепловой мощности в ячейке.

Полученные значения λ были отнесены к среднеарифметической температуре слоя. Перепады температур в слое составляли для жидкости до 3 °С, для газа до 5 °С.

Для измерений λ относительным методом необходима градуировка теплопроводящей ячейки на эталонных веществах. В качестве эталонных веществ использовались четыреххлористый углерод, толуол, аргон. Эталонные вещества были выбраны традиционные для исследований теплопроводности хладагентов. Одной из наиболее значимых задач, решаемых в процессе исследования, было создание одинаковых условий (по тепловой напряженности теплопередающего зазора) при проведении градуировочных опытов на эталонных веществах и исследуемом веществе, и, в соответствии с этим, выбор уравнений для определения градуировочных коэффициентов. Три конкретных уравнения выбирались из всего многообразия градуировочных точек с таким расчетом, чтобы полученные градуировочные коэффициенты после подстановки в уравнения градуировочных точек давали наименьшую сумму квадратов погрешностей. Для апробации был выбран хладон R12, как один из наиболее изученных с точки зрения переносных свойств.

Рабочие точки при градуировке и апробации рабочего участка (см рис 2, 3) и непосредственно при определении λ RE170 (см рис 4-6) измерялись в области параметров, характерных для холодильной техники.

($t = -40 \dots +80^\circ\text{C}$, $p \leq 4 \text{ МПа}$), на следующих барических уровнях $p = 0, 1 \text{ МПа}$, $p = 1, 0 \text{ МПа}$, $p = 2, 0 \text{ МПа}$, $p = 3, 0 \text{ МПа}$, $p = 3, 5 \text{ МПа}$

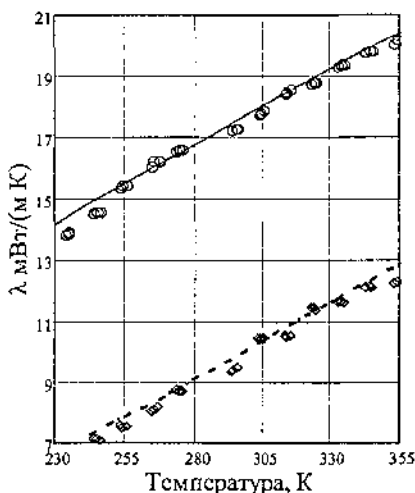


Рис 2 λ_G ($p = 0,1 \text{ МПа}$)
 — справочные значения,
 ○ измеренное значение (Ar),
 ◻ измеренное значение (R12),

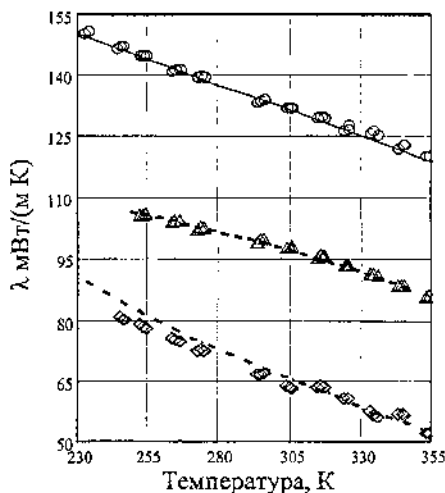


Рис 3. λ_L ($p = 3,0 \text{ МПа}$)
 — справочные значения,
 ○ измеренное значение (C7H18),
 Δ измеренное значение (CCl4),
 ◻ измеренное значение (R12),

Погрешность измерения λ по формуле (10) определялась

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial Q} \delta Q\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial\lambda}{\partial t_i} \delta t_i\right)^2 + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial\lambda}{\partial x_i} \delta x_i\right)^2}, \quad (12)$$

где $n=6$ количество ТСП, $k=3$ число градуировочных коэффициентов. Распределение нормальное, интервал доверительной вероятности 0,95. Наибольший вклад в общую погрешность вносит погрешность определения градуировочных коэффициентов, что связано с погрешностью λ эталонных веществ ($E_\lambda = 2\%$). Таким образом, максимальное значение относительной погрешности λ RE170 не превышает 6% при доверительной вероятности 0,95, что соответствует общему уровню погрешностей экспериментальных методов определения коэффициента теплопроводности. Для апробационных экспериментов (R12) погрешность полученных данных не превышает расчетного значения 6% (см рис 2, 3), что подтверждает работоспособность установки для измерения λ хладагентов и достоверность получаемых результатов.

Четвертая глава посвящена анализу полученных данных экспериментальным и расчетными методами, сравнению с данными по коэффициенту теплопроводности других хладагентов, применению

полученных данных для расчета теплообменной аппаратуры действующих и вновь разрабатываемых холодильных установок

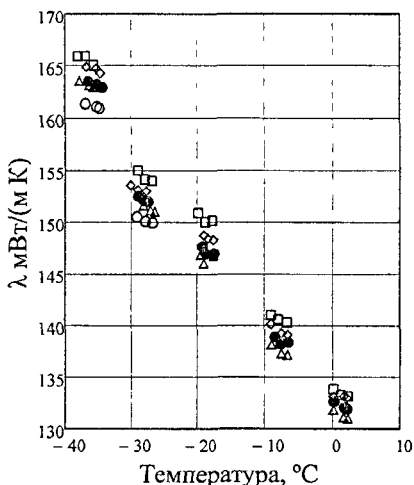


Рис 4 λ_L RE170 \square - $p=3.5$ МПа, \diamond - $p=3.0$ МПа, \bullet - $p=2.0$ МПа, Δ - $p=1.0$ МПа, \circ - $p=0.1$ МПа

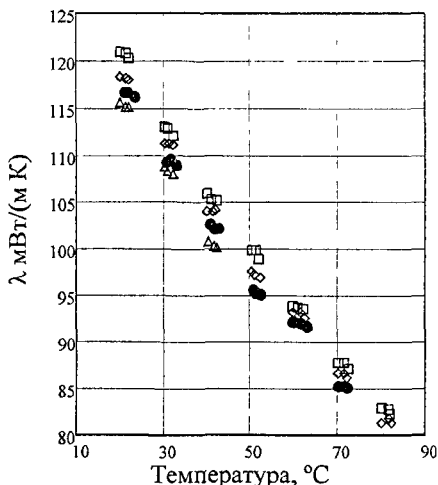


Рис 5 λ RE170 \square - $p=3.5$ МПа, \diamond - $p=3.0$ МПа, \bullet - $p=2.0$ МПа, Δ - $p=1.0$ МПа

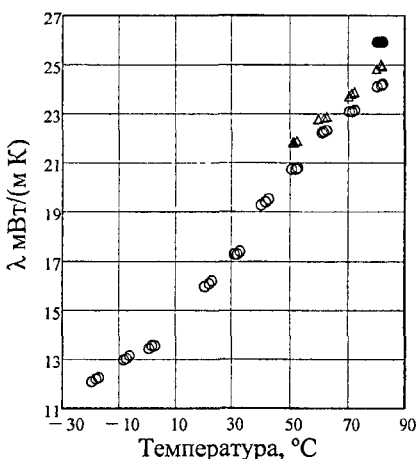


Рис 6 λ_G RE170 \bullet - $p=2.0$ МПа, Δ - $p=1.0$ МПа, \circ - $p=0.1$ МПа

При исследовании λ газа RE170 теоретические методы определяют плотное поле результатов (см рис 7) Экспериментальные точки легли в этот диапазон, для низкотемпературной области приближаясь к методу Эйкена, в области положительных температур приближаясь к методу Роя-Тодоса Отклонение кривой построенной по полученным экспериментальным данным от значения, найденного в литературе (William Braker, Allen L) составляет 8.1%. Как видно из рисунка 7 экспериментальные данные (Maczek A O S, Gray P) очевидно занижены Однако подробный анализ данного источника затруднителен,

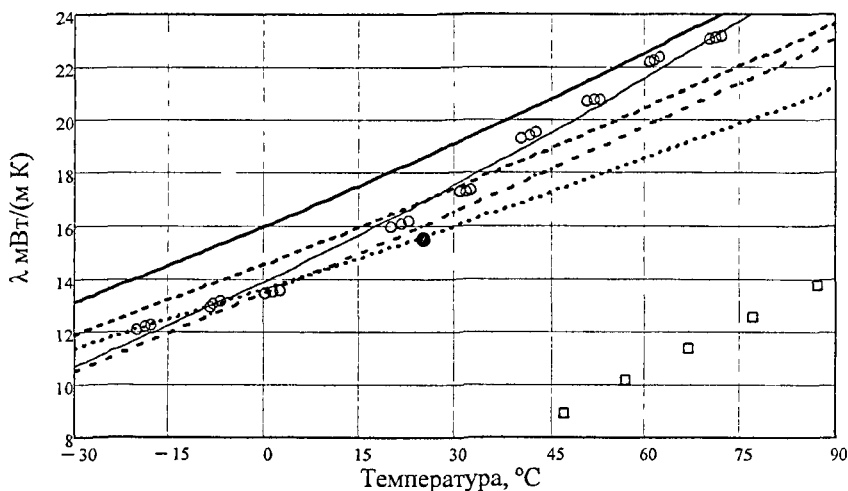


Рис 7 Зависимость λ_g (газ) RE170 от температуры ($p=0$ МПа) \circ - экспериментальные значение данной работы, - - - метод Бромли, - - метод Мисека-Тодоса, . метод Эйкена, — метод Роя-Тодоса, \square - экспериментальные значения (Maczek A O S , Gray P), \bullet - экспериментальное значение (William Braker, Allen L.)

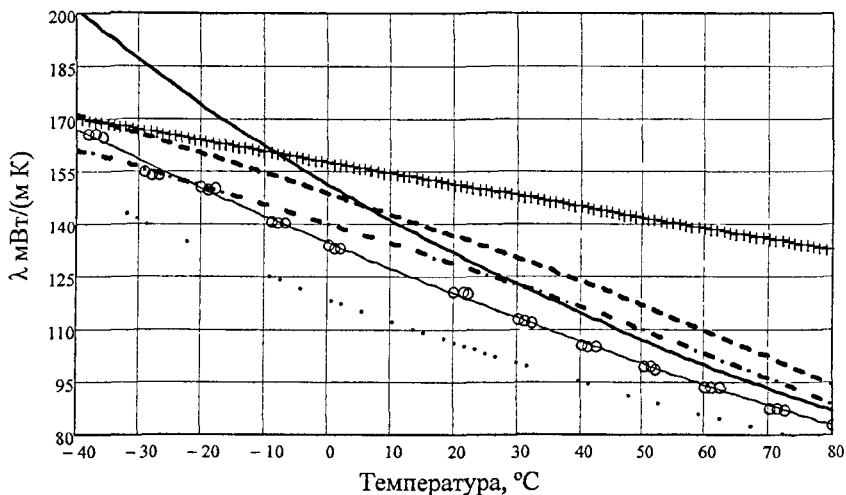


Рис 8 Зависимость λ_l (жидкость) RE170 от температуры ($p=3.5$ МПа) \circ - экспериментальные значение данной работы, - - - метод Сато-Риделя, - - метод Миссенара-Риделя, . метод Роббинса и Кингри, — модифицированный метод Роббинса и Кингри (Ho Teng, James C McCandless and Jeffrey B Schneyer), +++ метод Вебера (А В Поляков)

ввиду отсутствия детальной информации по методу и результатам экспериментального исследования. При исследовании коэффициента теплопроводности жидкости ДЭЭ - диэтилового эфира (наиболее близкого к RE170) метод Роббинса и Кингри считается наиболее подходящим. Зарубежные исследователи так же предполагают, что в области параметров ($t \leq 100^\circ\text{C}$, $p \leq 5$ МПа) наиболее целесообразно определять λ RE170 именно по методу Роббинса и Кингри и приводят вид модифицированного уравнения (6). Однако как видно из рисунка 8, кривая, построенная по модифицированному уравнению (6), отличается от кривой построенной по классическому уравнению (5). Связано это с различиями в определении параметров, которые присутствуют в классическом уравнении (5). Средние значения отклонения экспериментальных точек в данном диапазоне параметров от методов Миссенара-Риделя и классического Роббинса и Кингри составляет -10% и 11% соответственно. Что совпадает с диапазонами погрешностей указанных для данных методов. Однако для метода Миссенара-Риделя характерно наличие коэффициента $2\,848\,10^{-4}$ в уравнении (8) который следует, уменьшить на 10-15 % (позднее Миссенар предложил значение $2\,658\,10^{-4}$).

Используя аппроксимацию кривыми второго порядка методом наименьших квадратов, по полученным экспериментальным данным определены расчетные формулы для λ RE170 в жидкой и газовой фазе в области параметров, характерных для холодильной техники (см рис 7, 8)

$$\text{для газа } \lambda_G \cdot 10^3 = -0\,823 - 6\,547 \cdot 10^{-3}T + 2\,214 \cdot 10^{-4}T^2, \quad (13)$$

$$\text{для жидкости } \lambda_L \cdot 10^3 = 438\,9 - 1\,476T + 1\,325 \cdot 10^{-3}T^2 \quad (14)$$

Часто в холодильной технике RE170 рассматривают с точки зрения замены R12. В связи с этим возникает вопрос изменятся ли геометрические размеры теплообменных аппаратов, а если изменятся то как. В области параметров, характерных для холодильной техники, λ RE170 выше чем R12 на 36-48% и чем R134a на 24-32% в жидкой фазе, и соответственно на 35-44% и 19-21% в газовой фазе.

Для расчета поверхности теплообмена воздушного конденсатора и испарителя-воздухоохладителя за основу была взята традиционная методика и конструктивные данные для теплообменных аппаратов (Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин / Под ред. И.А. Сакуна - Л. Машиностроение, 1987 - 423 с)

Для воздушного конденсатора удельный тепловой поток в аппарате

$$\text{со стороны рабочего тела } q_a = 0\,724 \sqrt{\frac{r \rho^2 \lambda^3 g}{\eta d_{\text{ан}}}} (T - T_{\text{см}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (15)$$

$$\text{со стороны воздуха } q_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{F_{\text{ен}}}{F_{\text{вн}} + F_{\text{н}}} \sum \frac{\delta}{\lambda_{\text{см}}}} (T_{\text{см}} - T_{\text{в}}) \text{ Вт/м}^2, \quad (16)$$

для испарителя воздухоохладителя удельный тепловой поток в аппарате

$$q_a = \left(\frac{(\varpi \rho)^{0.2} A}{d_{вн}^{0.6}} \right)^{2.5} \Delta T_a^{2.5}, \text{Вт/м}^2, \quad (17)$$

со стороны воздуха

$$q_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + R_{ин} + R_{конт}} \left[\frac{F_p}{F_{оп}} E \psi + \left(1 - \frac{F_p}{F_{оп}} \right) \right] \frac{F_p}{F_{вн}} (T_a - T_{ст}), \text{Вт/м}^2, \quad (18)$$

где α_a - удельная теплота испарения, кДж/кг, ρ - плотность жидкости, кг/м³, λ - коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м К), η - коэффициент динамической вязкости жидкости, Па с, c - теплоемкость жидкости, Дж/(кг К), ϖ - скорость рабочего тела м/с, g - ускорение свободного падения, м/с², $d_{вн}$ - внутренний диаметр трубы, м, $T_{ст}$ - температура стенки трубы, К, T_a - температура воздуха, К, α_a - коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха, Вт/(м² К), $F_{вн}$ - площадь внутренней поверхности трубы, м²/м, $F_{н}$ - площадь наружной поверхности оребренной трубы, м²/м, F_p - площадь поверхности ребер, м²/м, $F_{оп}$ - наружная площадь оребренной трубы, м²/м, $\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности стенки трубы (меди), Вт/(м К), δ - толщина трубки теплообменника, м, $R_{ин}$ - термическое сопротивление инея, м² К/Вт, $R_{конт}$ - термическое сопротивление контакта ребер с трубами, м² К/Вт, E - коэффициент эффективности ребра, ψ - неравномерность теплоотдачи по высоте ребра, A - коэффициент, зависящий от физических свойств рабочего тела и температуры кипения

Коэффициент A табулирован для наиболее часто используемых хладонов, а его отсутствие делает затруднительным расчет испарителя-воздухоохладителя для RE170 по уравнению (17)

Удельный тепловой поток в испарителе-воздухоохладителе можно найти также из соотношения

$$q_a = 0.543 \frac{\lambda^{0.6} c^{0.4} (\rho \varpi)^{0.8}}{(\eta g)^{0.4} d_{вн}^2} \Delta T_a, \text{Вт/м}^2 \quad (19)$$

Приравняв значения удельных тепловых потоков, определенных по уравнению (17) и (19), были найдены значения коэффициента A для RE170 при различных температурах кипения (см табл 1) Аналогично расчету испарителя-воздухоохладителя в формуле расчета удельного теплового потока для воздушного конденсатора (15) можно выделить комплекс теплофизических параметров

$$B = 0.724 \sqrt{r \rho^2 \lambda^3 g / \eta},$$

тогда формула (15) примет следующий вид

$$q_a = B d_{вн}^{-1/4} (T - T_{ст}), \text{Вт/м}^2. \quad (20)$$

Уравнение (20) упрощает нахождение удельного теплового потока со стороны рабочего тела для воздушного конденсатора. Особенно это актуально при инженерных расчетах теплообменных аппаратов при работе на рабочих телах, теплофизические свойства которых отражены не достаточно полно в справочной литературе, как в случае с RE170. В таблице 2 приведены значения коэффициента В при различных температурах конденсации.

Таблица 1

Значение коэффициента А в зависимости от температуры кипения

Рабочее вещество	$t_0, ^\circ\text{C}$			
	-25	-15	-5	5
R11	0 369	0 441	0 508	0 572
R12	0 897	0 996	1 093	1 185
R22	0 994	1 105	1 242	1 401
R142	0 618	0 689	0 772	0 857
RE170(ДМЭ)	0 481	0 597	0 728	0 908

Таблица 2

Значение коэффициента В в зависимости от температуры конденсации

Рабочее вещество	$t_k, ^\circ\text{C}$			
	25	35	45	55
R12	1016 6	984 5	948 4	907 3
R22	1134 6	1069 5	999,4	923 8
R134a	1337 9	1278 7	1220 1	1165 3
RE170(ДМЭ)	1600 3	1524 9	1446 1	1363 7

Был проведен сравнительный анализ значений удельных тепловых потоков для R12 и RE170. Для воздушного конденсатора удельный тепловой поток при работе на RE170 больше чем для R12 на 15%, а для испарителя-воздухоохладителя на 2-7%.

Также была рассмотрена реальная холодильная машина на базе герметичного смазываемого одноступенчатого поршневого компрессора КК37С1Е по данным калориметрических испытаний замены R12 на RE170 методом «дроп-ин» А В Полякова.

Проведен сравнительный расчет по величинам поверхностей теплообмена для случая работы на R12 и RE170. Значение площадей поверхностей теплообмена для RE170 меньше чем R12 на 18-28% для воздушного конденсатора и на 7-16 % для испарителя-воздухоохладителя (см. рис. 9). В случае замены R12 на RE170 в работающем агрегате теплообменные аппараты будут обладать запасом по поверхности теплообмена, однако стоит отметить, что они будут и менее нагружены.

(холодопроизводительность при использовании RE170 меньше, чем при R12 на 6-13%, работа компрессора меньше в среднем на 12%, теплота конденсации на 3-12%, а холодильный коэффициент в среднем на уровне R12) Подобный анализ проводился и в работе А В Полякова Выводы о работоспособности теплообменных агрегатов при замене в существующей машине R12 на RE170 подтверждаются и на базе экспериментальных данных по λ RE170

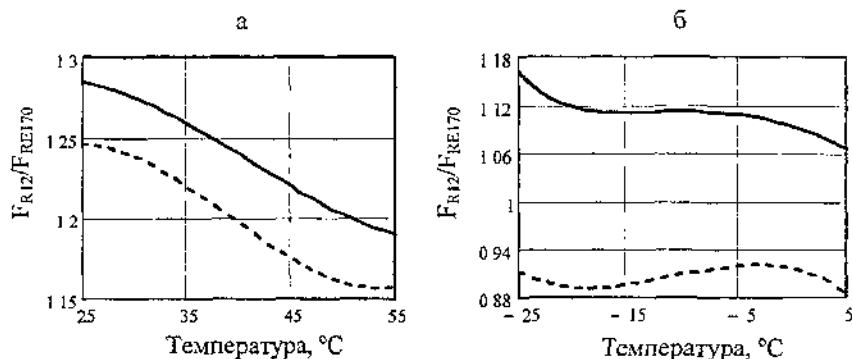


Рис 9 Зависимость отношения поверхностей теплообмена (а – конденсатора, б – испарителя) R12 и RE170 от температуры значения данной работы, ___ значения А В Полякова

Отличия же в численных значениях результатов сравнения геометрических размеров теплообменной аппаратуры при замене методом «дроп-ин» R12 на RE170 связаны с тем, что в виду отсутствия табличных данных по λ RE170 А В Поляков в своей работе проводил расчеты удельных тепловых потоков теплообменных аппаратов с рядом допущений Для определения λ RE170 использовалось уравнение Вебера (с допущением о равенстве коэффициентов пропорциональности ДЭЭ и ДМЭ), а в формуле (17) предполагалось равенство коэффициента пропорциональности А для RE170 и R12

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1 Проведен сравнительный анализ теоретических методов определения коэффициента теплопроводности λ RE170 в жидкой и газовой фазе для области параметров, характерных для холодильной техники ($t = -40 \dots +80^\circ\text{C}$, $p \leq 4\text{МПа}$)
- 2 Создана экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности хладагентов в широком диапазоне параметров
- 3 Разработана методика обработки результатов эксперимента на ЭВМ, позволяющая учитывать поправки, присущие относительно стационарному методу коаксиальных цилиндров и получать

экспериментальные значения коэффициента теплопроводности одновременно с проведением опыта

- 4 Определены коэффициенты теплопроводности RE170 в жидкой и газовой фазе для области параметров, характерных для холодильной техники, с максимальной относительной погрешностью не более 6% при доверительной вероятности 0 95
- 5 На основе экспериментальных данных получены расчетные зависимости коэффициента теплопроводности RE170 в жидкой и газовой фазе Даны рекомендации по возможности использования теоретических методов определения коэффициента теплопроводности простых эфиров
- 6 На основе полученных экспериментальных данных проведен сравнительный анализ по величине коэффициента теплопроводности хладагентов R12, R134a и хладагента RE170 В среднем в области параметров, характерных для холодильной техники, λ хладагента RE170 выше чем λ R12 на 36-48% и чем R134a на 24-32% в жидкой фазе, и соответственно на 35-44% и 19-21% в газовой фазе
- 7 На основе полученных данных подтверждена и уточнена возможность замены хладона R12 на хладагент RE170 в действующей холодильной машине без замены теплообменных аппаратов, при этом они будут обладать запасом по поверхности теплообмена в среднем на 20% для конденсатора и на 10% для испарителя
- 8 Определена зависимость удельного теплового потока от температуры при кипении и конденсации хладагента RE170, что позволило использовать традиционную методику расчета воздушного конденсатора и испарителя-воздухоохладителя

Тема и содержание диссертации отражены в следующих работах

- 1 Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности хладагентов / А А Жердев, С Д Глухов, А Н Левко, С В Чебан // Вестник МГТУ Специальный выпуск Серия Машиностроение - 2008 – С 85-101
- 2 Изучение теплопроводности ДМЭ в жидкой фазе при $t=-30$ 80°C / А А Жердев, С Д Глухов, А Н Левко, С В Чебан // Вестник МГТУ Специальный выпуск Серия Машиностроение - 2008 – С 184-189
- 3 Исследование коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности диметилового эфира / А А Жердев, А В Шарабурин, Д А Божинский, А Н Левко, С В Чебан // XI Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ Тез докл - Санкт-Петербург, 2005 - С 54
- 4 Жердев А А , Чебан С В Исследование теплопроводности жидкого ДМЭ при температурах 30-80°C // Сто лет, которые изменили мир Докл Международной конф - Санкт-Петербург, 2008

Подписано к печати 12.08.08 Заказ №**431**

Объем 1,0 печ л Тираж 100 экз

Типография МГТУ им НЭ Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул , д 5
263-62-01