

1567с 1

На правах рукописи

УДК 621.59

ЛЕОНОВ Виктор Павлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
· АВТОРЕФРИЖЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПЛИВА
(СЖИЖЕННЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ) .
В КАЧЕСТВЕ ХЛАДАГЕНТА**

**05.04.03 - Машины и аппараты холодильной и криогенной
техники и систем кондиционирования**

**Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Москва - 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Жердев А.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Пешти Ю.В.
- кандидат технических наук,
доцент Стрельцов А.Н.

Ведущее предприятие: ВНИИХОЛОДМАШ



Защита состоится "22" ноября 1999 года в 14 часов 30 мин
на заседании диссертационного совета К.053.15.07 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу 107005, г. Москва, Лефортовская
наб., д. 1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

Вам прилагаются 2 экземпляра, заверенные печатью, просьба высылать по адресу:

г. Москва 1999 г.

библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

1564651

Глухов С.Д.

печатный лист. Тираж 100 экз.

нтр. ПЛД № 53-477.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с ухудшающейся экологической обстановкой в мире переход к новым энергосберегающим технологиям и озонобезопасным рабочим телам холодильных установок чрезвычайно актуален. По сравнению с парокompрессионной холодильной машиной холодильная установка с разомкнутым циклом на смесях углеводородов имеет ряд преимуществ: применение пропан-бутановой холодильной установкой (ПБХУ) снижает расход топлива, поскольку не затрачивается энергия на привод компрессора и вентилятора конденсатора; отсутствие компрессора и конденсатора упрощает конструкцию холодильной установки, уменьшает массу и габаритные размеры, повышает надежность; упрощается эксплуатация холодильной установки; запыленность наружного воздуха не влияет на работу конденсатора, нет необходимости периодически компенсировать утечку хладагента, не требуется высококвалифицированное обслуживание.

Стоимость пропановой холодильной установки по сравнению с парокompрессионной, даже с учетом стоимости установки стандартного газобаллонного оборудования, уменьшается в 2...3 раза.

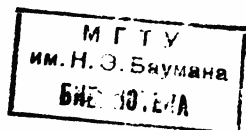
К недостаткам ПБХУ следует отнести зависимость ее работы от работы двигателя.

Исследование свойств сжиженных нефтяных газов (СНГ) показали перспективность их использования в качестве рабочего тела в различных холодильных системах.

Цель работы. Целью данной работы являлось создание и исследование холодильной установки авторефрижератора. В качестве хладагента в холодильной установке использовались сжиженные нефтяные газы, которые являлись и моторным топливом.

Поставленная цель достигалась решением следующих задач.

1. Исследование свойств пропан-бутанового топлива в зависимости от состава (в пределах ГОСТа) и температуры окружающей среды.
2. Теоретическое исследование разомкнутого цикла, работающего на четырехкомпонентной смеси предельных и непредельных углеводородов, с учетом влияния регенерации. Анализ цикла с двумя уровнями термостатирования и цикла с реконденсацией. Исследование процесса захолаживания элементов холодильной установки.



1564651

3. Разработка, изготовление опытного образца авторефрижератора с пропан-бутановой холодильной установкой (ПБХУ) и проведение дорожных испытаний.

Научная новизна. Поставлена и решена задача использования хладоресурса СНГ. Получены новые данные о свойствах СНГ - перспективного хладагента. Разработаны и исследованы циклы холодильных установок, реализующих хладоресурс: двухуровневое охлаждение с разделением фаз, цикл с реконденсацией и цикл с адиабатным расширением. Предложена методика расчета этих циклов. Получены новые экспериментальные данные о работе ПБХУ в составе авторефрижератора.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработана программа расчета свойств четырехкомпонентной смеси углеводородов, являющейся хладагентом в разомкнутом цикле холодильной установки и моторным топливом авторефрижератора. Предложены и проанализированы различные варианты холодильных циклов. Проведено согласование работы ПБХУ и двигателя. Созданы опытные образцы ПБХУ авторефрижератора и проведены их дорожные испытания. Подготовлена техническая документация на выпуск этих установок. Опытные образцы авторефрижераторов экспонировались на международных и всероссийских выставках в С.-Петербурге, Астрахане и Москве: в экспоцентре на Красной Пресне и ВВЦ.

Реализация работы. Созданы два варианта ПБХУ авторефрижератора. Подтвержден заданный уровень термостатирования в кузове: 0...+12°C. Полностью согласованы расходные характеристики холодильной установки и двигателя авторефрижератора на всех режимах движения.

Результаты теоретического и экспериментального исследования использованы при создании опытно-промышленных образцов ПХУ на базе автомобиля "Газель".

Совместно с АО "Автосистема" (НАМИ, Москва) проведены сертификационные испытания авторефрижератора, оснащенного ПБХУ.

Результаты диссертационной работы внедрены в АО "Псковавто" (г. Псков), на авторемонтном заводе №8 (г. Москва), при проектировании и создании авторефрижераторов по заказу автокомбинатов №№ 41 и 32 (г. Москва). Конструкция ПБХУ приведена в соответствии с конструкцией газобаллонной аппаратуры АО "Автосистема" (НАМИ, Москва).

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на международной конференции “Холодильная техника России. Состояние и перспективы накануне XXI века” (Санкт-Петербург. 1998г.), двадцатом международном Конгрессе Холода, IIR/IIF, (Сидней. 1999 г.). В полном объеме диссертация была обсуждена и одобрена на заседании кафедры Э-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана (1999 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи. Получено положительное решение на выдачу патента и подано две заявки на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов и приложений, списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 177 страниц, в том числе 67 рисунков, 13 таблиц. Список литературы включает 96 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Применение сжиженного газа в качестве моторного топлива позволит решить одну из важнейших задач - экологическую. Выхлопные газы газобаллонных автомобилей содержат в своем составе значительно меньше токсичных и канцерогенных компонентов по сравнению с бензиновыми и дизельными двигателями, что позволяет улучшить состояние атмосферы, особенно в крупных городах.

СНГ применяется на транспорте с недоиспользованием хладоресурса, который равен фазовому переходу топлива из жидкого состояния в парообразное. Для осуществления этого перехода используется теплота двигателя или теплота изотермического кузова.

В первой главе дан анализ литературных источников и методов расчета свойств основных компонентов СНГ. Известны замкнутый и разомкнутый циклы холодильных установок авторефрижераторов. В замкнутом цикле хладагентом могут служить аммиак, фреоны, углеводороды и другие вещества.

В холодильных установках разомкнутого цикла хладагентом служит топливо, которое, пройдя охлаждающий контур, поступает в двигатель.

Предложения создать холодильную установку разомкнутого цикла для авторефрижераторов появились еще в тридцатые годы. Тогда эти установки не получили распространения и лишь в 1975 году в Москве на XIV Международном конгрессе холода было сделано сообщение о попытке создания холодильных систем с разомкнутым циклом

и с рабочим телом, состоящим из смеси 80% пропана и 20% бутана. В учебно-научном центре МГТУ им Баумана “Криоконсул” проводились разработки малотоннажных рефрижераторов на базе шасси автомобилей “Москвич-23352-пикап”, УАЗ-3962 и ГАЗ-33021 “Газель”. Накоплен опыт создания холодильников и авторефрижераторов, работающих на жидких углеводородах, которые используются как топливо для газовых плит или как топливо в двигателе автомобиля.

По сравнению с парокомпрессионной машиной пропан-бутановая холодильная установка разомкнутого цикла имеет ряд преимуществ. Применение ПБХУ снижает расход топлива, поскольку не требуется затраты энергии на привод компрессора и вентилятора конденсатора. Кроме того, более полная газификация топлива на входе в двигатель также уменьшает его расход. Вышесказанное приводит к уменьшению цены ПБХУ по сравнению с зарубежными парокомпрессионными на порядок, а также к снижению стоимости эксплуатации.

Основными составляющими сжиженного нефтяного газа (СНГ) являются пропан (C_3H_8), нормальный бутан (C_4H_{10}) и изобутан - предельные углеводороды и непредельные углеводороды (пропилен, бутилен и др.). Состав топлива регламентируется стандартом, который действует с 1 июля 1988 г. Этот стандарт предусматривает две марки газового топлива: зимнее - ПА (пропан автомобильный), которое содержит $90 \pm 10\%$ (по массе) пропана, и летнее - ПБА (пропан-бутан автомобильный), которое содержит $50 \pm 10\%$ пропана. Примеси изобутана ($i-C_4$), как правило, не превышают 20% от содержания нормального бутана ($n-C_4$). Для расчета цикла в качестве основных выбраны четыре компонента: пропан, n -бутан, i -бутан и пропилен. Предварительный анализ свойств выбранных четырех основных компонентов СНГ показывает относительную близость этих свойств, включая теплоту испарения в диапазоне температур - 30...0° С. Значительно различаются только лишь температуры кипения компонентов. Все это предполагает слабую зависимость удельной холодопроизводительности ПБХУ от состава СНГ и температуры окружающей среды, и значительное изменение минимальной температуры, которая устанавливается после дросселирования.

Свойства компонентов определялись по модифицированному уравнению Редлиха-Квонга

$$Z = \frac{PV}{RT} = \frac{V}{V - b} - \frac{\Omega_a}{\Omega_b} \frac{b}{V + b} F, \quad (1)$$

где F - величина, зависящая от температуры. Для легких углеводородов наиболее хорошее совпадение с экспериментом при определении параметров фазового равновесия и энтальпии дает поправка F в форме Соаве

$$F = 1/T_r [1 + (0,480 + 1,574\omega - 0,176\omega^2)(1 - T_r^{0,5})]^2. \quad (2)$$

По результатам выполненного анализа сформулированы основные задачи исследования холодильной установки авторефрижератора с использованием топлива - сжиженного нефтяного газа - в качестве хладагента.

- Провести исследование свойств топлива (ПА и ПБА) - смесей предельных и непредельных углеводородов как хладагента: температуры кипения, удельной теплоты испарения, давления в баллоне в зависимости от состава смеси и температуры окружающей среды.

- Выполнить теоретическое исследование разомкнутого цикла, работающего на четырехкомпонентной смеси. Исследовать влияние регенерации на параметры разомкнутого цикла холодильной установки, в том числе на скорость захлаживания. Создать методику расчета холодильной установки авторефрижератора.

- Рассмотреть различные варианты схемы холодильной установки.

- Провести экспериментальные исследования ПБХУ. Решить вопросы согласования работы холодильной установки с работой двигателя авторефрижератора.

- На основе теоретических и экспериментальных данных установить области рационального применения и режимов термостатирования пропан-бутановых холодильных установок, работающих в разомкнутом цикле с применением СНГ. Дать рекомендации по повышению эффективности работы ПБХУ.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию разомкнутых циклов холодильной установки авторефрижератора. Все основные параметры: удельный объем пара и энтальпия вычислялись по принципу аддитивности. Для определения единого уровня изменения энтальпий всех компонентов смеси была применена идеально-газовая энтальпия, которая может быть вычислена в любой точке. При малом значении давления ($P_0 \rightarrow 0$), когда еще работает модель сплошности среды, газ можно рассматривать как идеальный и изменение энтальпии равно

$$I_{T_1}^0 - I_0 = \int_0^{T_1} C_p^0(T) dT, \quad (3)$$

где C_p^0 - идеальная-газовая теплоемкость при постоянном давлении, которая является функцией только температуры T , и эта зависимость выражается полиномом

$$C_p^0 = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (4)$$

Смесь углеводородов принималась идеальной, т.е. подчиняющейся законам Рауля и Дальтона. На основе этих законов был составлен алгоритм, используя который можно было рассчитать концентрации всех компонентов, находящихся в закрытом сосуде (баллоне). Реальный процесс отбора жидкой фазы из баллона происходит с понижением температуры из-за испарения жидкой фазы, чтобы заполнить освободившийся объем паром. Однако проходит он крайне медленно, и можно допустить, что он близок к изотермическому. Для расчета доли пара и состава используется система уравнений, количество которых определяется числом компонентов в смеси

$$\begin{cases} 1 = V + L \\ x_{O1} = Vy_1 + Lx_1 \\ x_{O2} = Vy_2 + Ly_2 \\ \sum x_i = 1 \\ \dots\dots\dots \end{cases} \quad (5)$$

Можно отметить, что изменение холодопроизводительности практически не зависит от взаимной концентрации компонентов СНГ, т.к. значения их теплоты кипения мало отличаются друг от друга и слабо изменяются в рабочем диапазоне температур. Что касается температуры после дросселирования t_{min} , то она изменяется в зависимости от содержания высоко- и низкокипящих компонентов в широких пределах (от -34° до -10°C) со слабой зависимостью от $t_{o.c.}$ Этот факт объясняется низкой температурой кипения пропана по сравнению с температурами кипения других компонентов.

С практической точки зрения весьма интересна зависимость q_x и t_{min} от давления после дросселя. Во втором варианте рефрижератора было решено отказаться от ресивера между холодильной установкой и двигателем. Газ после ПБХУ сразу подавался во вторую ступень редуктора газобаллонной системы двигателя по трубке. Для того, чтобы обеспечить устойчивую работу двигателя на всех режимах необходимо было поддерживать максимальное избыточное давление в этой магистрали. Для работы ПБХУ это давление должно быть минимальным для получения как можно более низкой

температуры кипения хладагента. Оптимум был найден при проведении дорожных испытаний и составил 0,14 МПа. По сравнению с нулевым избыточным давлением это привело к уменьшению q_x на 5-10 Дж/г, но $t_{\min}$ возросла на 8-9 градусов. Поправка на изменение температуры охлаждения была учтена при расчете и подборе воздухоохладителя.

Расчеты показали, что при отборе жидкой фазы из баллона независимо от температуры окружающей среды и первоначального состава СНГ давление в баллоне изменяется незначительно (5...6 %). Это изменение не может сколько-нибудь существенно повлиять на удельную холодопроизводительность и расход смеси. Изменение же температуры $t_{\min}$ отмечено при наибольшей температуре $t_{o.c.}$ лишь в пределах 1,5°C. Что касается изменения холодопроизводительности $\Delta q_x = q_x^{cpe1} - q_x^{6pe}$, то оно составило 40 кДж/кг; относительное изменение холодопроизводительности при $t_{o.c.}=+35^\circ\text{C}$ для всех смесей составило менее 16%.

Холодопроизводительность Q_x определяется произведением удельной холодопроизводительности q_x и секундного расхода топлива G . Удельная холодопроизводительность в зависимости от состава в рамках ГОСТа и сезонных изменений температуры окружающей среды колеблется в пределах от 240 до 370 Дж/г. Расход же СНГ через двигатель зависит от грузопъемности и режима движения, т.е. от скорости движения, поэтому на определенных участках трассы холодопроизводительности ПБХУ недостаточно для компенсации теплопритоков в изотермический кузов, где-то она будет избыточна. Для определения области соответствия необходимой холодопроизводительности с расходом топлива в зависимости от грузопъемности и скорости движения был выполнен расчет для пяти автомобилей, серийно выпускаемых в РФ: "Москвич" 2140, "Газель" ГАЗ 33021, ГАЗ-52, ГАЗ-53 и ЗИЛ 431-410.

Расход топлива в кг на 100 километров пути и грузопъемность в т были приняты по паспортным данным на эти автомобили. Связь между грузопъемностью и габаритами изотермического кузова была определена по российским и зарубежным (фирма CARRIER TRANSICOLD) нормам загрузки. Таким образом была установлена необходимая холодопроизводительность (теплоприток) с запасом в зависимости от типа автомобиля. На эти кривые были наложены результаты расчетов располагаемой

холодопроизводительности, определенной по расходу топлива для скоростей движения $w = 40, 60$ и 80 км/ч и для $q_0 = 260$ Дж/г.

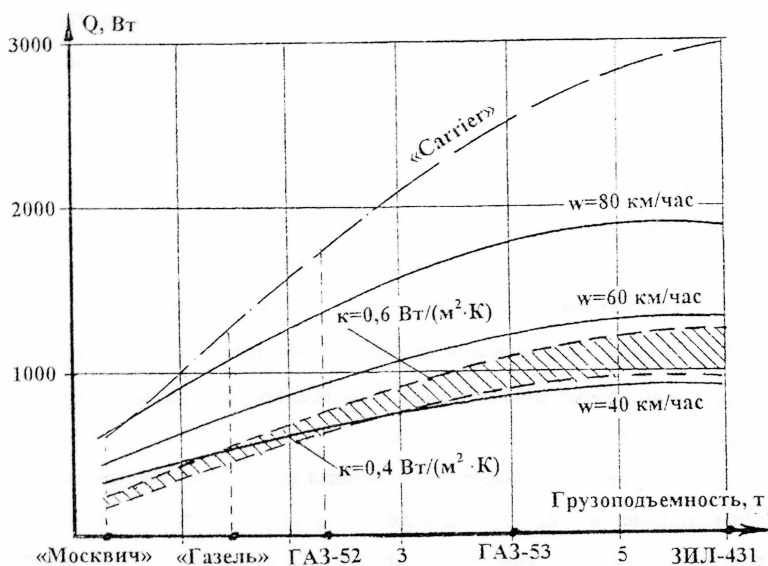


Рис.1. Соотношение между холодопроизводительностью и теплопритоками в кузова

Теплоприток через изоляцию Q , Вт, был определен по формуле 6 при значениях коэффициента теплопередачи $k = 0,4$ и $0,6$ Вт/(м²·К)

$$Q = k \cdot F_{cp} \cdot (t_{o.c.} - t_x) \cdot 1,75, \quad (6)$$

где 1,75 - принятый коэффициент запаса, учитывающий факт открывания дверей, старение изоляции и т.п.

Заштрихованная область на рисунке 1 - необходимая холодопроизводительность (теплоприток в изотермический кузов), а сплошные линии соответствуют располагаемой холодопроизводительности при указанных скоростях. Можно сделать вывод, что при скорости движения 40 км/ч располагаемой холодопроизводительности будет достаточно для автомобилей «Москвич» и «Газель». Однако уже при скорости 60 км/ч, что возможно для городского режима движения, величины Q_x достаточно для всех типов рассмотренных авторефрижераторов, кроме ГАЗ-53 и ЗИЛ-431. При скорости 80 км/ч располагаемой холодопроизводительности,

вырабатываемой ПБХУ, вполне достаточно, чтобы компенсировать теплопритоки всех типов автомобилей, в том числе и большегрузных.

Важным эксплуатационным параметром установки, зависящим от многих факторов, является время выхода на режим ПБХУ. Был рассмотрен процесс выхода на режим охлаждения ($t_k=0^\circ \text{C}$) холодильной установки и теплоизоляции изотермического кузова отдельно.

В процессе захлаживания ПБХУ температура всех элементов установки понижается от температуры окружающей среды до их значений на расчетном режиме. При этом установка должна вырабатывать избыточное количество холода по сравнению с установившимся режимом. Это превышение будет тем значительнее, чем короче длительность пускового периода.

Время выхода на режим регенеративного теплообменника было определено после решения

системы

уравнений

$$\begin{cases} G_{\text{ж}} C_{\text{ж}} (T_{\text{ж}}^{\text{вх}} - T_{\text{ж}}^{\text{вых}}) = \alpha_{\text{ж}} \Pi_{\text{ж}} L (\bar{T}_{\text{ст}} - \bar{T}_{\text{ж}}) \\ S_{\text{ст}} C_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} \frac{d\bar{T}_{\text{ст}}}{d\tau} = \alpha_{\text{ж}} \Pi_{\text{ж}} (\bar{T}_{\text{ж}} - \bar{T}_{\text{ст}}) + \alpha_{\text{п}} \Pi_{\text{п}} (\bar{T}_{\text{п}} - \bar{T}_{\text{ст}}) \\ -G_{\text{п}} C_{\text{п}} (T_{\text{п}}^{\text{вх}} - T_{\text{п}}^{\text{вых}}) = \alpha_{\text{п}} \Pi_{\text{п}} L (\bar{T}_{\text{ст}} - \bar{T}_{\text{п}}) \\ \bar{T}_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{ж}}^{\text{вх}} + T_{\text{ж}}^{\text{вых}}}{2} \\ \bar{T}_{\text{п}} = \frac{T_{\text{п}}^{\text{вх}} + T_{\text{п}}^{\text{вых}}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Где индекс ж относится к потоку жидкости, п – пара, а индекс ст относится к стенке, разделяющей потоки.

Время выхода ПБХУ на режим τ составило около одного часа, что было подтверждено испытаниями первого варианта ПБХУ авторефрижератора.

Длительность стабилизации теплового потока через изоляцию (при стационарном распределении температур в слое изоляции от $t_{\text{в.с.}}$ до t_k) может достигать нескольких часов в зависимости от начальных условий, причем на захлаживание изоляции должна расходоваться значительная часть холодопроизводительности. Для расчета времени стабилизации была использована зависимость, предложенная М.Г. Каганером для плоской стенки

$$q/q_{\text{ст}} = 1 + e^{-\pi Fo}, \quad (8)$$

где $q/q_{\text{ст}}$ – отношение плотности теплового потока через холодную границу к стационарному $q_{\text{ст}}$.

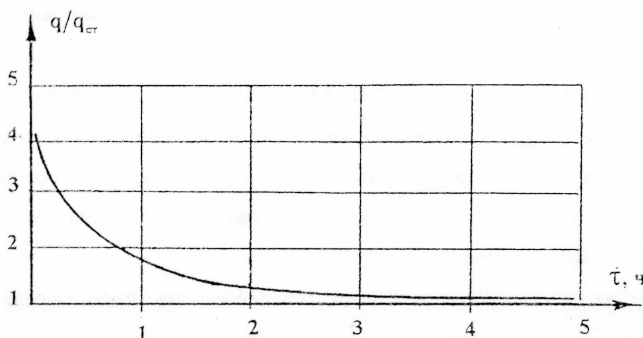


Рис.2. Плотность теплового потока

Эта зависимость для изотермического кузова авторефрижератора «Газель» представлена на рисунке 2. Для толщины слоя изоляции $\delta = 0,1\text{м}$ при значении коэффициента температуропроводности $a = 2,84 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (для пенополиуретана ППУ) число Фурье $Fo = 0,1$ соответствует времени $\tau \cong 1 \text{ час.}$. Отношению $q/q_{\text{ст}} \cong 1,1$ соответствует число $Fo = 0,23$, т.е. через 2,3 часа тепловой поток на 10% отличается от стационарного. Это время также было подтверждено в результате дорожных испытаний авторефрижератора.

Холодильная система авторефрижератора имеет недостаток, который заключается в недоиспользовании потенциала низкой температуры испарения смеси после дросселирования (около $-30 \dots -20 \text{ }^\circ\text{C}$), а температура кузова t_k в пределах $0 \dots +12 \text{ }^\circ\text{C}$ (для авторефрижераторов класса А по европейской классификации). Для устранения этого недостатка была предложена схема с фазовым разделением смеси и двойным дросселированием (см. рис.3), которая позволяет осуществить охлаждение при двух уровнях температуры. Например, в авторефрижераторах с охлаждаемым кузовом и низкотемпературной (морозильной) камерой небольшого объема. В основу расчета был заложен тепловой баланс переохладителя, с разностью температур на холодном конце $\Delta t_k = 10^\circ$.

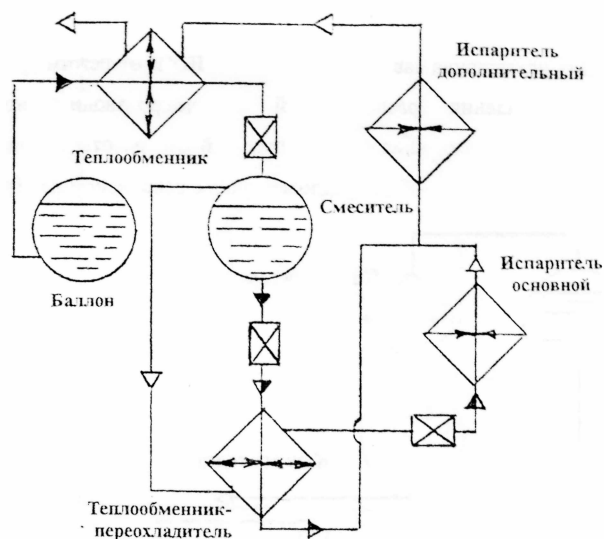


Рис. 3. Схема с двойным дросселированием

Доля холодопроизводительности основного испарителя определяется как $Q_{осн}/Q_{\Sigma}$, где $Q_{\Sigma} = Q_{осн} + Q_{доп}$. На рис. 4 представлена доля $Q_{осн}$ в зависимости от мольной доли пропана и температуры окружающей среды $t_{о.с.}$, так верхняя (пунктирная) граница заштрихованной зоны соответствует температуре $t_{о.с.} = 0^{\circ}\text{C}$, а верхняя - $t_{о.с.} = +30^{\circ}\text{C}$. На перераспределение тепловой нагрузки между двумя испарителями можно повлиять изменением промежуточного давления.

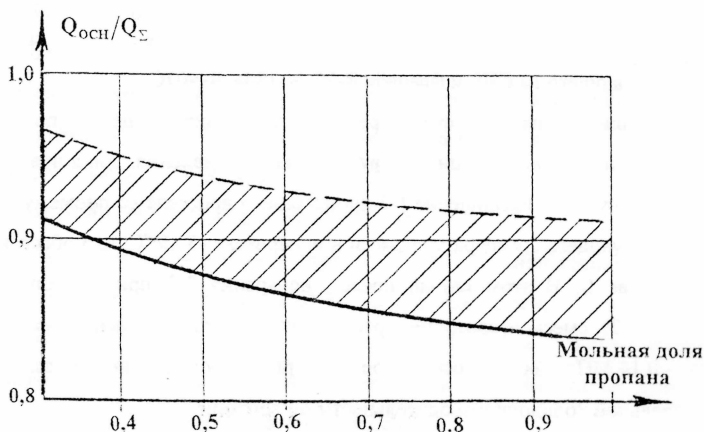


Рис.4. Доля тепловой нагрузки основного испарителя

Для исключения зависимости работы ПБХУ от режима работы двигателя, а также для повышения располагаемой холодопроизводительности во время предварительного захлаживания кузова перед рейсом, работы холодильной установки при выключенном двигателе – был предложен цикл с реконденсацией (рис. 5).

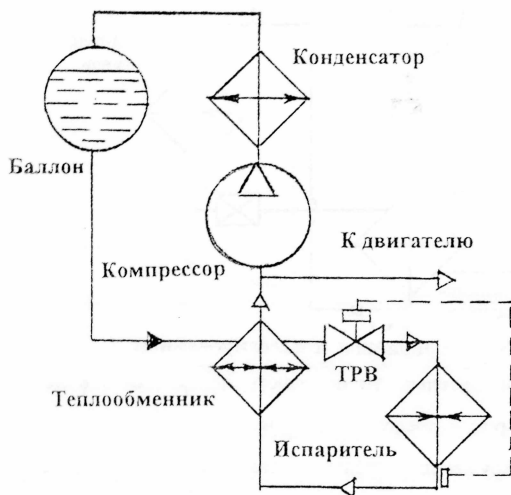


Рис.5. Схема цикла с реконденсацией

Расчет цикла предполагал определение основных параметров цикла, в том числе холодильного коэффициента в зависимости от низкого давления в цикле P_1 . Для $P_1 \approx 0,1 \dots 0,2$ МПа холодильный коэффициент равен $4,0 \dots 4,2$. Проведено сравнение данного цикла, работающего на СНГ и фреонах R-22, R-134a, R-407C,

Дальнейшим развитием схемы разомкнутого цикла с целью повышения холодопроизводительности является цикл с двумя уровнями давления. Цикл представлен в P-i диаграмме на рисунке 6. Расширение 1-2 происходит в дросселе до промежуточного давления, соответствующего температуре смеси в испарителе $-5 \dots 0$ °C, что обеспечивает температуру в кузове t_k . В этом случае после испарения 2-3 при давлении $P_2=P_3$ (состояние в точке 3) смесь изотропно расширяется с этого давления до низкого давления цикла - 0,14 МПа. Теоретически такое расширение даст состояние смеси в точке 6. Увеличение удельной холодопроизводительности Δq составит

$$\Delta q = i_5 - i_6. \quad (9)$$

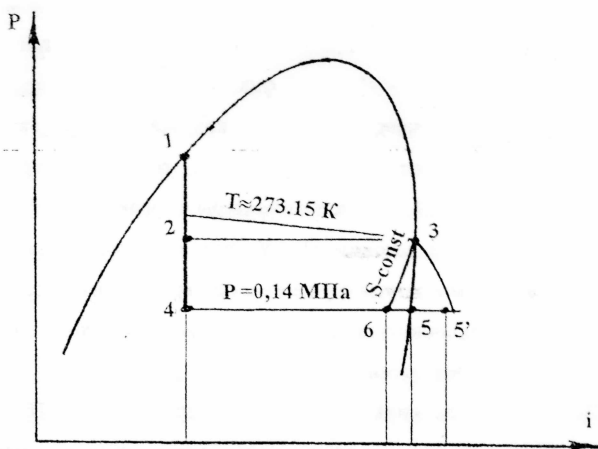


Рис. 6. Цикл с адиабатным расширением

Относительное увеличение удельной холодопроизводительности $\Delta q/q_0$ в зависимости от состава смеси (пять составов) и температуры окружающей среды в диапазоне $+15...+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ имело величину от 10 до 16 %.

В третьей главе приведены результаты дорожных испытаний двух вариантов авторефрижераторов с различными модификациями ПБХУ. Первый авторефрижератор был создан на заводе “Псковавто” на базе автомобиля “Газель”. Кузов выполнен цельнометаллическим в виде микроавтобуса. Теплоизоляция из листов пенополиуретана укладывалась между обшивками кузова. В задней части кузова находилась одностворчатая дверь, в передней - технологический отсек размером 0,3 м по всей ширине кузова. В отсеке располагался ресивер, необходимый для выравнивания давления перед двигателем после ПБХУ, внутри ресивера - регенеративный теплообменник типа “труба в трубе”. В этом же отсеке находилась и измерительная аппаратура. Дросселем в первом варианте ПБХУ служили капиллярные трубки. С целью обеспечения расхода через ПБХУ на разных режимах работы двигателя были предусмотрены три контура, по три капиллярные трубки в каждом. Включение контуров производилось с помощью электроклапанов в зависимости от давления в ресивере. Воздухоохладители обдувались вентиляторами.

Проведено 10 циклов испытаний общей длительностью 38 часов. Суммарный пробег авторефрижератора составил 1597 км. В ходе испытаний через определенные промежутки времени (5 – 10 мин) фиксировались параметры движения: скорость, пройденное расстояние, частота вращения коленчатого вала двигателя; производились замеры температуры воздуха в нескольких точках изотермического кузова (по поверхности стен и пола), а также температуры в характерных точках ПБХУ. Замерялось давление газа на входе и выходе из ПБХУ. Расход газа измерялся весовым способом.

Замер температуры осуществлялся термометрами сопротивления с точностью 0,1К. В качестве вторичного прибора использовался многоканальный преобразователь с цифровой индикацией показаний.

Дорожные испытания показали работоспособность ПБХУ на всех режимах движения. Было выявлено, что температуры боковых стенок камеры и циркулирующего воздуха практически одинаковы ($\Delta t \leq 2^\circ$), а средняя разность температур воздуха на входе в воздухоохладитель и выходе из него (охлаждение воздуха) составляет 2,5...4⁰С. При скорости 80 км/ч интенсивность охлаждения кузова составляет ~10 град/ч, а при скорости 60 км/ч ~5,5 град/ч.

По результатам испытаний первой модели авторефрижератора были внесены изменения в конструкцию ПБХУ: из состава ПБХУ исключен теплообменник, т.к. время выхода теплообменника на стационарный режим работы порой превышал время одного рейса. Была рекомендована компоновка с кунгом - изотермического кузова в виде ящика. Была принята конструкция воздухоохладителей, исключаящая соединения на пайке. Капиллярное дроссельное устройство со ступенчатой регулировкой расхода было заменено специально спроектированным редуктором, который обеспечивал необходимый расход газа независимо от давления в баллоне, что позволило отказаться от ресивера. В процессе дорожных испытаний отмечалась устойчивая работа ПБХУ и двигателя автомобиля.

Проведенные испытания подтвердили возможность создания малотоннажных рефрижераторов с ПБХУ. Использование сжиженного газа пропан-бутан в качестве моторного топлива и хладагента, позволяет повысить экономичность авторефрижератора, снизить стоимость его изготовления и эксплуатации.

В третьей главе освещено также решение вопроса безопасной эксплуатации ПБХУ.

Основные выводы

1. Выполнен анализ зависимости удельной холодопроизводительности и минимальной температуры охлаждения в разомкнутом цикле, работающем на многокомпонентной смеси, от состава смеси и температуры окружающей среды. Изменение холодопроизводительности практически не зависит от взаимной концентрации компонентов СНГ, но температура после дросселирования $t_{\min}$ изменяется в зависимости от содержания высоко- и низкокипящих компонентов в широких пределах (от -34° до -10°C) со слабой зависимостью от $t_{\text{с.с.}}$.

2. Применение регенерации в цикле увеличивает удельную холодопроизводительность на 10-15% в зависимости от температуры окружающей среды. Анализ времени выхода на режим показал, что регенеративный теплообменник выходит на режим около одного часа. Теплоизоляция кузова захлаживается три часа. При работе авторефрижератора в короткоцикловом режиме (1...2 часа) в схеме ПБХУ можно отказаться от регенеративного теплообменника.

3. Анализ области рационального применения холодильных установок показал, что при скорости движения 60 км/ч и более величины располагаемой холодопроизводительности, вырабатываемой ПБХУ, достаточно, чтобы компенсировать теплопритоки в изотермический кузов для всех рассмотренных типов российских автомобилей.

4. Предложены различные варианты схемы холодильной установки : двухуровневое охлаждение с разделением фаз с целью лучшего использования потенциала низкой температуры испарения смеси после дросселирования (около $-30...-20^{\circ}\text{C}$); цикл с реконденсацией, который позволяет исключить зависимость работы ПБХУ от режима работы двигателя, и цикл с адиабатным расширением, реализация которого даст увеличение удельной холодопроизводительности на 10–15%. Дана методика расчета этих циклов.

5. Экспериментальное исследование подтвердило работоспособность авторефрижератора. Температура в изотермическом кузове на стационарном режиме работы составляла $0...+4^{\circ}\text{C}$ (минимальная температура составила -12°C). Проведено согласование работы двигателя и ПБХУ при избыточном давлении после редуктора ПБХУ 0,04 МПа. Составлена принципиальная электрическая схема ПБХУ. Выбрана оптимальная конструкция изотермического кузова в форме кунга.

1 Малотоннажный рефрижератор с холодильной установкой нового типа /А.А. Жердев, С.Д. Глухов, В.П. Леонов и др. //Холодильное дело.-1997.- №1.- С.31-32.

2. Новые подходы к задачам охлаждения и термостатирования продуктов при их перевозке / А.М. Архаров, В.Н. Богаченко, В.П. Леонов и др. // Вестник МГТУ.-1998.- Специальный выпуск.-С.11-23.

3. Малотоннажный авторефрижератор/В.Н. Богаченко, В.П. Леонов, В.В. Лубенец и др. //Холодильная техника России. Состояние и перспективы накануне XXI века: Тез. докл. Международи. конф. – С.-Пб, 1998.-С.70.

4. Положительное решение №97121068/06 (023127) от 02.03.98. Устройство для охлаждения термозолированного кузова авторефрижератора / А.М. Архаров, В.Н. Богаченко, А.А. Глухов, А.А. Жердев, В.П. Леонов, В.В. Лубенец, С.В. Смирнов.

5 New Approaches to Cooling and Thermostatic Control of Goods at Transportation / . А.М. Arkharov, А.А. Zherdev, V.P. Leonov// 20th Internftional Congress of Refrigeration, IIR/IIF.- Sydney, 1999.- P.56.