

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени ИСЛАМА КАРИМОВА**

ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ГАФУРОВ ШЕРЗОД ДИЛШАДОВИЧ

**Численное исследование свойств хладагентов и
характеристики холодильных машин**

**5A320303 - «Машины и агрегаты холодильной и криогенной техники,
систем кондиционирования»**

Кафедра: «Холодильная и криогенная техника»

Диссертация

на соискателя академической степени магистр

Руководитель: Доц. д.т.н. Каримов К.Ф.

Ташкент – 2017 г.

Оглавление

Условные обозначения	3
Введение	5
Глава 1. Применение различных рабочих веществ в холодильной технике	9
1.1. Общее состояние вопроса	9
1.2 Хладагенты групп ХФУ и ГХФУ	12
1.3 Альтернативные однокомпонентные хладагенты	14
Глава 2. Расчет свойств альтернативных хладагентов.....	26
2.1. Термодинамические свойства однокомпонентных хладагентов	26
2.2. Свойства смесей углеводородных газов	36
Глава 3. Характеристики холодильных машин работающих на альтернативных хладагентах	50
3.1. Тепловой расчет двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением.....	50
3.2. Тепловой расчет двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением.....	55
3.3. Эксергетический анализ двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением.....	61
3.4. Эксергетический анализ двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением.....	63
Заключение	66
Список использованной литературы.....	67

Условные обозначения

t_0 - температура кипения холодильного агента, °C;

T_0 - температура кипения холодильного агента, K;

t_k - температура конденсации холодильного агента, °C;

T_k - температура конденсации холодильного агента, K;

$T_{кр}$ —критическая температура, K;

P - давление, паскаль;

$P_{кр}$ – критическое давление, паскаль;

i - удельная энтальпия, кДж/кг;

l - работа цикла, кДж/кг;

S – удельная энтропия, кДж/кг·K;

ν – удельный объём, м³/кг;

ρ – плотность, кг/м³;

$\rho_{кр}$ – критическая плотность, кг/м³;

q_0 – удельная холодопроизводительность; кДж/кг;

ε – холодильный коэффициент;

$Ri, P_\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ - критерии подобия;

y_i – мольные концентрации;

x_b^0 и x_6^0 - содержание в жидкой смеси вещества в мольных долях;

G_a —массовый расход, кг/с;

Q_0 – холодопроизводительность, кВт;

Индексы:

1,2... - параметры в точках холодильного цикла;

0 – параметры кипения;

к – параметры конденсации;

R32 – параметр для R32;

ODP – озоноразрушающий потенциал;

GWP – потенциал глобального потепления;

Примечание. Остальные условные обозначения и другие единицы измерения приведены по тексту.

Введение

Одним из важнейших требований при разработке новой техники в области холодильного оборудования, является обеспечение ее экологической безопасности. Это требование конкретизируется в виде отказа от применения экологически вредных (опасных) холодильных агентов – озоноразрушающих веществ (ОРВ), имеющих высокие показания озоноразрушающего потенциала, относящихся к группе "парниковых газов". Данные газы обладают высокими показателями нанесения урона озоновому слою, такие как: хлорфторуглероды (ХФУ), гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), галоны, гидробромфторуглероды (ГБФУ), бромхлорметан, 1,1,1-трихлорэтан (метилхлороформ), четыреххлористый углерод (ЧХУ), бромистый метил.[12,13]

Глобальное потепление климата на планете способствовало выработке жестких рекомендаций и требований по регулированию производства и потреблению данных веществ. Этот вопрос решается в мировом масштабе путем принятия и реализации, странами требований соответствующих международных документов: "Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой" (1987 г.) и "Киотский протокол" к "Рамочной конференции ООН об изменении климата" (1997 г.)[5-8]. Республика Узбекистан, являясь Стороной-Участником обоих международных документов, поэтапно сокращает, переводит, холодильную технику, которая в течении многих десятков лет работала и продолжает работать на Фреон R 12 и прочих альтернативных хладагентах. Республика Узбекистан ведет техническую политику, направленную на сокращение эмиссии парниковых газов, к которым относятся и многие применяемые сегодня синтетические холодильные агенты [1-4,9-11]

Другим важнейшим требованием для новой техники является обеспечение ее высокой энергетической эффективности, которое имеет также и экологическую сторону, так как снижение потребления

электроэнергии уменьшает эмиссию в атмосферу углекислого газа при ее выработке. Холодильники и морозильники - самые крупные потребители электроэнергии - на их долю приходится около 30% потребляемой электроэнергии всеми электробытовыми машинами и приборами. Так в США на холодильники и морозильники приходится более 30%, в Японии - 24%, в Германии - 23% потребляемой энергии бытовыми приборами. Поэтому снижение расхода электроэнергии является одной из наиболее важных задач, хотя современный холодильник в среднем на 33% экономичнее моделей 70-х годов. Требование энергосбережения регламентируется во всем мире и в Республике Узбекистан.[14-17]

Для применения альтернативных [18] веществ в производстве новой техники и сервисе эксплуатируемого парка холодильного оборудования необходимо иметь достаточно большой объем информации о термодинамических свойствах этих веществ, их взаимодействии с другими материалами и веществами в холодильной машине, а также данные о санитарно-гигиенических свойствах и т.д. Эти сведения не всегда имеются для предлагаемых на рынке веществ.

Используя термодинамические свойства[18-19] и варьируя в широких пределах состав зеотропных смесей,[20-23] можно получить свойства рабочего вещества, которые обеспечат наибольшую эффективность холодильной машины.

Для расчета свойств многокомпонентных зеотропных смесей используется различные приближенные методики[24-29].

Немаловажными факторами успешного внедрения новых хладагентов являются также наличие отечественного производства как самих веществ, так и компрессоров, предназначенных для работы на них, и возможность экспорта холодильной техники, работающей на таких веществах.

Таким образом, задача выбора экологически безопасного и энергетически высокоэффективного холодильного агента для холодильных

машин является крайне актуальной в целях обеспечения их высокого технического уровня и конкурентоспособности как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

Исходя из выше сказанного в настоящем исследовании поставлены цели:

1. Использование расчетно-теоретической базы, определения теплофизических свойств зеотропных смесей хладагентов.
2. Получение теоретических данных по энергетической характеристике холодильных машин, работающих на экологически безопасных хладагентах.

Ход исследования и структура диссертационной работы определили поставленные задачи:

1. Подобрать зеотропную смесь, которая удовлетворяет требованиям, предъявляемым к хладагентам последнего поколения, с низким значением потенциала глобального потепления (GWP) и с нулевым значением потенциала истощения озонового слоя (ODP).
2. Используя "базовую систему обобщенных уравнений для расчета и прогнозирования термодинамических свойств хладагентов" рассчитать термодинамические свойства выбранных однокомпонентных хладагентов. Сравнить полученные данные с данными экспериментальными.
3. Рассчитать термодинамические свойства двухкомпонентной зеотропной смеси используя правило аддитивности по диаграммам состояния определить давление насыщения, энтальпию жидкости и пара и критические параметры чистых компонентов.
4. Определить характеристики холодильной машины, работающей на смеси пропан-бутан (40/60 %).

Научная новизна результатов.

1. Рассчитать теплофизические свойства углеводородной смеси пропан-бутан состава 40/60 % на базе "базовой системы обобщенных

уравнений для расчета и прогнозирования термодинамических свойств хладагентов”.

2. Получены энергетические характеристики 2-х ступенчатых холодильных машин работающих на хладагенте пропан-бутан (40/60 %).

Глава 1. Применение различных рабочих веществ в холодильной технике

1.1. Общее состояние вопроса

Монреальским Протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой (в рамках Венской Конвенции об охране окружающей среды), введены ограничения на производство и использование озоноразрушающих веществ, а также всей продукции с этими веществами.

К озоноразрушающим веществам относятся наиболее распространенные в холодильной технике хладагенты. Их разрушающая активность определяется наличием атомов хлора в молекуле и оценивается потенциалом разрушения озона ODP.

По степени озоноразрушающей активности хладагенты делятся на две группы:

- хладагенты с высокой озоноразрушающей активностью ($ODP > 1,0$) - это хлорфторуглероды ХФУ
- хладагенты с низкой озоноразрушающей активностью ($ODP < 0,1$) - это гидрохлорфторуглероды ГХФУ

Монреальским Протоколом запрещено использование всех озоноразрушающих хладагентов группы ХФУ с 1 января 1996 г. В связи с этим запретом во всем мире увеличилось производство ГХФУ. Но все равно эта мера являлась поэтапной. Для хладагентов группы ГХФУ установлены более отдаленные сроки сокращения их производства и использования с 2005 года и полный запрет с 2020 года. Это определило пути современного развития холодильной техники на многие годы. В основе лежит поэтапный перевод всего холодильного оборудования на озоноразрушающие хладагенты[30-36].

На первом этапе (переходный период) наряду с заменой хладагентов ХФУ озоноразрушающими (HFC, FC) допускается замена их хладагентами ГХФУ, которые названы переходными. Альтернативные хладагенты

ГХФУ с низким потенциалом ODP не являются полностью озонобезопасными, однако в переходный период их разрешенного легального использовать все выпускаемое и действующее холодильное оборудование на ГХФУ (например, R22). Хладагенты группы ГХФУ условно можно считать озонобезопасным.

В связи с изменением климата на планете, во всем мире остро стоит вопрос выбора возможных альтернатив использования хладагентов группы ГХФУ для действующего и нового холодильного оборудования. Отличительной чертой которых должна быть ограничения эмиссии парниковых газов. Ниже приведены основные требования, предъявляемые к хладагентам:[37,38]

1. Экологические - близкий к нулю озоноразрушающий потенциал, низкий потенциал глобального потепления, нетоксичность и негорючесть. Хладагент должен соответствовать современным требованиям по защите и сохранению окружающей среды, а также обеспечивать безопасность человека[37-40].

2. Термодинамические - невысокое давление конденсации; большая объемная холодо- и теплопроизводительность; низкая температура кипения при атмосферном давлении; хорошая теплопроводность; малые плотность и вязкость хладагента; максимальное соответствие уровней заменяемого и альтернативного хладагентов по давлениям, температурам, удельной объемной холодо- и теплопроизводительности[41].

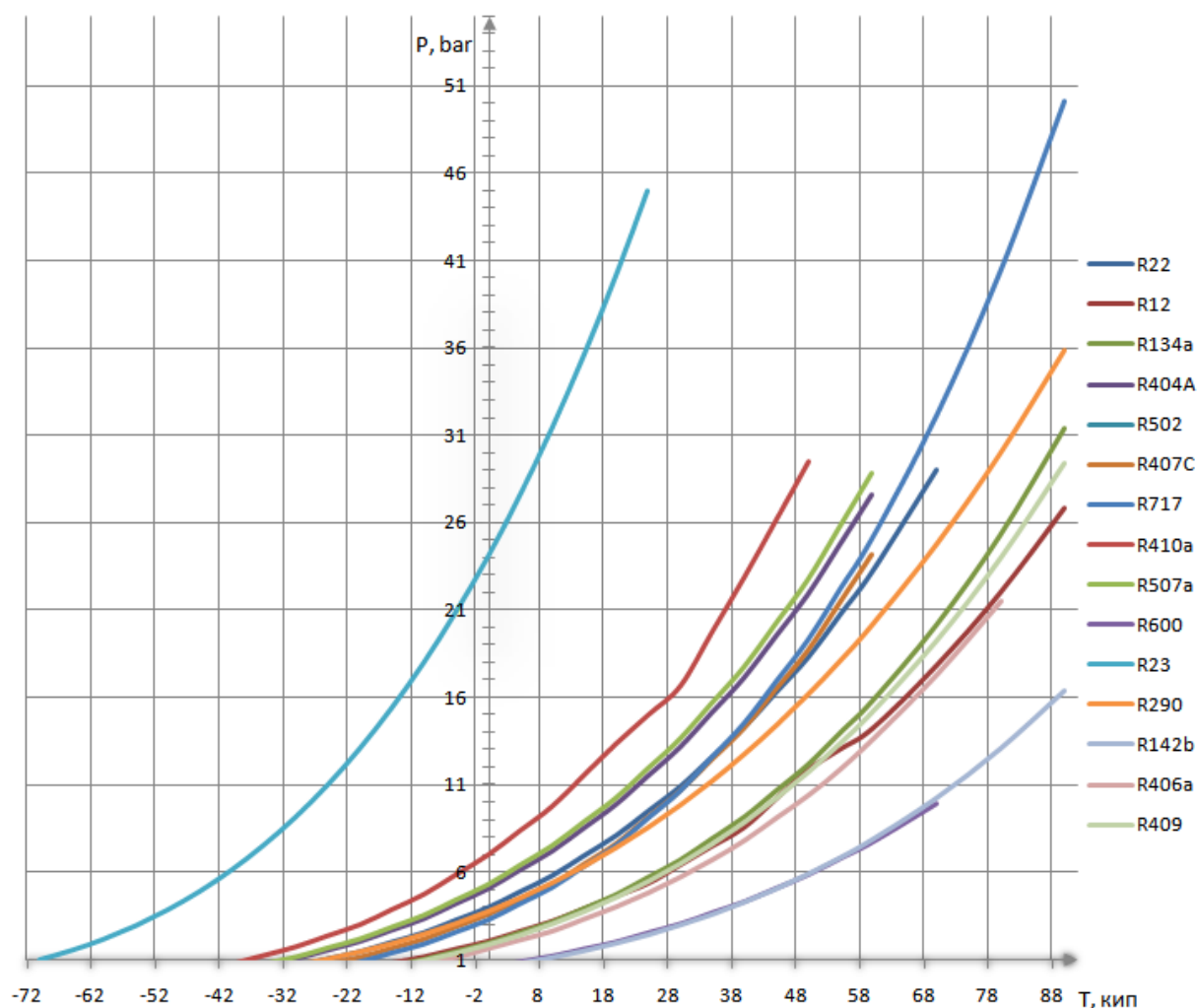


Рис.1. Зависимость температуры кипения фреонов от давления

3. Эксплуатационные - Минимальные затраты на изменение конструкции холодильного оборудования; наименьший расход энергии; негорючесть и невзрывоопасность; способность растворять воду, незначительная текучесть; наличие запаха, цвет и т.д[42].

4. Экономические - наличие промышленного производства, доступные цены[43-45].

Хладагенты отвечающие всем указанным требованиям во всем диапазоне температур кипения и конденсации, найти практически невозможно, поэтому в каждом отдельном случае выбирают хладагент с учетом конкретных условий работы холодильной машины удовлетворяющие лишь наиболее важные условия.

1.2 Хладагенты групп ХФУ и ГХФУ

Хладагент R12. Дифтордихлорметан относится к группе ХФУ (CFC). Характеризуется высоким потенциалом разрушения озона ($ODP = 1$) и большим потенциалом глобального потепления ($GWP = 8500$). Бесцветный газ со специфическим запахом, в 4,18 раза тяжелее воздуха. Один из наиболее распространенных и безопасных при эксплуатации хладагентов. Обезвоженный R12 нейтрален ко всем металлам. Характеризуется повышенной текучестью, что способствует проникновению его через мельчайшие неплотности и даже через поры обычного чугуна. В то же время благодаря повышенной текучести R12 холодильные масла проникают во все трущиеся детали, снижая их износ. Поскольку R12 хороший растворитель многих органических веществ, при изготовлении прокладок применяют специальную резину - севанит или паронит. В холодильной технике R12 широко применяли для получения средних температур.

Хладагент R11. Фтортрихлорметан, тяжелый газ (в 4,74 раза тяжелее воздуха), относится к группе ХФУ (CFC). Характеризуется высокой озоноразрушающей активностью ($ODP = 1$). Согласно Монреальскому протоколу с 1 января 1996 г. прекращено производство R11 (Копенгаген, 1992г.). Для организма человека R11 безвреден, он невзрывоопасен, неограниченно растворяется в минеральном масле. В воде R11 нерастворим, допустимая массовая доля влаги не более 0,0025%. Обезвоженный хладагент нейтрален ко всем металлам, за исключением сплавов, содержащих более 20% магния. Нормальная температура кипения 23,8 °C. Объемная холодопроизводительность R11 мала; применяют его в холодильных машинах при температуре кипения до -20 °C. Хладагент R11 широко применяли в промышленных кондиционерах, турбокомпрессорах средних и больших мощностей.

Хладагент R502. Азеотропная смесь хладагентов R22 и R115. Массовая доля R22 составляет 48,8%, а R115 - 51,2%. Относится к группе

ХФУ (CFC), имеет следующие экологические характеристики: $ODP = 0,33$; $GWP = 4300$. Невзрывоопасен, малотоксичен и химически инертен к металлам. Растворимость R502 в маслах, коэффициент теплоотдачи при кипении и конденсации близки к соответствующим значениям для R22. Характерная особенность: R502 малорастворим в воде. Объемная холодопроизводительность его выше, а температура нагнетания ниже примерно на 20°C , чем у R22, что положительно сказывается на температуре обмотки электродвигателя при эксплуатации герметичного холодильного компрессора. Хладагент R502 широко применяли в низкотемпературных компрессионных холодильных установках.

Хладагент R22. Дифторхлорметан относится к группе ГХФУ (HCFC). Имеет низкий потенциал разрушения озона ($ODP = 0,05$), невысокий потенциал парникового эффекта ($GWP = 1700$), т. е. экологические свойства R22 значительно лучше, чем у R12 и R502. Это бесцветный газ со слабым запахом хлороформа, более ядовит, чем R12, невзрывоопасен и негорюч. По сравнению с R12 хладагент R22 хуже растворяется в масле, но легко проникает через неплотности и нейтрален к металлам. Для R22 холодильной промышленностью выпускаются холодильные масла хорошего качества. Хладагент R22 слабо растворяется в воде. Коэффициент теплоотдачи при кипении и конденсации на 25...30% выше, чем у R12, однако R22 имеет более высокие давление конденсации и температуру нагнетания (в холодильных машинах). Этот хладагент широко применяют для получения низких температур в холодильных компрессионных установках, в системах кондиционирования и тепловых насосах. В холодильных установках, работающих на R22, необходимо использовать минеральные или алкилбензольные масла. Нельзя смешивать R22 с R12 - образуется азеотропная смесь.

По энергетической эффективности R502 и R22 достаточно близки. Холодильную установку, использующую в качестве рабочего тела R502, можно адаптировать к применению R22. Однако, как отмечалось ранее,

R22 имеет более высокое давление насыщенных паров и, как следствие, более высокую температуру нагнетания.

Хладагент R123. Относится к группе ГХФУ (HCFC). Температура кипения при атмосферных условиях 27,9 °С. Потенциал разрушения озона $ODP = 0,02$, потенциал глобального потепления $GWP = 90$. Хладагент предназначен для ретрофита (замена хладагента на озонобезопасный) холодильных установок - водоохладителей, работающих на R11. Теоретическая холодопроизводительность цикла с R123 составляет 0,86 относительно холодопроизводительности цикла с R11, температура и давление конденсации ниже на 10...15% по сравнению с R11. В сочетании с R123 рекомендуется использовать алкилбензольное холодильное масло или смесь минерального и алкилбензольного.

Хладагент R13. Хладон - 13 (ТРИФТОРХЛОРМЕТАН, CF_3Cl , CFC - 13, R13) Хладон - 13 Бесцветный газ со слабым запахом тетрахлорметана. Хладон - 13 Хладагент высокого давления в технике средних и низких температур. $ODP=1$; $GWP=11700$. При соприкосновении с пламенем разлагается с образованием высокотоксичных продуктов. Негорючий газ.

1.3 Альтернативные однокомпонентные хладагенты

Хладагент R717. Химическая формула NH_3 (аммиак). Относится к группе ГФУ (HFC). Из «натуральных» хладагентов R717 стоит на одном из первых мест в качестве альтернативы R22 и R502. Производство аммиака в мире достигает 120 млн. тонн, и лишь малая часть его (до 5%) используется в холодильной технике.

Аммиак не разрушает озоновый слой ($ODP = 0$) и не вносит прямого вклада в увеличение парникового эффекта ($GWP = 0$). Газ с резким удушливым запахом, вредный для организма человека. Предельно допустимая концентрация в воздухе 0,02 мг/дм³, что соответствует объемной доле его 0,0028 %. В соединении с воздухом при объемной доле

16...26,8% и наличии открытого пламени аммиак взрывоопасен. Температура воспламенения с воздухом 651 °С.

Пары аммиака легче воздуха, он хорошо растворяется в воде (один объем воды может растворить 700 объемов аммиака, что исключает замерзание влаги в системе). Минеральные масла аммиак почти не растворяет. На черные металлы, алюминий и фосфористую бронзу не действует, однако в присутствии влаги разрушает цветные металлы (цинк, медь и ее сплавы). Массовая доля влаги в аммиаке не должна превышать 0,2 %.

По термодинамическим свойствам аммиак — один из лучших хладагентов: по объемной холодопроизводительности он значительно превышает R12, R11, R22 и R502, имеет более высокий коэффициент теплоотдачи, что позволяет применять в теплообменных аппаратах трубы меньшего диаметра при заданной холодопроизводительности. Из-за резкого запаха аммиака появление течи в холодильной системе легко обнаруживается обслуживающим персоналом. Именно по этим причинам R717 нашел широкое применение в крупных холодильных установках. Хладагент R717 имеет низкую стоимость.

Один из недостатков аммиака — более высокое значение показателя адиабаты (1,31) по сравнению с R22 (1,18) и R12 (1,14), что приводит к значительному увеличению температуры нагнетания. В связи с этим предъявляют жесткие требования к термической стабильности холодильных масел, используемых в сочетании с аммиаком в течение длительного времени при эксплуатации установки. Конденсатор должен иметь развитую поверхность теплообмена, в результате чего возрастает его металлоемкость.

Аммиак имеет чрезвычайно высокое значение теплоты парообразования, вследствие чего сравнительно мал массовый расход циркулирующего хладагента (13...15% по сравнению с R22). Это благоприятное качество для крупных холодильных установок, но

затрудняет регулировку подачи аммиака в испаритель при малых мощностях.

Дополнительные сложности при создании холодильного оборудования вызывает высокая активность аммиака по отношению к меди и медным сплавам, поэтому трубопроводы, теплообменники и арматуру выполняют из стали. Из-за высокой токсичности и горючести аммиака сварные соединения тщательно контролируют. Вследствие высокой электропроводности R717 затруднено создание полугерметичных и герметичных компрессоров. Вместе с тем для промышленных холодильных установок мощностью более 20 кВт аммиак — лучшая альтернатива.

На аммиаке работают многие тепловые насосы. Так, в Норвегии работает тепловой насос мощностью 200 кВт. В системе циркулирует около 30 кг аммиака, использованы полугерметичный компрессор и пластинчатые теплообменные аппараты. Предусмотрены система контроля утечки аммиака и эффективная вентиляция.

Аммиачные водяные охладители-чиллеры с пластинчатыми аппаратами фирмы «Alfa-Laval», разработанные фирмой «YorkRefrigeration», характеризуются минимальным количеством заправленного хладагента. Так, в высокотемпературных охладителях HTLS заправка хладагента составляет 3,7...8,5 кг при холодопроизводительности соответственно 60...140 кВт и потребляемой мощности 14...35 кВт, в среднетемпературных MTLS — 3,1...6 кг при холодопроизводительности 32...63 кВт и потребляемой мощности 12...24 кВт, в низкотемпературных LTLS — 2,6...4,5 кг при холодопроизводительности 9...19 кВт и потребляемой мощности 7...17 кВт. В тепловых насосах типа HPLS заправка хладагента равна 3...6,7 кг при холодопроизводительности соответственно 37...87 кВт и потребляемой мощности 12...31 кВт.

Рассмотренные охладители и тепловые насосы имеют небольшие габаритные размеры (длина 1170 мм, ширина 800 мм, высота 1550 мм).

Ожидается применение аммиака в малых холодильных машинах для коммерческих установок.

Используемые в настоящее время масла не растворяются в аммиаке, поэтому в схему холодильной машины приходится включать маслоотделители, что увеличивает ее стоимость. В последние годы ведутся интенсивные исследования по разработке растворимого в аммиаке масла и созданию холодильного оборудования с «сухим» испарителем. Растворимость масла в аммиаке исключает образование пленки масла на теплообменных поверхностях, что повышает коэффициент теплоотдачи с 2700 до 9100 Вт/(м² • К).

Достигнутый в последние годы прогресс в разработке растворимых в аммиаке R717 холодильных масел может кардинально изменить тенденции в развитии холодильного машиностроения.

Хладагент R744. Химическая формула CO₂ (диоксид углерода). Относится к группе ГФУ (HFC). Дешевое нетоксичное негорючее и экологически чистое (ODP = 0, GWP= 1) вещество. Стоимость диоксида углерода в 100...120 раз ниже, чем R134a.

Диоксид углерода имеет низкую критическую температуру (31 °С), сравнительно высокую температуру тройной точки (—56 °С), большие давления в тройной точке (более 0,5 МПа) и критическое (7,39 МПа). Может служить альтернативным хладагентом. Содержится в атмосфере и биосфере Земли, имеет следующие преимущества: низкая цена, простое обслуживание, совместимость с минеральными маслами, электроизоляционными и конструкционными материалами. Вместе с тем при использовании диоксида углерода требуется водяное охлаждение конденсатора холодильной машины, увеличивается металлоемкость холодильной установки (по сравнению с металлоемкостью установок, работающих на галоидопроизводных хладагентах). Высокое критическое давление имеет и положительный аспект, связанный с низкой степенью сжатия, вследствие чего эффективность компрессора становится

значительной. Возможны перспективы применения диоксида углерода в низкотемпературных двухкаскадных установках и системах кондиционирования воздуха автомобилей и поездов. Его предлагают использовать также в бытовых холодильниках и тепловых насосах.

Хладагент R728. Химическая формула N_2 . Относится к группе ГФУ (HFC). Жидкий азот применяют в качестве криогенного охлаждающего средства в некоторых странах (Англия, США и др.). При атмосферном давлении температура кипения азота составляет $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, а удельная теплота парообразования 199 кДж/кг . Нетоксичный и экологически чистый ($ODP = 0$, $GWP = 0$) хладагент. Криогенный метод охлаждения жидким азотом предусматривает одноразовое его использование. Этот метод реализуется в безмашинной проточной системе, в которой рабочее вещество не совершает замкнутого кругового процесса.

Хладагент R290. Химическая формула C_3H_8 (пропан). Относится к группе ГФУ (HFC). Потенциал разрушения озона $ODP = 0$, потенциал глобального потепления $GWP = 3$. Характеризуется низкой стоимостью и нетоксичен. При использовании данного хладагента не возникает проблем с выбором конструкционных материалов деталей компрессора, конденсатора и испарителя. Пропан хорошо растворяется в минеральных маслах. Температура кипения при атмосферном давлении $-42,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Преимуществом пропана является также низкая температура на выходе из компрессора. Однако пропан как хладагент имеет два принципиальных недостатка. Во-первых, он пожароопасен, во-вторых, размеры компрессора должны быть больше, чем при использовании в холодильной машине R22 заданной холодопроизводительности.

В промышленных холодильных установках пропан используют уже в течение многих лет. В последние годы все чаще предлагается применять пропан в холодильных транспортных установках.

В Германии в 1994 г. было произведено более 1000 бытовых холодильников на пропане, изобутане или их смесях. Подобные хо-

лодильники изготавливают в Китае, Бразилии, Аргентине, Индии, Турции и Чили. По оценкам создателей этой техники, холодильный коэффициент при использовании углеводородов практически такой же ($\pm 1\%$), как при работе на R12. Требуются только небольшие изменения в конструкции компрессора. Применяются те же минеральные масла, та же электроизоляция, те же уплотняющие материалы, трубы того же диаметра, практически не изменяется процедура сервисного обслуживания. Температура нагнетания становится ниже, чем при работе на R22 или R502. Пропан можно сразу заправить в систему, где до этого был озоноразрушающий хладагент. Как показали исследования, в этом случае теряется до 10 % холодопроизводительности, если в системе ранее был R22, и 15 %, если R502. Ряд специалистов считают, что и этого снижения можно было бы избежать, добавив к пропану полипропилен.

В США же запрещено использовать углеводороды в бытовых холодильниках. Агентство США по охране окружающей среды прогнозирует в случае их применения до 30 000 пожаров в год.

В Новой Зеландии углеводороды разрешено использовать в торговом холодильном оборудовании.

При размещении торгового холодильного оборудования, работающего на пропане, в общедоступных помещениях необходимо соблюдать правила безопасности. В случае превышения указанных норм заправки (более 2,5 кг R290) холодильное оборудование следует устанавливать в отдельном, специально оборудованном помещении, что увеличивает капитальные затраты.

Пропан применяют и в тепловых насосах. В Лиллехаммере (Норвегия) работает тепловой насос на пропане мощностью 45 кВт с полугерметичным компрессором и пластинчатыми теплообменниками. В системе теплового насоса масса пропана чуть больше 1 кг, оборудование находится в отдельном здании. По мнению специалистов, контроль за пожароопасностью возможен.

Хладагент R600a. Химическая формула C_4H_{10} (изобутан). По сравнению с хладагентами R12 и R134a изобутан имеет значительные экологические преимущества. Этот природный газ не разрушает озоновый слой ($ODP = 0$) и не способствует появлению парникового эффекта ($GWP = 0,001$). Масса хладагента, циркулирующего в холодильном агрегате при использовании изобутана, значительно сокращается (примерно на 30 %). Удельная масса изобутана в 2 раза больше удельной массы воздуха — газообразный R600a стелется по земле. Изобутан хорошо растворяется в минеральном масле, имеет более высокий, чем R12, холодильный коэффициент, что уменьшает энергопотребление.

Изобутан горюч [хладагент 3-го класса (It/DIN 8975)], легко воспламеняется и взрывоопасен, но только при соединении с воздухом при объемной доле хладагента 1,3...8,5 %. Нижняя граница взрывоопасности (1,3 %) соответствует 31 г R600a на 1 м³ воздуха; верхняя граница (8,5 %) — 205 г R600a на 1 м³ воздуха. Температура возгорания равна 460 °С.

В настоящее время итальянские и немецкие фирмы применяют R600a в бытовой холодильной технике. В частности, фирмы «Neccicompressor» и «Zanussi» международного концерна «Electroluxcompressors» выпускают компрессоры, работающие на изобутане. Холодильные агрегаты с R600a характеризуются меньшим уровнем шума из-за низкого давления в рабочем контуре хладагента.

Использование изобутана в существующем холодильном оборудовании связано с необходимостью замены компрессоров на компрессоры большей производительности, так как по удельной объемной холодопроизводительности R600a значительно проигрывает хладагенту R12 (практически в два раза).

Хладагент R125. Химическая формула CHF_2CF_3 (пентафтор-этан). Относится к группе ГФУ (HFC), не содержит хлора. Потенциал разрушения озона $ODP = 0$, потенциал глобального потепления $GWP = 860$. Температура кипения при атмосферном давлении —48,1 °С

(приложения 7, 18). Хладагент рекомендуется применять в чистом виде либо в качестве компонента альтернативных смесей для замены R22, R502 и R12. Хладагент R125 непожароопасен. По энергетическим характеристикам и коэффициенту теплоотдачи он проигрывает хладагентам R22 и R502. По сравнению с R502 имеет более крутую кривую, характеризующую зависимость давления насыщенных паров от температуры, низкую критическую температуру и небольшую удельную теплоту парообразования, что приводит к необходимости повышения степени сжатия. В связи с этим возможности применения R125 в холодильном оборудовании, использующем конденсаторы с воздушным охлаждением, весьма ограничены.

Вместе с тем R125 имеет более низкую (по сравнению с R22 и R502) температуру нагнетания и высокий массовый расход при низких давлениях всасывания. Поршневые холодильные компрессоры, работающие на R125, характеризуются оптимальным наполнением цилиндра, а следовательно, имеют большой коэффициент подачи.

Хладагент R134. Химическая формула CF_3CFH_2 (тетрафтор-этан). Молекула R134a имеет меньшие размеры, чем молекула R12, что делает более значительной опасность утечек. Относится к группе ГФУ (HFC). Потенциал разрушения озона $\text{ODP} = 0$, потенциал глобального потепления $\text{GWP} = 1300$.

Хладагент R134a нетоксичен и не воспламеняется во всем диапазоне температур эксплуатации. Однако при попадании воздуха в систему и сжатии могут образовываться горючие смеси. Не следует смешивать R134a с R12, так как образуется азеотропная смесь высокого давления с массовыми долями компонентов 50 и 50 %. Давление насыщенного пара этого хладагента несколько выше, чем у R12 (соответственно 1,16 и 1,08 МПа при 45 °C). Пар R134a разлагается под влиянием пламени с образованием отравляющих и раздражающих соединений, таких, как фторводород.

По классификации ASHRAE этот продукт относится к классу A1. В среднетемпературном оборудовании (температура кипения $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше) R134a имеет эксплуатационные характеристики, близкие к R12.

Для R134a характерны небольшая температура нагнетания (она в среднем на $8\ldots 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем для R12) и невысокие значения давления насыщенных паров.

В холодильных установках, работающих при температурах кипения ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, энергетические показатели R134a хуже, чем у R12 (на 6 % меньше удельная объемная холодопроизводительность при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), и холодильный коэффициент. В таких установках целесообразно применять хладагенты с более низкой нормальной температурой кипения либо компрессор с увеличенным часовым объемом, описываемым поршнями.

В среднетемпературных холодильных установках и системах кондиционирования воздуха холодильный коэффициент R134a равен коэффициенту для R12 или выше его.

В высокотемпературных холодильных установках удельная объемная холодопроизводительность при работе на R134a также несколько выше (на 6% при $t_0=10\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем у R12.

Из-за значительного потенциала глобального потепления GWP рекомендуется применять R134a в герметичных холодильных системах. Влияние R134a на парниковый эффект в 1300 раз сильнее, чем у CO_2 . Так, выброс в атмосферу одной заправки R134a из бытового холодильника (около 140 г) соответствует выбросу 170 кг CO_2 . В Европе в среднем 448 г CO_2 образуется при производстве 1 кВт•ч энергии, т. е. этот выброс соответствует производству 350 кВт•ч энергии.

Для работы с хладагентом R134a рекомендуются только полиэфирные холодильные масла, которые характеризуются повышенной гигроскопичностью.

R134a широко используют во всем мире в качестве основной замены R12 для холодильного оборудования, работающего в среднетемпературном

диапазоне. Его применяют в автомобильных кондиционерах, бытовых холодильниках, торговом холодильном среднетемпературном оборудовании, промышленных установках, системах кондиционирования воздуха в зданиях и промышленных помещениях, а также на холодильном транспорте. Хладагент можно использовать и для ретрофита оборудования, работающего при более низких температурах. Однако в этом случае, если не заменить компрессор, то холодильная система будет иметь пониженную холодопроизводительность.

R134a совместим с рядом уплотняющих материалов, в частности с прокладками, сделанными из таких материалов, как «Буна-Н», «Хайпалон 48», «Неопрен», «Нордел», а также со шлангами, футурованными нейлоном. Как показал анализ, проведенный фирмой «DuPont», изменение массы и линейное набухание таких материалов, применяемых в отечественном холодильном оборудовании, как фенопластовые и полиамидные колодки, текстолит, паронит и полиэтилентерефталатовые пленки, при старении в смеси SUVA R134a с полиэфирным маслом «Castrol SW100» при КХГС в течение 2 недель были незначительными.

Анализ зарубежных публикаций и результаты исследований отечественных специалистов свидетельствуют о том, что замена R12 на R134a, имеющий высокий потенциал глобального потепления GWP, в холодильных компрессорах сопряжена с решением ряда технических задач, основные из которых:

- улучшение объемных и энергетических характеристик герметичных компрессоров;

- увеличение химической стойкости эмаль-проводов электродвигателя герметичного компрессора;

- повышение влагопоглощающей способности фильтров-осушителей из-за высокой гигроскопичности системы R134a — синтетическое масло.

Все это должно привести к значительному увеличению стоимости холодильного оборудования. Вместе с тем в водоохладительных

установках с винтовыми и центробежными компрессорами применение R134a имеет определенные перспективы.

Хладагент **R143a**. Химическая формула $\text{CF}_3\text{—CH}_3$ (трифтор-этан). Относится к группе ГФУ (HFC).

R143a имеет потенциал разрушения озона $\text{ODP} = 0$ и сравнительно высокий потенциал глобального потепления $\text{GWP} = 1000$, нетоксичен и пожароопасен, не взаимодействует с конструкционными и прокладочными материалами. Наличие трех атомов водорода в молекуле R143a способствует хорошей растворимости в минеральных маслах. Удельная теплота парообразования 19,88 кДж/моль при нормальной температуре кипения, что несколько выше, чем для R125 (18,82 кДж/моль). Температура нагнетания ниже, чем у R12, R22 и R502. Как показал эксергетический анализ, энергетическая эффективность двухступенчатого цикла с R143a близка к эффективности цикла с R502, ниже, чем у R22, и выше, чем у R125. Хладагент R143a входит в состав многокомпонентных альтернативных смесей, предлагаемых для замены R12, R22 и R502.

Хладагент **R32**. Химическая формула CF_2H_2 (дифторметан). Относится к группе ГФУ (HFC). Характеристики R32 приведены в приложении 9. R32 имеет потенциал разрушения озона $\text{ODP} = 0$ и низкий по сравнению с R125 и R143a потенциал парникового эффекта $\text{GWP} = 220$. Нетоксичен, пожароопасен. Имеет большую удельную теплоту парообразования 20,37 кДж/моль при нормальной температуре кипения и крутую зависимость давления насыщенных паров от температуры, вследствие чего для R32 характерна высокая температура нагнетания, самая высокая из всех альтернативных хладагентов, за исключением аммиака. R32 растворим в полиэфирных маслах.

Для R32 при использовании его в холодильных установках характерны высокие холодопроизводительность и энергетическая эффективность, но он несколько уступает R22 и R717. Высокая степень

сжатия R32 вызывает необходимость в значительном изменении конструкции холодильной установки при ретрофите и, следовательно, приводит к увеличению ее металлоемкости и стоимости. Поэтому R32 рекомендуется использовать в основном в качестве компонента альтернативных рабочих смесей. Вследствие малых размеров молекулы R32 по сравнению с молекулами хладагентов этанового ряда возможна селективная утечка R32 через неплотности в холодильной системе, что может изменить состав многокомпонентной рабочей смеси.

Глава 2. Расчет свойств альтернативных хладагентов

2.1. Термодинамические свойства однокомпонентных хладагентов

На основе унифицированной базовой системы уравнений найдены и сопоставлены термодинамические свойства углеводородных хладагентов. Расчеты показали хорошую согласуемость результатов численного исследования свойств пропана и н-бутана с опытными данными.

При поиске энергетически эффективных озонобезопасных хладагентов – индивидуальных веществ и их смесей – необходимо выполнять большой объем вычислительных работ. Для его уменьшения целесообразно располагать унифицированной базовой системой уравнений, позволяющей с достаточной для практики точностью рассчитывать и прогнозировать свойства хладагентов в области параметров состояния, представляющей интерес для холодильной техники.

Чуть ниже приведены результаты численного исследования свойств индивидуальных хладагентов на основе базовой системы обобщенных уравнений [26-28,48] которая позволяет рассчитывать циклы холодильных машин с точностью, вполне удовлетворяющей (и даже превосходящей) нужды практики.

Базовая система включает три термических уравнения:

уравнение давления насыщенного пара:

$$P_s = P_{кр} \exp[Ri \ln(\tau) + (Ri - 4 + P_\alpha)\psi(\tau)], \quad (1)$$

$$\psi(\tau) = 4(\tau - 1)/\tau + S(\tau) - 5,3 \ln(\tau),$$

$$S(\tau) = (\tau - 1)[0,2(\tau + 1)^2 + 0,5];$$

уравнение плотности кипящей жидкости:

$$\rho' = \rho_{кр} \exp[\alpha_1(1 - \tau)^{1/3} + \alpha_2 S(\tau)], \quad (2)$$

где приведенная температура, $\tau = T/T_{кр}$; $Ri, P_\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ критерии подобия;

уравнение состояния:

$$p = \frac{RT}{v^2 + cv + d} \quad (3)$$

где $\alpha = A_1 + A_2/\tau + A_3/\tau^2$,

$$c = C_1 + C_2\tau,$$

$$d = \text{const.}$$

Таблица 1

Давление насыщенного пара.

Т, К	C ₄ H ₁₀ - н-бутан		
	Р _s , Па (расчетное)	Р _s , Па (опытное)	Погрешность, %
193	0,00110	0,00111	0,90
198	0,00170	0,00168	-1,19
203	0,00250	0,00247	-1,21
208	0,00350	0,00355	1,41
213	0,00500	0,00501	0,20
218	0,00690	0,00695	0,72
223	0,00950	0,00947	-0,32
228	0,01300	0,0127	-2,36
233	0,01700	0,01679	-1,25
238	0,02200	0,0219	-0,46
243	0,02800	0,02821	0,74
248	0,03600	0,03591	-0,25
253	0,04500	0,04521	0,46
258	0,05600	0,05635	0,62
263	0,07000	0,06955	-0,65
268	0,08500	0,08509	0,11
273	0,10000	0,10323	3,13
275	0,11000	0,11127	1,14
277	0,12000	0,1198	-0,17
279	0,13000	0,12882	-0,92
281	0,14000	0,13837	-1,18
283	0,15000	0,14845	-1,04
285	0,16000	0,15909	-0,57
287	0,17000	0,17031	0,18
289	0,18000	0,18213	1,17
291	0,20000	0,19457	-2,79
293	0,21000	0,20765	-1,13
295	0,22000	0,22139	0,63
297	0,24000	0,23582	-1,77
299	0,25000	0,25095	0,38
301	0,27000	0,2668	-1,20
303	0,28000	0,28341	1,20
305	0,30000	0,30079	0,26
307	0,32000	0,31897	-0,32
309	0,34000	0,33796	-0,60
311	0,36000	0,35779	-0,62

313	0,38000	0,37849	-0,40
315	0,40000	0,40007	0,02
317	0,42000	0,42256	0,61
319	0,45000	0,44599	-0,90
321	0,47000	0,47038	0,08
323	0,50000	0,49575	-0,86
328	0,56000	0,56365	0,65
333	0,64000	0,63824	-0,28
338	0,72000	0,71991	-0,01
343	0,81000	0,80908	-0,11
348	0,91000	0,90616	-0,42
353	1,00000	1,0116	1,15
358	1,10000	1,1258	2,29
363	1,30000	1,2493	-4,06
368	1,40000	1,3825	-1,27
373	1,50000	1,5259	1,70
378	1,70000	1,6801	-1,18
383	1,80000	1,8456	2,47
388	2,00000	2,023	1,14
393	2,20000	2,2131	0,59
398	2,40000	2,4166	0,69
403	2,60000	2,6344	1,31
408	2,90000	2,8675	-1,13
413	3,10000	3,1172	0,55
418	3,40000	3,3853	-0,43
423	3,70000	3,6746	-0,69

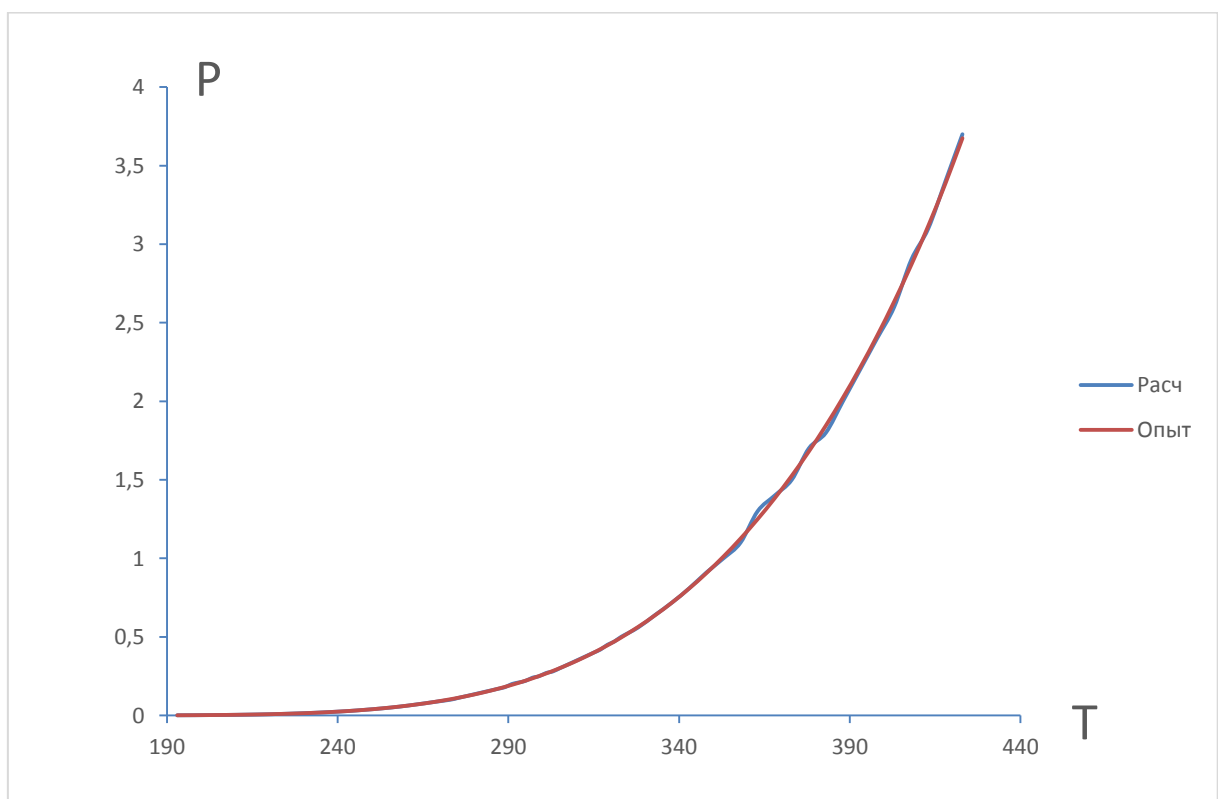


Рис.2. Сопоставление опытных и расчетных значений давлений бутана при различных температурах

Таблица 2

Плотность кипящей жидкости

Т, К	C ₄ H ₁₀ - н-бутан		
	ρ, кг/м ³ (расчетное)	ρ, кг/м ³ (опытное)	Погрешность, %
193	677,2	680,5	0,48
198	672,7	675,8	0,45
203	668,2	671	0,42
208	663,6	666,2	0,38
213	659,1	661,4	0,35
218	654,4	656,6	0,33
223	649,8	651,7	0,30
228	645,1	646,8	0,27
233	640,3	641,9	0,25
238	635,5	636,9	0,22
243	630,7	631,9	0,20
248	625,8	626,8	0,17
253	620,8	621,7	0,14
258	615,8	616,6	0,13
263	610,7	611,4	0,11
268	605,6	606,1	0,09
273	600,3	600,7	0,06
275	598,2	598,6	0,06
277	596,1	596,4	0,05
279	594,0	594,2	0,04
281	591,8	592	0,03
283	589,7	589,8	0,02
285	587,5	587,6	0,02
287	585,3	585,4	0,02
289	583,1	583,1	0,00
291	580,9	580,9	0,00
293	578,6	578,6	-0,01
295	576,4	576,3	-0,02
297	574,1	574	-0,02
299	571,8	571,7	-0,02
301	569,5	569,3	-0,04
303	567,2	567	-0,04
305	564,9	564,6	-0,05
307	562,5	562,2	-0,05
309	560,1	559,8	-0,06
311	557,7	557,4	-0,06
313	555,3	554,9	-0,07
315	552,9	552,4	-0,08
317	550,4	550	-0,07
319	547,9	547,4	-0,09
321	545,4	544,9	-0,09
323	542,8	542,3	-0,10
328	536,4	535,8	-0,11
333	529,7	529,1	-0,12

338	522,9	522,3	-0,11
343	515,9	515,2	-0,13
348	508,6	507,9	-0,13
353	501,0	500,4	-0,12
358	493,2	492,6	-0,12
363	485,0	484,5	-0,11
368	476,5	476	-0,10
373	467,5	467,1	-0,09
378	458,0	457,8	-0,05
383	448,0	447,9	-0,02
388	437,2	437,3	0,01
393	425,6	425,9	0,06
398	413,0	413,4	0,10
403	398,9	399,6	0,18
408	382,8	383,7	0,22
413	363,8	364,7	0,25
418	339,4	339,9	0,15
423	300,0	297,7	-0,77

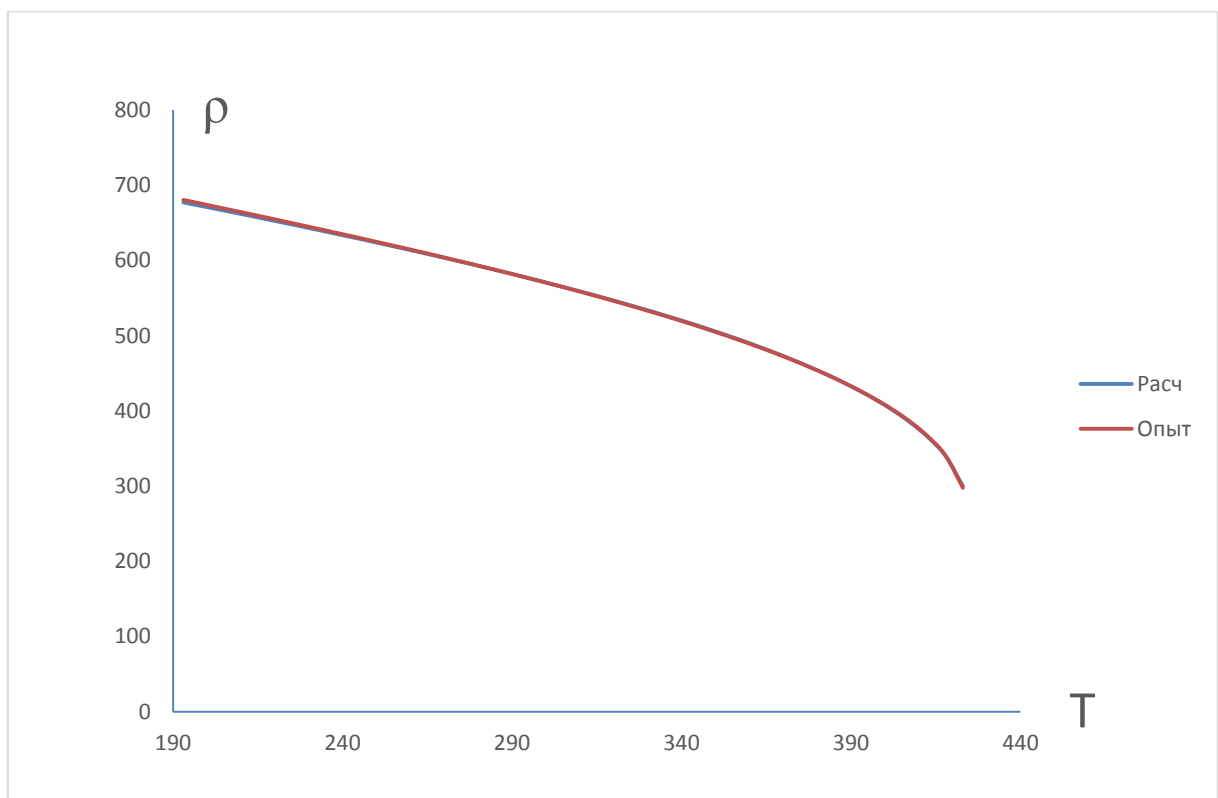


Рис.3. Сопоставление опытных и расчетных значений плотности бутана при различных температурах

Таблица 3

Т, К	C ₃ H ₈ - пропан		
	P _s , Па (расчетное)	P _s , Па (опытное)	Погрешность, %
123	0,000005	0,00001	50,89
133	0,00003	0,00003	10,00

143	0,00011	0,00012	5,56
153	0,00039	0,00041	5,67
163	0,00111	0,00116	3,92
163	0,00280	0,0029	3,55
183	0,00626	0,00645	2,89
193	0,01276	0,01305	2,26
203	0,02398	0,0244	1,70
213	0,04215	0,04269	1,25
223	0,06995	0,07057	0,87
233	0,11051	0,11112	0,55
235	0,12045	0,12105	0,50
237	0,13107	0,13166	0,45
239	0,14241	0,14297	0,39
241	0,15448	0,15502	0,35
243	0,16733	0,16783	0,30
245	0,18097	0,18144	0,26
247	0,19546	0,19589	0,22
249	0,21081	0,21119	0,18
251	0,22706	0,22739	0,14
253	0,24425	0,24452	0,11
255	0,26240	0,26261	0,08
257	0,28156	0,2817	0,05
259	0,30175	0,30181	0,02
261	0,32302	0,323	-0,01
263	0,34539	0,34528	-0,03
265	0,36890	0,3687	-0,05
267	0,39359	0,39329	-0,08
269	0,41949	0,41909	-0,10
271	0,44665	0,44613	-0,12
273	0,47509	0,47446	-0,13
275	0,50485	0,5041	-0,15
277	0,53598	0,5351	-0,16
279	0,56850	0,56749	-0,18
281	0,60246	0,60131	-0,19
283	0,63790	0,6366	-0,20
285	0,67486	0,6734	-0,22
287	0,71337	0,71175	-0,23
289	0,75347	0,75168	-0,24
291	0,79521	0,79324	-0,25
293	0,83863	0,83646	-0,26
295	0,88376	0,88139	-0,27
297	0,93066	0,92807	-0,28
299	0,97935	0,97653	-0,29
301	1,02989	1,0268	-0,30
303	1,08232	1,079	-0,31
305	1,13668	1,1331	-0,32
307	1,19302	1,1891	-0,33
309	1,25138	1,2472	-0,33
311	1,31181	1,3072	-0,35
313	1,37435	1,3694	-0,36
315	1,43906	1,4337	-0,37

317	1,50598	1,5002	-0,39
319	1,57517	1,569	-0,39
321	1,64667	1,64	-0,41
323	1,72053	1,7133	-0,42
328	1,91587	1,9072	-0,45
333	2,12717	2,1168	-0,49
338	2,35532	2,343	-0,53
343	2,60127	2,5868	-0,56
348	2,86603	2,8493	-0,59
353	3,15067	3,1319	-0,60
358	3,45634	3,4361	-0,59
363	3,78424	3,7641	-0,54
368	4,13570	4,1195	-0,39

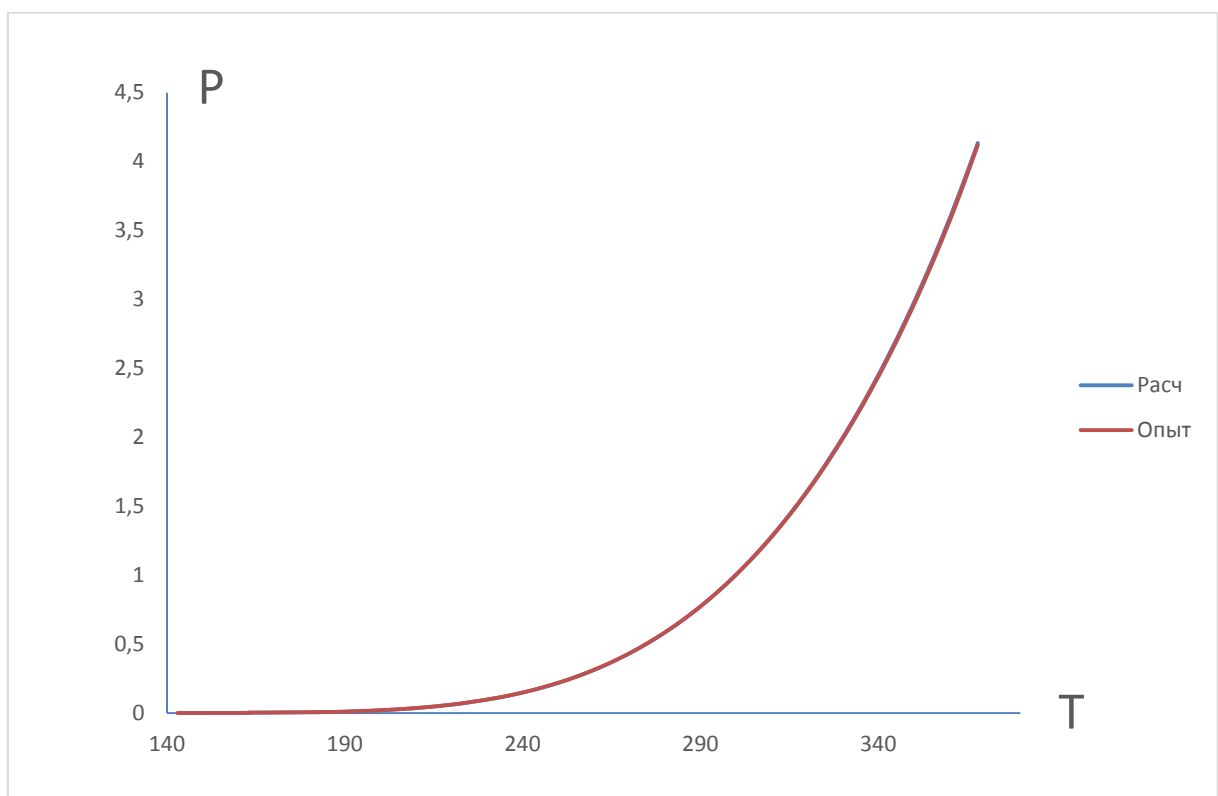


Рис.4. Сопоставление опытных и расчетных значений давлений пропана при различных температурах

Таблица 4

Т, К	C ₃ H ₈ - пропан		
	ρ, кг/м ³ (расчетное)	ρ, кг/м ³ (опытное)	Погрешность, %
123	693,1	694,6	0,22
133	683,6	684,5	0,13
143	674,0	674,4	0,05
153	664,3	664,3	-0,01
163	654,5	654	-0,08
163	644,6	643,7	-0,13
183	634,5	633,3	-0,18
193	624,2	622,8	-0,22

203	613,6	612	-0,27
213	602,9	601,1	-0,30
223	591,9	589,9	-0,34
233	580,5	578,4	-0,37
235	578,2	576,1	-0,37
237	575,9	573,8	-0,37
239	573,6	571,4	-0,38
241	571,2	569	-0,39
243	568,8	566,6	-0,40
245	566,5	564,2	-0,40
247	564,1	561,8	-0,40
249	561,6	559,4	-0,40
251	559,2	556,9	-0,41
253	556,7	554,5	-0,40
255	554,2	552	-0,41
257	551,7	549,5	-0,41
259	549,2	546,9	-0,42
261	546,7	544,4	-0,42
263	544,1	541,8	-0,43
265	541,5	539,2	-0,43
267	538,9	536,6	-0,43
269	536,3	533,9	-0,44
271	533,6	531,3	-0,43
273	530,9	528,6	-0,44
275	528,2	525,9	-0,43
277	525,4	523,1	-0,45
279	522,7	520,4	-0,43
281	519,8	517,6	-0,43
283	517,0	514,7	-0,45
285	514,1	511,9	-0,43
287	511,2	509	-0,43
289	508,3	506	-0,45
291	505,3	503,1	-0,43
293	502,2	500,1	-0,43
295	499,2	497	-0,44
297	496,1	493,9	-0,44
299	492,9	490,8	-0,43
301	489,7	487,6	-0,43
303	486,4	484,4	-0,42
305	483,1	481,1	-0,42
307	479,8	477,8	-0,41
309	476,4	474,4	-0,41
311	472,9	471	-0,40
313	469,3	467,5	-0,39
315	465,7	463,9	-0,39
317	462,0	460,3	-0,37
319	458,3	456,5	-0,38
321	454,4	452,7	-0,38
323	450,5	448,9	-0,35
328	440,2	438,8	-0,32
333	429,2	428	-0,29

338	417,4	416,3	-0,26
343	404,5	403,6	-0,22
348	390,1	389,5	-0,16
353	373,8	373,3	-0,12
358	354,3	354	-0,09
363	329,3	328,8	-0,17
368	288,3	286,5	-0,64

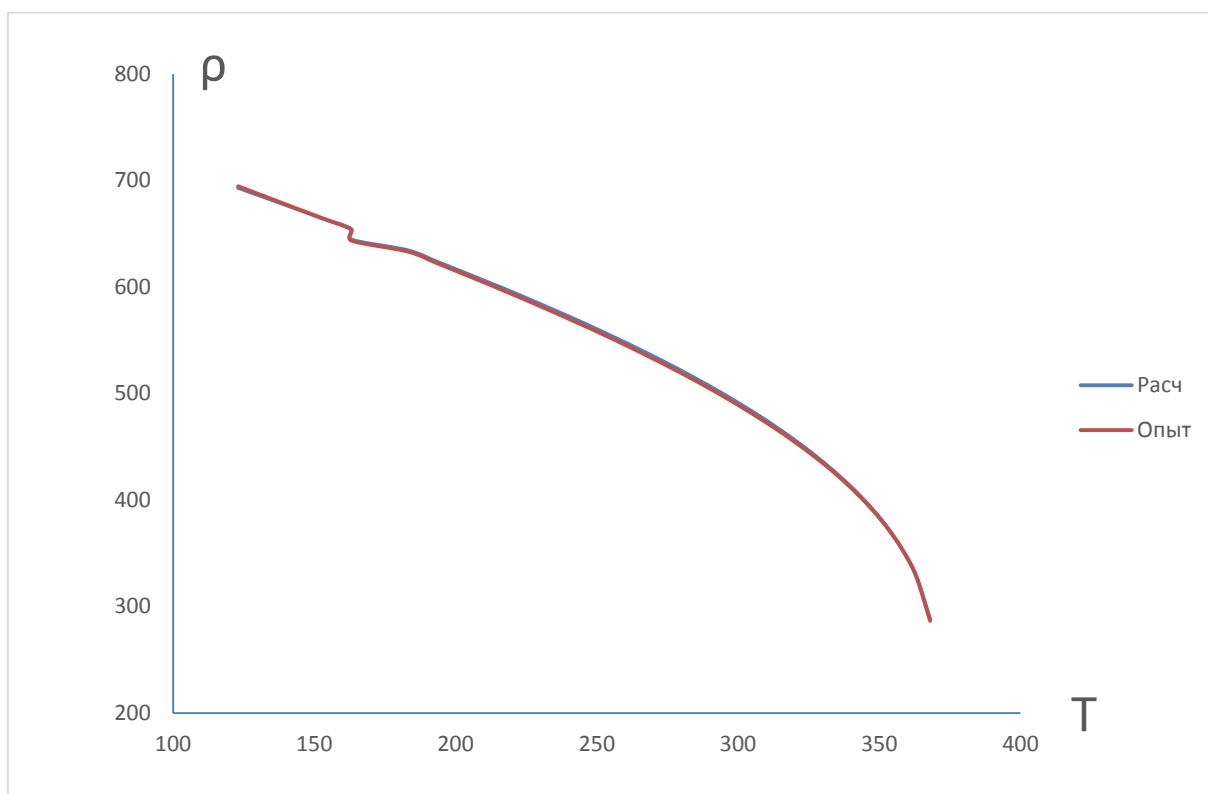


Рис.5. Сопоставление опытных и расчетных значений плотности пропана при различных температурах

Уравнения (1) и (2), как показано в работе [26-28,48] описывают с погрешностью опыта от тройной до критической точки температурные зависимости давления насыщенного пара и плотности кипящей жидкости практически для веществ всех классов.

При этом критерии α_1 и α_2 уравнения (2) связаны с входящими в уравнении (1) критериями Ri и P_α , имеющими четкий физический смысл: критерий Ri отражает момент инерции молекулы, а критерий P_α - ее дипольный момент.

Уравнение состояния (3) – дальнейшее развитие четырехконстантного уравнения состояния, предложенного ранее.

[26-28,48] Это новое уравнение отличается от предшествующего тем, что оно более физично. Действительно, исходя из простейших представлений Ван-дер-Ваальса, в паровой фазе роль входящего в отталкивательный член коэффициента, отражающего собственный объем молекул, должна быть незначительной. Проведенные И.И. Перельштейном и его сотрудниками расчеты подтвердили это положение.

В таблице 1 приведены результаты численного исследования давления насыщенного пара и плотность кипящей жидкости н-бутана. Расчеты проведены при $T = 193 \div 423$ К. С увеличением температуры повышается давление паров и соответственно плотность кипящей жидкости уменьшается. Из таблицы видно, что среднеквадратические отклонения вычисленных по уравнению (1) и (2) значений от опытных не превышает 4,06% и -0,77% соответственно.

В таблице 1 приведены результаты численного исследования давления насыщенного пара и плотность кипящей жидкости пропана. Расчеты проведены при $T = 123 \div 368$ К. С увеличением температуры повышается давление паров и соответственно плотность кипящей жидкости уменьшается. Из таблицы видно, что среднеквадратические отклонения вычисленных по уравнению (1) и (2) значений от опытных не превышает 4,06% и 0,45% соответственно.

Когда p, v, T - данные для смеси неизвестны, а для ее компонентов достаточно хорошо изучены в областях перегрева и фазового равновесия, то сначала для каждого компонента с помощью уравнений (1) – (3) находят значения коэффициентов a, b, c - приведенного в работе [26-28,48] трехконстантного уравнения. Затем с учетом правил комбинаторики находят термические свойства смеси в областях фазового равновесия и перегрева с погрешностью, превышающей не более чем в 2-3 раза погрешность исходных данных о компонентах.[46]

Из проведенного численного исследования можно заключить, что использованная унифицированная базовая система уравнений с

достаточной точностью согласуется с опытными данными и её можно пользоваться в технике умеренного холода. Единственно то, что ее применение ограничивает – это отсутствие значений критериев R_i, P_α и коэффициентов a, b, c , которые приведены лишь для ограниченного числа веществ.

2.2. Свойства смесей углеводородных газов

Смеси пропана и бутана благодаря идентичности строения их молекул приблизительно подчиняются следующему правилу аддитивности: параметры смеси пропорциональны концентрациям и параметрам отдельных компонентов. Поэтому по некоторым параметрам, например давлению паров или температуре кипения при атмосферном давлении, можно судить о составе.

Диаграммы состояния чистых веществ также могут быть использованы для приближенного определения термодинамических параметров смесей углеводородных газов в различных процессах. Такое определение основано на законе Дальтона, по которому идеальные газы в смеси ведут себя так, как будто процесс совершался только с одним компонентом при его парциальном давлении. Расчеты по диаграммам состояния с достаточной степенью точности могут вестись для смесей, когда состояния компонентов находятся в зоне перегретых паров или переохлажденных жидкостей.

Пользуясь правилом аддитивности,[47] по диаграммам состояния можно определить давления насыщения, энтальпию жидкости и пара, удельные объемы жидкости и пара, энтропию, значение теплот парообразования и критические параметры чистых компонентов[49]. Соответствующие параметры смесей получаются суммированием парциальных параметров отдельных компонентов:

$$\gamma_{\text{см}} = \sum \gamma_i x_i^0$$

$$P_{\text{см}} = \sum P_i$$

Здесь γ_i – удельный вес компонента;

x_i^0 и x_i^B – объемная или весовая концентрации компонента;

P_i – парциальное давление компонента.

Для определения критических параметров смеси, по предложению Кея названных псевдокритическими, пользуются следующими соотношениями, построенные на основании правила аддитивности:

$$p_{\text{кр}}^{\text{см}} = \sum P_{\text{кр } i}^{\text{к}} y_i$$

$$T_{\text{кр}}^{\text{см}} = \sum T_{\text{кр } i}^{\text{к}} y_i$$

Здесь $P_{\text{кр } i}^{\text{к}}$ и $T_{\text{кр } i}^{\text{к}}$ – критические параметры компонентов

y_i – мольные концентрации

Давление паров приближённо может быть определено из следующего соотношения:

$$p_{\text{см}} = x_{\text{пр}}^0 P_{\text{пр}} + x_{\text{б}}^0 P_{\text{б}}$$

Здесь $P_{\text{см}}$ – давление паров смеси;

$P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{б}}$ – давление насыщенных паров пропана и бутана при данной температуре, взятое по диаграммам $p - i$.

$x_{\text{пр}}^0$ и $x_{\text{б}}^0$ – содержание в жидкой смеси пропана и бутана в мольных долях.

Определение мольной доли веществ в смеси.

Формула нахождения массовой доли.

$$\vartheta(C_3H_8) = \frac{m(C_3H_8)}{\mu(C_3H_8)} = \frac{г}{г/моль} = \frac{1}{моль}$$

$$\vartheta(C_4H_{10}) = \frac{m(C_4H_{10})}{\mu(C_4H_{10})}$$

$$\vartheta(\text{смеси}) = \vartheta(C_3H_8) + \vartheta(C_4H_{10})$$

Формула определения мольной доли

$$x_{\text{пр}}^0 = \frac{\vartheta(C_3H_8)}{\vartheta(\text{смеси})}$$

Удельный вес жидких смесей может быть найден приближенно из соотношения

$$\gamma_{\text{см}}^{\text{ж}} = \frac{1}{\frac{x_1^{\text{в}}}{\gamma_1^{\text{ж}}} + \frac{x_2^{\text{в}}}{\gamma_2^{\text{ж}}}}$$

$\gamma_{\text{см}}^{\text{ж}}$ – удельный вес жидкостной смеси в кг/м³;

$x_1^{\text{в}}$ и $x_2^{\text{в}}$ – весовые концентрации веществ в кг/кг;

$\gamma_1^{\text{ж}}$ и $\gamma_2^{\text{ж}}$ – удельные веса компонентов при той же температуре взятые по диаграммам состояния;

Энтальпию смеси (газовой или жидкой) углеводородов в первом приближении может определяться по правилу аддитивности:

$$i_{\text{см}}^0 = \sum i_i y_i^{\text{м}}$$

Энтальпия смеси $i_{\text{см}}$ равна сумме произведений энтальпии компонентов i_i при их парциальных давлениях на их мольные концентрации $y_i^{\text{м}}$.

При этом энтальпия компонентов, растворенных в жидкости, при температуре выше критической, так же как и энтальпия других компонентов, берется по диаграммам состояния.

Проверочный расчет метода аддитивности на примере смеси хладагента R410A (R125/R32 – 50/50) [50,51].

Таблица 5

Плотность

Т, К	R125	Р, МПа	R32	Р, МПа	Р расчет	Р опыт	Погрешность, %
233	0,3	0,148	0,7	0,177	0,169	0,176	4,05
235	0,3	0,162	0,7	0,194	0,185	0,192	4,00
237	0,3	0,177	0,7	0,212	0,201	0,210	3,96
239	0,3	0,193	0,7	0,231	0,220	0,229	3,91
241	0,3	0,210	0,7	0,252	0,239	0,249	3,82
243	0,3	0,228	0,7	0,273	0,260	0,270	3,80
245	0,3	0,247	0,7	0,297	0,282	0,293	3,75

247	0,3	0,268	0,7	0,322	0,305	0,317	3,70
249	0,3	0,290	0,7	0,348	0,330	0,343	3,65
251	0,3	0,313	0,7	0,376	0,357	0,371	3,63
253	0,3	0,337	0,7	0,406	0,385	0,400	3,58
255	0,3	0,363	0,7	0,437	0,415	0,430	3,54
257	0,3	0,391	0,7	0,471	0,447	0,463	3,50
259	0,3	0,420	0,7	0,506	0,480	0,497	3,48
261	0,3	0,450	0,7	0,543	0,515	0,534	3,43
263	0,3	0,483	0,7	0,583	0,553	0,572	3,41
265	0,3	0,516	0,7	0,624	0,592	0,613	3,39
267	0,3	0,552	0,7	0,668	0,633	0,655	3,35
269	0,3	0,590	0,7	0,714	0,677	0,700	3,32
271	0,3	0,629	0,7	0,762	0,722	0,747	3,30
273	0,3	0,671	0,7	0,813	0,770	0,797	3,29
275	0,3	0,714	0,7	0,866	0,821	0,848	3,27
277	0,3	0,759	0,7	0,922	0,874	0,903	3,24
279	0,3	0,807	0,7	0,981	0,929	0,960	3,22
281	0,3	0,857	0,7	1,043	0,987	1,020	3,20
283	0,3	0,909	0,7	1,107	1,047	1,082	3,19
285	0,3	0,963	0,7	1,174	1,111	1,147	3,17
287	0,3	1,020	0,7	1,245	1,177	1,216	3,17
289	0,3	1,079	0,7	1,318	1,246	1,287	3,16
291	0,3	1,141	0,7	1,395	1,318	1,361	3,15
293	0,3	1,205	0,7	1,475	1,394	1,4388	3,13
295	0,3	1,272	0,7	1,558	1,472	1,5197	3,13
297	0,3	1,342	0,7	1,645	1,554	1,604	3,12
299	0,3	1,415	0,7	1,735	1,639	1,6917	3,11
301	0,3	1,490	0,7	1,830	1,728	1,783	3,10
303	0,3	1,569	0,7	1,928	1,820	1,8779	3,09
305	0,3	1,650	0,7	2,029	1,916	1,9766	3,09
307	0,3	1,735	0,7	2,135	2,015	2,0792	3,08
309	0,3	1,823	0,7	2,245	2,119	2,1857	3,07
311	0,3	1,914	0,7	2,360	2,226	2,2963	3,06
313	0,3	2,009	0,7	2,478	2,337	2,4111	3,06
315	0,3	2,107	0,7	2,601	2,453	2,5388	3,38
317	0,3	2,208	0,7	2,729	2,573	2,6626	3,37
319	0,3	2,314	0,7	2,862	2,697	2,7909	3,35
321	0,3	2,423	0,7	2,999	2,826	2,9238	3,34
323	0,3	2,537	0,7	3,141	2,960	3,0613	3,31
325	0,3	2,654	0,7	3,289	3,098	3,2037	3,29
327	0,3	2,776	0,7	3,442	3,242	3,351	3,25
329	0,3	2,903	0,7	3,600	3,391	3,5033	3,22
331	0,3	3,034	0,7	3,764	3,545	3,6607	3,17
333	0,3	3,170	0,7	3,933	3,704	3,8233	3,11
335	0,3	3,312	0,7	4,109	3,870	3,9912	3,04

337	0,3	3,460	0,7	4,291	4,042	4,1645	2,95
-----	-----	-------	-----	-------	-------	--------	------

Таблица 6

Энтальпия смеси в жидкой фазе.

T, K	R125	i , кДж/кг	R32	i , кДж/кг	$\Delta i_{\text{расч}}$ кДж/кг	$\Delta i_{\text{опыт}}$ кДж/кг	Погрешность, %
233	0,5	152,44	0,5	133,23	142,84	141,1	-1,23
235	0,5	154,71	0,5	136,45	145,58	144	-1,10
237	0,5	157	0,5	139,69	148,35	146,8	-1,05
239	0,5	159,29	0,5	142,93	151,11	149,6	-1,01
241	0,5	161,59	0,5	146,18	153,89	152,4	-0,97
243	0,5	163,9	0,5	149,45	156,68	155,3	-0,89
245	0,5	166,22	0,5	152,72	159,47	158,2	-0,80
247	0,5	168,56	0,5	156,01	162,29	161,1	-0,74
249	0,5	170,9	0,5	159,31	165,11	164	-0,67
251	0,5	173,26	0,5	162,62	167,94	166,9	-0,62
253	0,5	175,62	0,5	165,94	170,78	169,8	-0,58
255	0,5	178	0,5	169,28	173,64	172,8	-0,49
257	0,5	180,39	0,5	172,63	176,51	175,7	-0,46
259	0,5	182,8	0,5	175,99	179,40	178,7	-0,39
261	0,5	185,21	0,5	179,37	182,29	181,7	-0,32
263	0,5	187,64	0,5	182,76	185,20	184,7	-0,27
265	0,5	190,08	0,5	186,18	188,13	187,7	-0,23
267	0,5	192,54	0,5	189,6	191,07	190,8	-0,14
269	0,5	195,01	0,5	193,05	194,03	193,8	-0,12
271	0,5	197,5	0,5	196,52	197,01	196,9	-0,06
273	0,5	200	0,5	200	200,00	200	0,00
275	0,5	202,52	0,5	203,5	203,01	203,1	0,04
277	0,5	205,05	0,5	207,03	206,04	206,2	0,08
279	0,5	207,6	0,5	210,58	209,09	209,4	0,15
281	0,5	210,17	0,5	214,15	212,16	212,6	0,21
283	0,5	212,76	0,5	217,74	215,25	215,7	0,21
285	0,5	215,37	0,5	221,36	218,37	219	0,29
287	0,5	218	0,5	225,01	221,51	222,2	0,31
289	0,5	220,65	0,5	228,68	224,67	225,4	0,33
291	0,5	223,32	0,5	232,39	227,86	228,7	0,37
293	0,5	226,02	0,5	236,12	231,07	232	0,40
295	0,5	228,74	0,5	239,89	234,32	235,4	0,46
297	0,5	231,49	0,5	243,69	237,59	238,7	0,47
299	0,5	234,26	0,5	247,53	240,90	242,1	0,50
301	0,5	237,07	0,5	251,4	244,24	245,6	0,56
303	0,5	239,91	0,5	255,32	247,62	249,1	0,60
305	0,5	242,78	0,5	259,28	251,03	252,6	0,62

307	0,5	245,69	0,5	263,28	254,49	256,1	0,63
309	0,5	248,64	0,5	267,34	257,99	259,7	0,66
311	0,5	251,63	0,5	271,45	261,54	263,4	0,71
313	0,5	254,67	0,5	275,61	265,14	267,1	0,73
315	0,5	257,76	0,5	279,84	268,80	270,9	0,78
317	0,5	260,92	0,5	284,13	272,53	274,8	0,83
319	0,5	264,14	0,5	288,5	276,32	278,7	0,85
321	0,5	267,44	0,5	292,95	280,20	282,7	0,89
323	0,5	270,83	0,5	297,49	284,16	286,9	0,96
325	0,5	274,33	0,5	302,12	288,23	291,2	1,02
327	0,5	277,95	0,5	306,87	292,41	295,6	1,08
329	0,5	281,75	0,5	311,74	296,75	303,3	2,16
331	0,5	285,77	0,5	316,75	301,26	305,1	1,26
333	0,5	290,1	0,5	321,93	306,02	310,3	1,38
335	0,5	294,95	0,5	327,3	311,13	315,9	1,51
337	0,5	300,86	0,5	332,9	316,88	322	1,59

Таблица 7

Энтальпия смеси в паровой фазе.

T, K	R125	i , кДж/кг	R32	i , кДж/кг	$\Delta i_{\text{расч}}$ кДж/кг	$\Delta i_{\text{опыт}}$ кДж/кг	Погрешность, %
233	0,5	312,03	0,5	502,02	407,03	407,1	0,02
235	0,5	313,16	0,5	502,91	408,04	408	-0,01
237	0,5	314,28	0,5	503,78	409,03	408,9	-0,03
239	0,5	315,4	0,5	504,63	410,02	409,8	-0,05
241	0,5	316,51	0,5	505,47	410,99	410,7	-0,07
243	0,5	317,61	0,5	506,27	411,94	411,6	-0,08
245	0,5	318,71	0,5	507,06	412,89	412,5	-0,09
247	0,5	319,8	0,5	507,83	413,82	413,3	-0,12
249	0,5	320,88	0,5	508,57	414,73	414,1	-0,15
251	0,5	321,96	0,5	509,28	415,62	414,9	-0,17
253	0,5	323,03	0,5	509,97	416,50	415,7	-0,19
255	0,5	324,09	0,5	510,64	417,37	416,5	-0,21
257	0,5	325,14	0,5	511,28	418,21	417,2	-0,24
259	0,5	326,19	0,5	511,89	419,04	418	-0,25
261	0,5	327,22	0,5	512,47	419,85	418,7	-0,27
263	0,5	328,24	0,5	513,02	420,63	419,4	-0,29
265	0,5	329,25	0,5	513,54	421,40	420,1	-0,31
267	0,5	330,25	0,5	514,03	422,14	420,7	-0,34
269	0,5	331,23	0,5	514,49	422,86	421,4	-0,35
271	0,5	332,2	0,5	514,91	423,56	422	-0,37
273	0,5	333,16	0,5	515,3	424,23	422,5	-0,41
275	0,5	334,1	0,5	515,65	424,88	423,1	-0,42

277	0,5	335,02	0,5	515,96	425,49	423,6	-0,45
279	0,5	335,92	0,5	516,24	426,08	424,1	-0,47
281	0,5	336,8	0,5	516,47	426,64	424,6	-0,48
283	0,5	337,66	0,5	516,66	427,16	425,1	-0,48
285	0,5	338,5	0,5	516,8	427,65	425,5	-0,51
287	0,5	339,31	0,5	516,9	428,11	425,9	-0,52
289	0,5	340,1	0,5	516,95	428,53	426,2	-0,55
291	0,5	340,85	0,5	516,95	428,90	426,5	-0,56
293	0,5	341,58	0,5	516,9	429,24	426,8	-0,57
295	0,5	342,28	0,5	516,79	429,54	427,1	-0,57
297	0,5	342,95	0,5	516,62	429,79	427,3	-0,58
299	0,5	343,57	0,5	516,39	429,98	427,4	-0,60
301	0,5	344,16	0,5	516,09	430,13	427,5	-0,61
303	0,5	344,71	0,5	515,72	430,22	427,6	-0,61
305	0,5	345,22	0,5	515,29	430,26	427,6	-0,62
307	0,5	345,67	0,5	514,77	430,22	427,5	-0,64
309	0,5	346,07	0,5	514,77	430,42	427,4	-0,71
311	0,5	346,42	0,5	513,49	429,96	427,2	-0,64
313	0,5	346,69	0,5	512,71	429,70	427	-0,63
315	0,5	346,9	0,5	511,82	429,36	426,7	-0,62
317	0,5	347,02	0,5	510,83	428,93	426,3	-0,62
319	0,5	347,05	0,5	509,72	428,39	425,8	-0,61
321	0,5	346,96	0,5	508,48	427,72	425,2	-0,59
323	0,5	346,75	0,5	507,1	426,93	424,6	-0,55
325	0,5	346,38	0,5	505,57	425,98	423,8	-0,51
327	0,5	345,82	0,5	503,86	424,84	423	-0,43
329	0,5	345	0,5	501,95	423,48	422	-0,35
331	0,5	343,85	0,5	499,82	421,84	420,8	-0,25
333	0,5	342,21	0,5	497,44	419,83	419,5	-0,08
335	0,5	339,79	0,5	494,76	417,28	418,1	0,20
337	0,5	335,77	0,5	491,73	413,75	416,3	0,61

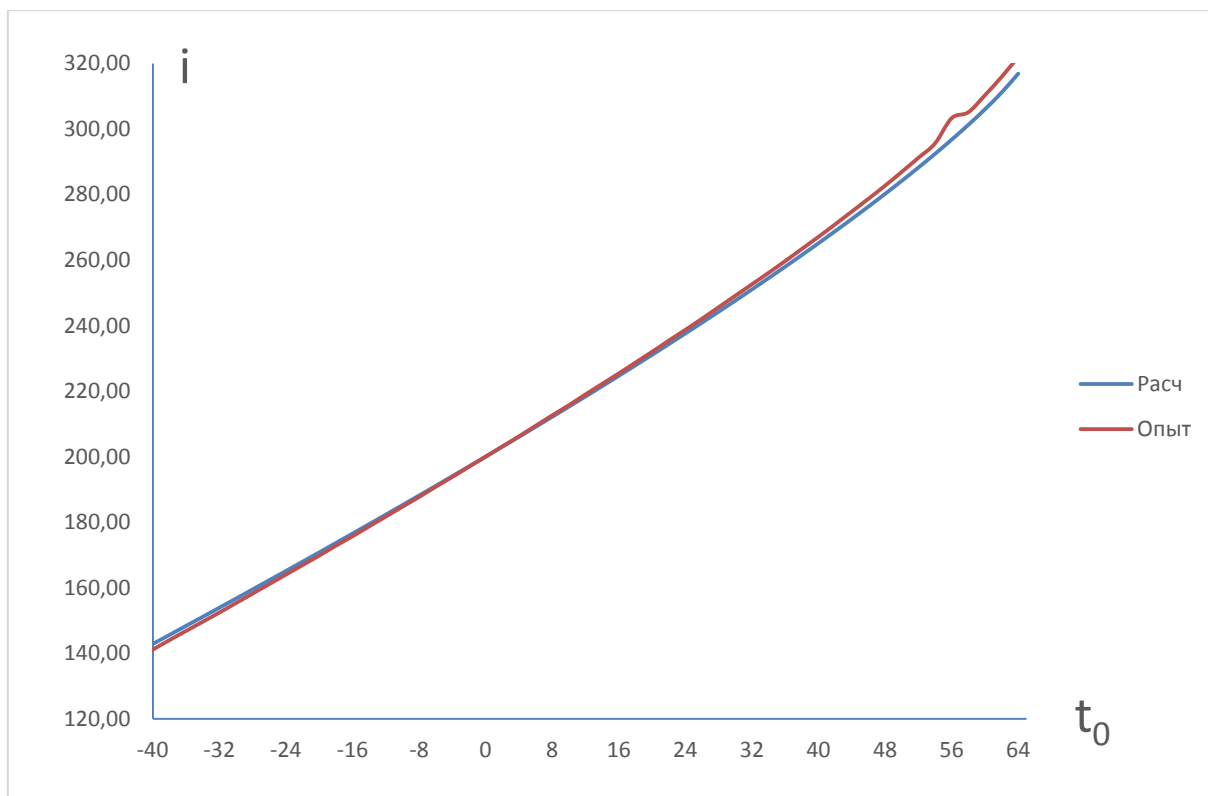


Рис.6. Сопоставление расчетных и опытных значений энтальпий при различных температурах в жидкой фазе

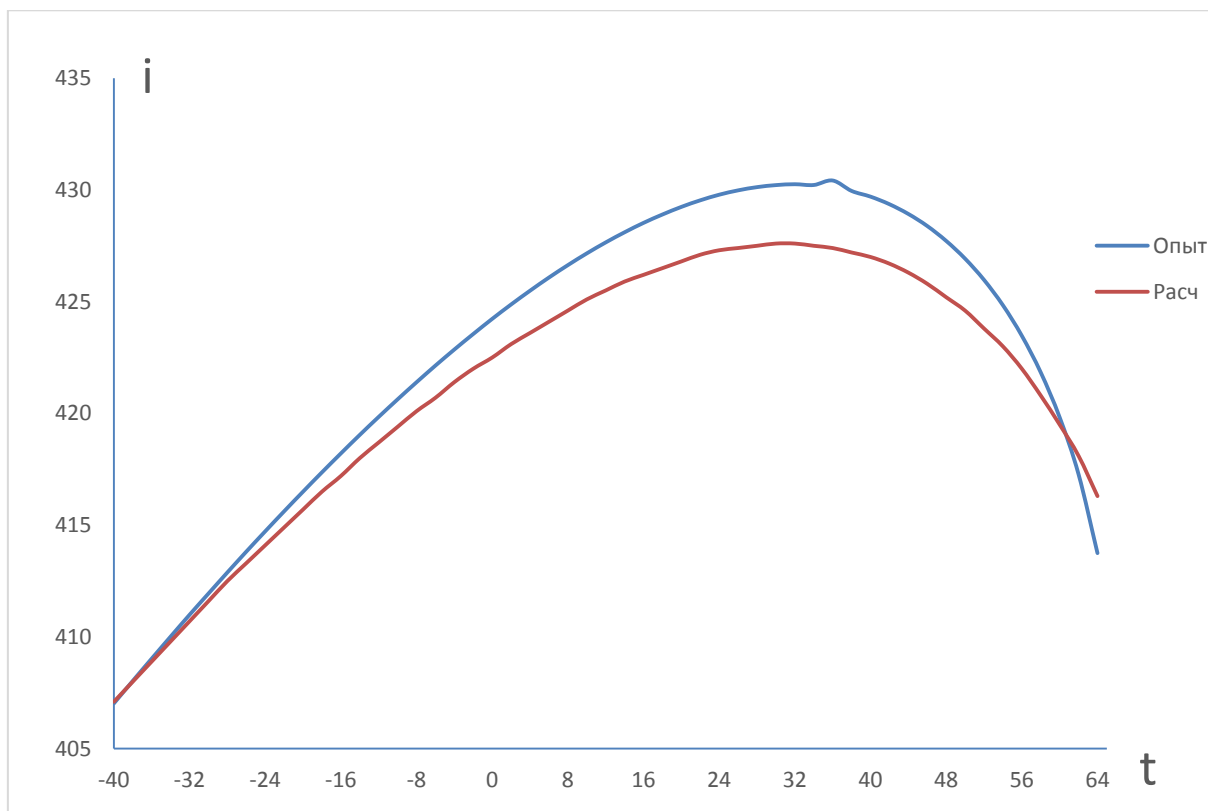


Рис.7. Сопоставление расчетных и опытных значений энтальпий при различных температурах в паровой фазе

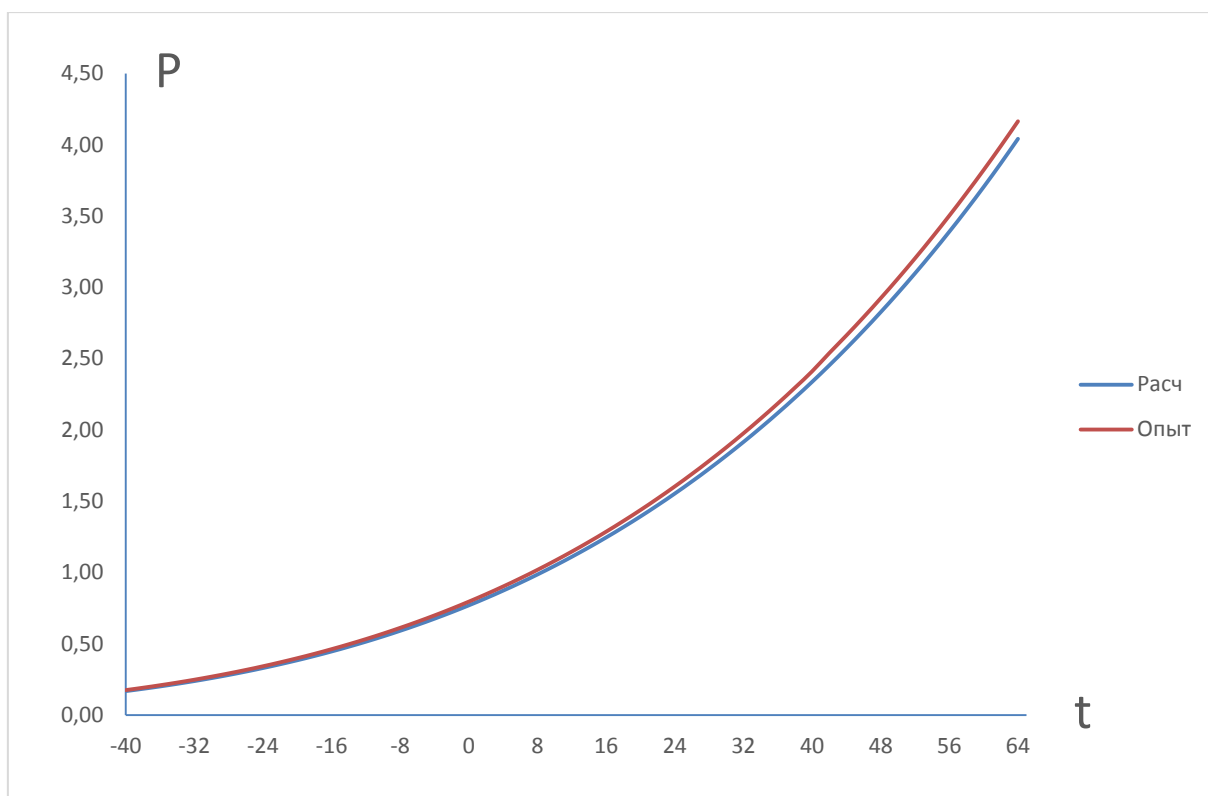


Рис.8. Сопоставление расчетных и опытных значений давления при различных температурах

Таблица 8

Свойства смеси пропан – н-бутан (40/60 %)

T, К	C ₃ H ₈	P, МПа	C ₄ H ₁₀	P, МПа	P _{смеси} МПа
223	0,47	0,07	0,53	0,0095	0,0379
225	0,47	0,0769	0,53	0,0107	0,0418
227	0,47	0,0845	0,53	0,012	0,0461
229	0,47	0,0925	0,53	0,0134	0,0506
231	0,47	0,1012	0,53	0,015	0,0555
233	0,47	0,1105	0,53	0,0168	0,0608
235	0,47	0,1204	0,53	0,0187	0,0665
237	0,47	0,1311	0,53	0,0208	0,0726
239	0,47	0,1424	0,53	0,0231	0,0792
241	0,47	0,1545	0,53	0,0256	0,0862
243	0,47	0,1673	0,53	0,0282	0,0936
245	0,47	0,181	0,53	0,0311	0,1016
247	0,47	0,1955	0,53	0,0343	0,1101
249	0,47	0,2108	0,53	0,0377	0,1191

251	0,47	0,2271	0,53	0,0413	0,1286
253	0,47	0,2443	0,53	0,0453	0,1388
255	0,47	0,2624	0,53	0,0495	0,1496
257	0,47	0,2816	0,53	0,0541	0,1610
259	0,47	0,3018	0,53	0,0589	0,1731
261	0,47	0,323	0,53	0,0641	0,1858
263	0,47	0,3454	0,53	0,0697	0,1993
265	0,47	0,3689	0,53	0,0756	0,2135
267	0,47	0,3936	0,53	0,082	0,2285
269	0,47	0,4195	0,53	0,0887	0,2442
271	0,47	0,4466	0,53	0,0959	0,2607
273	0,47	0,4751	0,53	0,1035	0,2782
275	0,47	0,5049	0,53	0,1115	0,2964
277	0,47	0,536	0,53	0,1201	0,3156
279	0,47	0,5685	0,53	0,1291	0,3356
281	0,47	0,6025	0,53	0,1387	0,3567
283	0,47	0,6379	0,53	0,1488	0,3787
285	0,47	0,6749	0,53	0,1595	0,4017
287	0,47	0,7134	0,53	0,1707	0,4258
289	0,47	0,7535	0,53	0,1826	0,4509
291	0,47	0,7952	0,53	0,1951	0,4771
293	0,47	0,8386	0,53	0,2082	0,5045
295	0,47	0,8838	0,53	0,2219	0,5330
297	0,47	0,9307	0,53	0,2364	0,5627
299	0,47	0,9794	0,53	0,2515	0,5936
301	0,47	1,0299	0,53	0,2674	0,6258
303	0,47	1,0823	0,53	0,2841	0,6593
305	0,47	1,1367	0,53	0,3015	0,6940
307	0,47	1,193	0,53	0,3197	0,7302
309	0,47	1,2514	0,53	0,3387	0,7677
311	0,47	1,3118	0,53	0,3585	0,8066
313	0,47	1,3744	0,53	0,3792	0,8469
315	0,47	1,4391	0,53	0,4008	0,8888
317	0,47	1,506	0,53	0,4233	0,9322
319	0,47	1,5752	0,53	0,4468	0,9771
321	0,47	1,6467	0,53	0,4712	1,0237
323	0,47	1,7205	0,53	0,4966	1,0718
325	0,47	1,7968	0,53	0,523	1,1217
327	0,47	1,8756	0,53	0,5504	1,1732
329	0,47	1,9568	0,53	0,5788	1,2265
331	0,47	2,0407	0,53	0,6084	1,2816
333	0,47	2,1272	0,53	0,6391	1,3385
335	0,47	2,2164	0,53	0,6709	1,3973

337	0,47	2,3083	0,53	0,7038	1,4579
339	0,47	2,4031	0,53	0,738	1,5206
341	0,47	2,5007	0,53	0,7733	1,5852
343	0,47	2,6013	0,53	0,8099	1,6519

Таблица 9

Энтальпия смеси в жидкой фазе.

T, К	C ₃ H ₈	P, МПа	i, кДж/кг	$\Delta i_{\text{ком}}$ кДж/кг	C ₄ H ₁₀	P, МПа	i, кДж/кг	$\Delta i_{\text{ком}}$ кДж/кг	$\Delta i_{\text{смеси}}$ кДж/кг
223	0,4	0,07	82,75	33,1	0,6	0,0095	89,42	53,652	86,75
225	0,4	0,0769	87,22	34,888	0,6	0,0107	93,68	56,208	91,10
227	0,4	0,0845	91,7	36,68	0,6	0,012	97,94	58,764	95,44
229	0,4	0,0925	96,172	38,4688	0,6	0,0134	102,1	61,26	99,73
231	0,4	0,1012	100,65	40,26	0,6	0,015	106,1	63,66	103,92
233	0,4	0,1105	105,12	42,048	0,6	0,0168	110,8	66,48	108,53
235	0,4	0,1204	109,65	43,86	0,6	0,0187	114,7	68,82	112,68
237	0,4	0,1311	114,2	45,68	0,6	0,0208	119,31	71,586	117,27
239	0,4	0,1424	118,77	47,508	0,6	0,0231	123,8	74,28	121,79
241	0,4	0,1545	123,36	49,344	0,6	0,0256	128,16	76,896	126,24
243	0,4	0,1673	127,97	51,188	0,6	0,0282	132,52	79,512	130,70
245	0,4	0,181	132,61	53,044	0,6	0,0311	136,92	82,152	135,20
247	0,4	0,1955	137,26	54,904	0,6	0,0343	141,31	84,786	139,69
249	0,4	0,2108	141,94	56,776	0,6	0,0377	145,73	87,438	144,21
251	0,4	0,2271	146,64	58,656	0,6	0,0413	150,16	90,096	148,75
253	0,4	0,2443	151,36	60,544	0,6	0,0453	154,6	92,76	153,30
255	0,4	0,2624	156,11	62,444	0,6	0,0495	159,08	95,448	157,89
257	0,4	0,2816	160,88	64,352	0,6	0,0541	163,55	98,13	162,48
259	0,4	0,3018	165,68	66,272	0,6	0,0589	168,05	100,83	167,10
261	0,4	0,323	170,5	68,2	0,6	0,0641	172,56	103,536	171,74
263	0,4	0,3454	175,35	70,14	0,6	0,0697	177,08	106,248	176,39
265	0,4	0,3689	180,22	72,088	0,6	0,0756	181,64	108,984	181,07
267	0,4	0,3936	185,12	74,048	0,6	0,082	186,2	111,72	185,77
269	0,4	0,4195	190,05	76,02	0,6	0,0887	190,78	114,468	190,49
271	0,4	0,4466	195,01	78,004	0,6	0,0959	195,39	117,234	195,24
273	0,4	0,4751	200	80	0,6	0,1035	200	120	200,00
275	0,4	0,5049	205,02	82,008	0,6	0,1115	204,64	122,784	204,79
277	0,4	0,536	210,06	84,024	0,6	0,1201	209,3	125,58	209,60
279	0,4	0,5685	215,14	86,056	0,6	0,1291	213,98	128,388	214,44
281	0,4	0,6025	220,25	88,1	0,6	0,1387	218,68	131,208	219,31
283	0,4	0,6379	225,4	90,16	0,6	0,1488	223,4	134,04	224,20
285	0,4	0,6749	230,57	92,228	0,6	0,1595	228,13	136,878	229,11
287	0,4	0,7134	235,79	94,316	0,6	0,1707	232,89	139,734	234,05

289	0,4	0,7535	241,03	96,412	0,6	0,1826	237,68	142,608	239,02
291	0,4	0,7952	246,32	98,528	0,6	0,1951	242,48	145,488	244,02
293	0,4	0,8386	251,64	100,656	0,6	0,2082	247,3	148,38	249,04
295	0,4	0,8838	256,99	102,796	0,6	0,2219	252,15	151,29	254,09
297	0,4	0,9307	262,39	104,956	0,6	0,2364	257,02	154,212	259,17
299	0,4	0,9794	267,83	107,132	0,6	0,2515	261,91	157,146	264,28
301	0,4	1,0299	273,31	109,324	0,6	0,2674	266,82	160,092	269,42
303	0,4	1,0823	278,83	111,532	0,6	0,2841	271,76	163,056	274,59
305	0,4	1,1367	284,4	113,76	0,6	0,3015	276,72	166,032	279,79
307	0,4	1,193	290,01	116,004	0,6	0,3197	281,71	169,026	285,03
309	0,4	1,2514	295,68	118,272	0,6	0,3387	286,72	172,032	290,30
311	0,4	1,3118	301,39	120,556	0,6	0,3585	291,76	175,056	295,61
313	0,4	1,3744	307,15	122,86	0,6	0,3792	296,82	178,092	300,95
315	0,4	1,4391	312,96	125,184	0,6	0,4008	301,9	181,14	306,32
317	0,4	1,506	318,83	127,532	0,6	0,4233	307,02	184,212	311,74
319	0,4	1,5752	324,76	129,904	0,6	0,4468	312,15	187,29	317,19
321	0,4	1,6467	330,75	132,3	0,6	0,4712	317,32	190,392	322,69
323	0,4	1,7205	336,8	134,72	0,6	0,4966	322,51	193,506	328,23
325	0,4	1,7968	342,97	137,188	0,6	0,523	327,75	196,65	333,84
327	0,4	1,8756	349,14	139,656	0,6	0,5504	330	198	337,66
329	0,4	1,9568	355,41	142,164	0,6	0,5788	338,28	202,968	345,13
331	0,4	2,0407	361,78	144,712	0,6	0,6084	343,59	206,154	350,87
333	0,4	2,1272	368,14	147,256	0,6	0,6391	348,91	209,346	356,60
335	0,4	2,2164	374,72	149,888	0,6	0,6709	354,3	212,58	362,47
337	0,4	2,3083	381,31	152,524	0,6	0,7038	359,69	215,814	368,34
339	0,4	2,4031	388,03	155,212	0,6	0,738	365,12	219,072	374,28
341	0,4	2,5007	394,89	157,956	0,6	0,7733	370,59	222,354	380,31
343	0,4	2,6013	401,75	160,7	0,6	0,8099	376,06	225,636	386,34

Таблица 10

Энтальпия смеси в паровой фазе.

T, К	C ₃ H ₈	P, МПа	i, кДж/кг	$\Delta i_{\text{ком}}$ кДж/кг	C ₄ H ₁₀	P, МПа	i, кДж/кг	$\Delta i_{\text{ком}}$ кДж/кг	$\Delta i_{\text{смеси}}$ кДж/кг
223	0,4	0,07	516,48	206,592	0,6	0,0095	515,56	309,336	515,93
225	0,4	0,0769	518,88	207,552	0,6	0,0107	518,28	310,968	518,52
227	0,4	0,0845	521,28	208,512	0,6	0,012	521	312,6	521,11
229	0,4	0,0925	523,68	209,472	0,6	0,0134	523,72	314,232	523,70
231	0,4	0,1012	526,08	210,432	0,6	0,015	526,45	315,87	526,30
233	0,4	0,1105	528,48	211,392	0,6	0,0168	529,19	317,514	528,91
235	0,4	0,1204	530,87	212,348	0,6	0,0187	531,95	319,17	531,52
237	0,4	0,1311	533,26	213,304	0,6	0,0208	534,7	320,82	534,12
239	0,4	0,1424	535,64	214,256	0,6	0,0231	537,47	322,482	536,74

241	0,4	0,1545	538,01	215,204	0,6	0,0256	540,24	324,144	539,35
243	0,4	0,1673	540,38	216,152	0,6	0,0282	543,01	325,806	541,96
245	0,4	0,181	542,75	217,1	0,6	0,0311	545,8	327,48	544,58
247	0,4	0,1955	545,11	218,044	0,6	0,0343	548,59	329,154	547,20
249	0,4	0,2108	547,46	218,984	0,6	0,0377	551,38	330,828	549,81
251	0,4	0,2271	549,8	219,92	0,6	0,0413	554,18	332,508	552,43
253	0,4	0,2443	552,13	220,852	0,6	0,0453	556,98	334,188	555,04
255	0,4	0,2624	554,46	221,784	0,6	0,0495	559,8	335,88	557,66
257	0,4	0,2816	556,77	222,708	0,6	0,0541	562,61	337,566	560,27
259	0,4	0,3018	559,08	223,632	0,6	0,0589	565,43	339,258	562,89
261	0,4	0,323	561,37	224,548	0,6	0,0641	568,26	340,956	565,50
263	0,4	0,3454	563,65	225,46	0,6	0,0697	571,08	342,648	568,11
265	0,4	0,3689	565,92	226,368	0,6	0,0756	573,92	344,352	570,72
267	0,4	0,3936	568,18	227,272	0,6	0,082	576,75	346,05	573,32
269	0,4	0,4195	570,42	228,168	0,6	0,0887	579,59	347,754	575,92
271	0,4	0,4466	572,65	229,06	0,6	0,0959	582,43	349,458	578,52
273	0,4	0,4751	574,87	229,948	0,6	0,1035	585,27	351,162	581,11
275	0,4	0,5049	577,06	230,824	0,6	0,1115	588,12	352,872	583,70
277	0,4	0,536	579,24	231,696	0,6	0,1201	590,97	354,582	586,28
279	0,4	0,5685	581,41	232,564	0,6	0,1291	593,82	356,292	588,86
281	0,4	0,6025	583,55	233,42	0,6	0,1387	596,67	358,002	591,42
283	0,4	0,6379	585,67	234,268	0,6	0,1488	599,53	359,718	593,99
285	0,4	0,6749	587,77	235,108	0,6	0,1595	602,38	361,428	596,54
287	0,4	0,7134	589,85	235,94	0,6	0,1707	605,24	363,144	599,08
289	0,4	0,7535	591,91	236,764	0,6	0,1826	608,09	364,854	601,62
291	0,4	0,7952	593,94	237,576	0,6	0,1951	610,95	366,57	604,15
293	0,4	0,8386	595,95	238,38	0,6	0,2082	613,8	368,28	606,66
295	0,4	0,8838	597,93	239,172	0,6	0,2219	616,66	369,996	609,17
297	0,4	0,9307	599,88	239,952	0,6	0,2364	619,51	371,706	611,66
299	0,4	0,9794	601,8	240,72	0,6	0,2515	622,36	373,416	614,14
301	0,4	1,0299	603,68	241,472	0,6	0,2674	625,21	375,126	616,60
303	0,4	1,0823	605,54	242,216	0,6	0,2841	628,06	376,836	619,05
305	0,4	1,1367	607,35	242,94	0,6	0,3015	630,91	378,546	621,49
307	0,4	1,193	609,13	243,652	0,6	0,3197	633,75	380,25	623,90
309	0,4	1,2514	610,87	244,348	0,6	0,3387	636,59	381,954	626,30
311	0,4	1,3118	612,57	245,028	0,6	0,3585	639,42	383,652	628,68
313	0,4	1,3744	614,21	245,684	0,6	0,3792	642,25	385,35	631,03
315	0,4	1,4391	615,81	246,324	0,6	0,4008	645,08	387,048	633,37
317	0,4	1,506	617,36	246,944	0,6	0,4233	647,9	388,74	635,68
319	0,4	1,5752	618,86	247,544	0,6	0,4468	650,71	390,426	637,97
321	0,4	1,6467	620,29	248,116	0,6	0,4712	653,52	392,112	640,23
323	0,4	1,7205	621,66	248,664	0,6	0,4966	656,32	393,792	642,46
325	0,4	1,7968	622,91	249,164	0,6	0,523	659,1	395,46	644,62

327	0,4	1,8756	624,15	249,66	0,6	0,5504	661,89	397,134	646,79
329	0,4	1,9568	625,29	250,116	0,6	0,5788	664,66	398,796	648,91
331	0,4	2,0407	626,32	250,528	0,6	0,6084	667,43	400,458	650,99
333	0,4	2,1272	627,36	250,944	0,6	0,6391	670,19	402,114	653,06
335	0,4	2,2164	628,13	251,252	0,6	0,6709	672,92	403,752	655,00
337	0,4	2,3083	628,91	251,564	0,6	0,7038	675,65	405,39	656,95
339	0,4	2,4031	629,51	251,804	0,6	0,738	678,37	407,022	658,83
341	0,4	2,5007	629,94	251,976	0,6	0,7733	381,07	228,642	480,62
343	0,4	2,6013	630,37	252,148	0,6	0,8099	683,77	410,262	662,41

Глава 3. Характеристики холодильных машин работающих на альтернативных хладагентах

3.1. Тепловой расчет двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением.

Рабочее вещество кипит в испарителе VIII (процесс 11-1), сжимается в компрессоре первой ступени I (процесс 1-2), охлаждается в промежуточном теплообменнике II (процесс 2-3), затем пар рабочего вещества в состоянии 3 смешивается с холодным паром состояния 8, идущим из промежуточного сосуда VI. После смешивания состояния рабочего вещества перед всасыванием в компрессор второй ступени III определяется точкой 4. Далее рабочее вещество сжимается в компрессоре второй ступени IV (процесс 5-6) и направляется в промежуточному сосуду.

Перед промежуточным сосудом рабочее вещество делится на два потока: большая часть рабочего вещества идет в змеевик промежуточного сосуда, меньшая – дросселируется во вспомогательном дроссельном вентиле V (процесс 6-7) до промежуточного давления и поступает в промежуточный сосуд. В промежуточном сосуде за счет разности плотностей жидкости и пара происходит разделение влажного пара (состояние 7) на жидкость (состояние 9) и сухой насыщенный пар (состояние 8). Сухой насыщенный пар засасывается компрессором второй ступени, а жидкость кипит (процесс 9-8) за счет теплоты, отбираемой от жидкого рабочего вещества, идущего по змеевику. Сухой насыщенный пар, образовавшийся при кипении в процессе 9-8, отсасывается компрессором второй ступени. Жидкое рабочее вещество, идущее по змеевику, при этом охлаждается (процесс 6-10) и затем дросселируется в основном дроссельном вентиле VII (процесс 10-11) до давления p_0 . После дросселирования рабочее вещество поступает в испаритель, где кипит при давлении p_0 и температуре T_0 .

В точке 1 рабочее вещество может быть сухим насыщенным или перегретым на (5-10 °С). Температура рабочего вещества в точке 10 обуславливается недорекуперацией в процессе охлаждения жидкости в змеевике на 3-5 °С.

1) Удельная массовая холодопроизводительность цикла:

$$q_0 = i_1 - i_{11} \quad (1)$$

2) Промежуточное давление p_m рассчитываем по уравнению

$$P_m = \sqrt{P_K P_0} \quad (2)$$

3) Удельная изэнтропная работа ступени I

$$l_s^I = i_2 - i_1 \quad (3)$$

4) Удельная изэнтропная работа ступени II

$$l_s^{II} = i_5 - i_4 \quad (4)$$

5) Массовый расход рабочего вещества в ступени I

$$G_a^I = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_0}{i_1 - i_{11}} \quad (5)$$

6) Массовый расход рабочего вещества в ступени II

$$G_a^{II} = \frac{G_a^I (i_8 - i_{10})}{i_8 - i_7} \quad (6)$$

7) Изэнтропная мощность компрессоров ступени I

$$N_s^I = G_a^I (i_2 - i_1) \quad (8)$$

8) Изэнтропная мощность компрессоров ступени II

$$N_s^{II} = G_a^{II} (i_5 - i_4) \quad (9)$$

9) Действительная объемная производительность компрессоров ступени I

$$V_d^I = G_a^I v_1 \quad (10)$$

10) Действительная объемная производительность компрессоров ступени II

$$V_d^{II} = G_a^{II} v_4 \quad (11)$$

11) Холодильный коэффициент теоретический

$$\varepsilon_T = \frac{Q_0}{N_s^I + N_s^{II}} \quad (12)$$

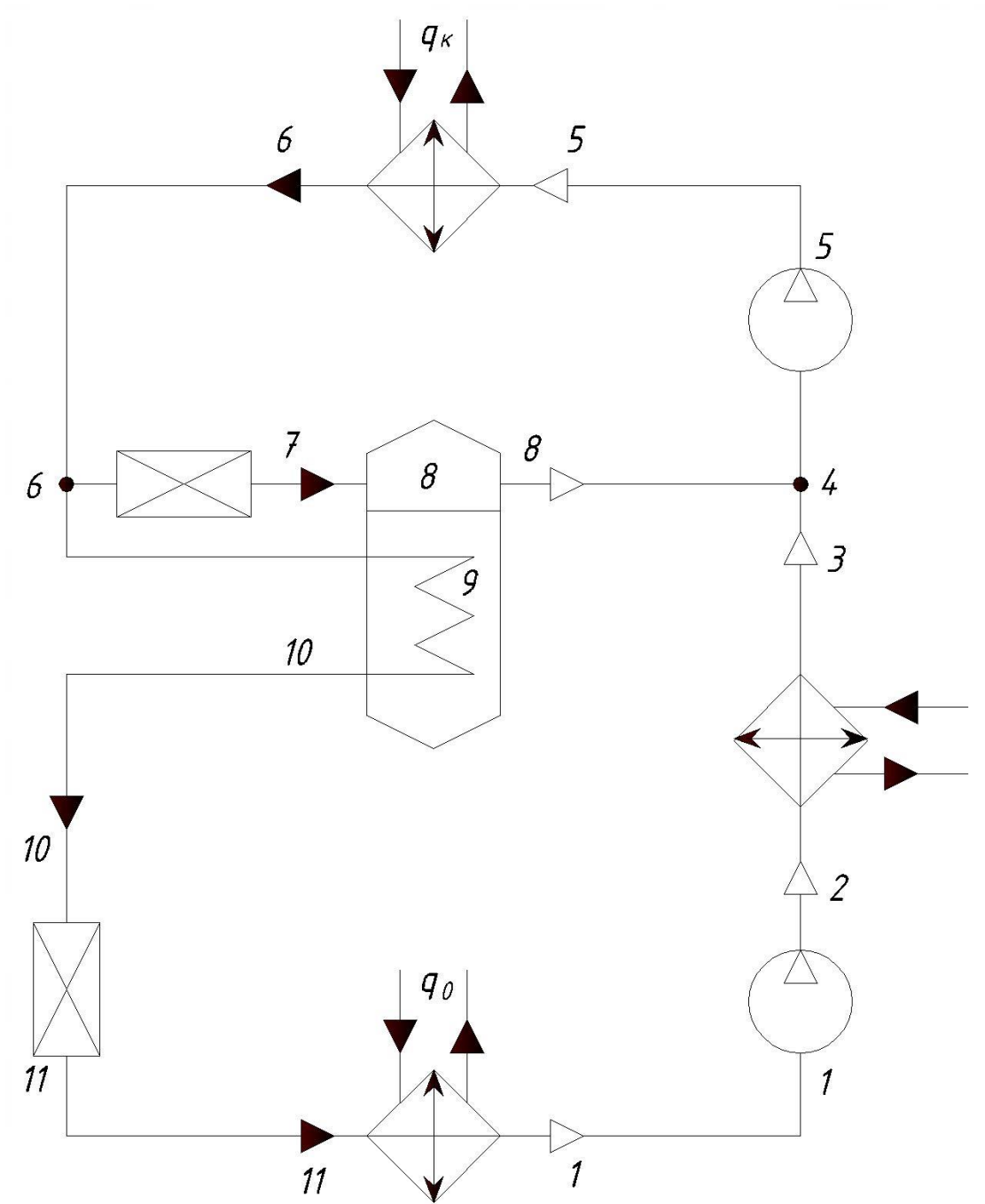


Рис. 9. Схема двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением

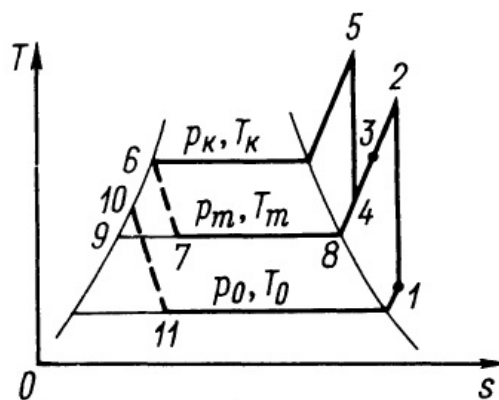


Рис.10. Цикл в T-S диаграмме

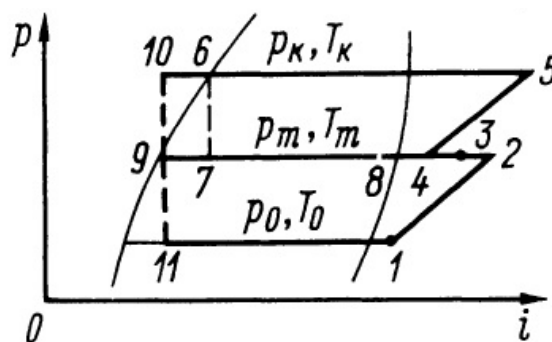


Рис.11. Цикл в p-i диаграмме

Таблица 10

$$t_0 = -5^{\circ}\text{C}$$

Параметры	Точки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P, МПа	0,236	0,474	0,474	0,474	0,951	0,951	0,474	0,474	0,474	0,951	0,236
T, К	278	298	293	290	325/321	318	285	285	285	313	268
i, кДж/кг	589,2	619,60	610,80	604,00	648,80	315,20	315,20	596,54	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	0,32	-	-	0,18	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 11

Параметры	Точки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P, МПа	0,167	0,399	0,399	0,399	0,951	0,951	0,399	0,399	0,399	0,951	0,167
T, К	268	288	284	281	325/321	318	276	276	276	313	258
i, кДж/кг	577,80	606,00	596,80	591,00	648,8	315,20	315,20	584,96	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	0,44	-	-	0,25	-	-	-	-	-	-	-

$$t_0 = -15^{\circ}\text{C}$$

Таблица 12

$$t_0 = -25^{\circ}\text{C}$$

Параметры	Точки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Р, МПа	0,115	0,331	0,331	0,331	0,951	0,951	0,331	0,331	0,331	0,951	0,115
Т, К	258	281	276	271	325/321	318	266	266	276	313	248
і, кДж/кг	565,60	594,80	587,60	580,40	648,80	315,20	315,20	572,02	300,95	300,95	300,95
ν, м ³ /кг	0,75	-	-	0,35	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 13

$$t_0 = -35^{\circ}\text{C}$$

Параметры	Точки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Р, МПа	0,076	0,269	0,269	0,269	0,951	0,951	0,269	0,269	0,269	0,951	0,076
Т, К	248	271	264	261	331/325	318	256	256	256	313	238
і, кДж/кг	551,20	581,20	575,00	566,80	657,20	315,20	315,20	559,78	300,95	300,95	300,95
ν, м ³ /кг	1,02	-	-	0,44	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 14

Параметры	Точки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Р, МПа	0,05	0,217	0,217	0,217	0,951	0,951	0,217	0,217	0,217	0,951	0,05
Т, К	238	261	253	250	331	318	245	245	245	313	228
і, кДж/кг	538	569,2	559,2	553,2	663,2	315,2	315,2	544,58	300,95	300,95	300,95
ν, м ³ /кг	1,59	-	-	0,78	-	-	-	-	-	-	-

$$t_0 = -45^{\circ}\text{C}$$

Таблица 15

	Т, К				
	228	238	248	258	268
q_0 , кДж/кг	288,25	276,85	264,65	250,25	237,05
l_s^I , кДж/кг	30,4	28,2	29,2	30	31,2
l_s^{II} , кДж/кг	44,8	57,8	68,4	90,4	110
G_a^I , кг/с	0,347	0,361	0,378	0,4	0,422
G_a^{II} , кг/с	0,364	0,38	0,399	0,423	0,448
N_s^I , кВт	10,55	10,19	11,03	11,99	13,16
N_s^{II} , кВт	16,33	21,98	27,28	38,23	49,29
V_d^I , м ³ /с	0,111	0,159	0,283	0,408	0,671
V_d^{II} , м ³ /с	0,066	0,095	0,140	0,186	0,349
ε_T	3,72	3,11	2,61	1,99	1,6

3.2. Тепловой расчет двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением

Отличие этой схемы от предыдущей состоит в том, что рабочее вещество ступени после охлаждения в промежуточном холодильнике 11 направляется до состояния сухого насыщенного пара (точка 4) и затем поступает в компрессор второй ступени III.

1) Удельная массовая холодопроизводительность цикла:

$$q_0 = i_1 - i_{10} \quad (1)$$

2) Промежуточное давление p_m рассчитываем по уравнению

$$P_m = \sqrt{P_k P_0} \quad (2)$$

3) Удельная изэнтропная работа ступени I

$$l_s^I = i_2 - i_1 \quad (3)$$

4) Удельная изэнтропная работа ступени II

$$l_s^{II} = i_5 - i_4 \quad (4)$$

5) Массовый расход рабочего вещества в ступени I

$$G_a^I = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_0}{i_1 - i_{10}}$$

6) Массовый расход рабочего вещества в ступени II

$$G_a^{II} = \frac{G_a^I (i_3 - i_9)}{i_4 - i_7}$$

7) Изэнтропная мощность компрессоров ступени I

$$N_s^I = G_a^I (i_2 - i_1) \quad (8)$$

8) Изэнтропная мощность компрессоров ступени II

$$N_s^{II} = G_a^{II} (i_5 - i_4) \quad (9)$$

9) Действительная объемная производительность компрессоров ступени I

$$V_d^I = G_a^I v_1 \quad (10)$$

10) Действительная объемная производительность компрессоров ступени II

$$V_d^{II} = G_a^{II} v_4 \quad (11)$$

11) Холодильный коэффициент теоретический

$$\varepsilon_T = \frac{Q_0}{N_S^I + N_S^{II}} (12)$$

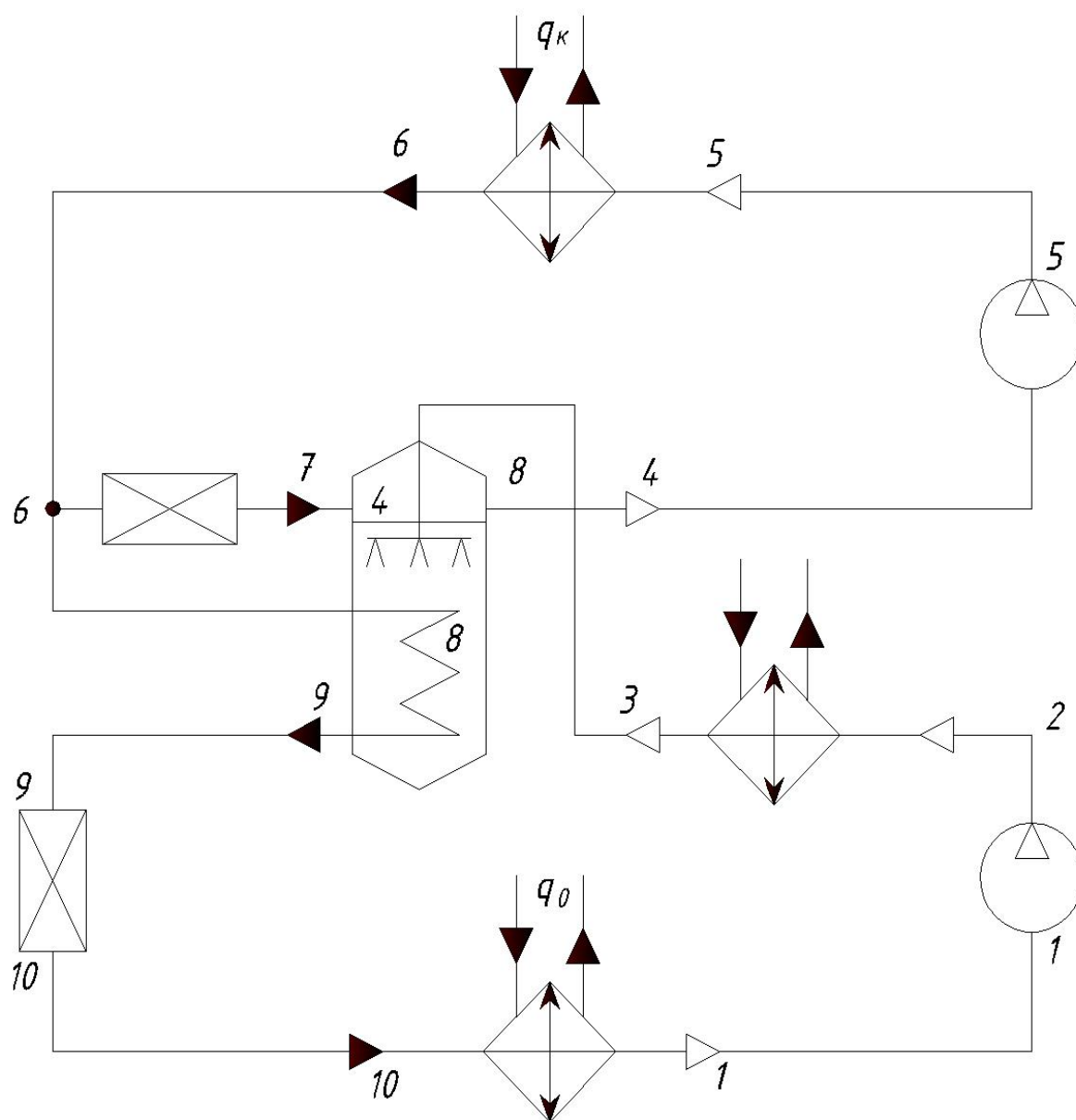


Рис. 12. Схема двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением

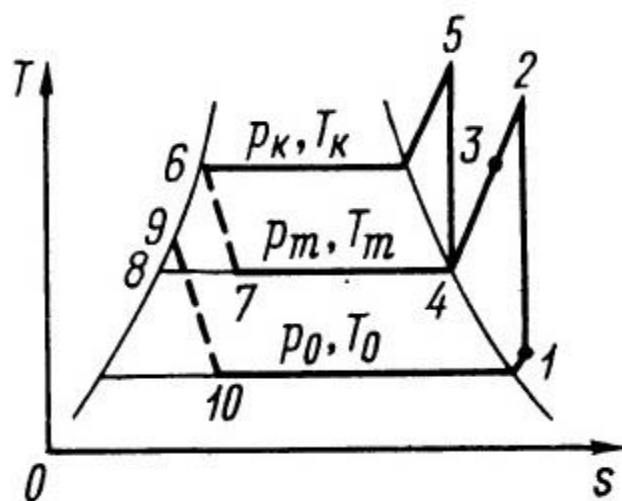


Рис. 13. Цикл в T-S диаграмме

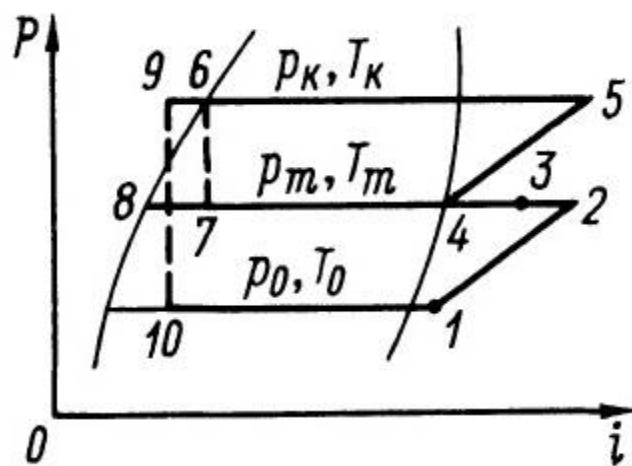


Рис. 14. Цикл в p-i диаграмме

Таблица 16

$$t_0 = -5^{\circ}\text{C}$$

Параметры	Точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p, МПа	0,236	0,474	0,474	0,474	0,951	0,951	0,474	0,474	0,951	0,236
T, К	278	298	293	290	323/321	318	285	285	313	268
i, кДж/кг	589,2	619,6	610,8	596,54	645,60	315,20	315,2	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	0,32	-	-	0,19	-	-	-	-	-	-

Таблица 17

Параметры	Точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Р, МПа	0,167	0,399	0,399	0,399	0,951	0,951	0,399	0,399	0,951	0,167
Т, К	268	288	283	281	323	318	276	276	313	258
i, кДж/кг	577,80	606,00	594,80	584,9	647,4	315,20	315,20	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	0,44	-	-	0,22	-	-	-	-	-	-

$$t_0 = -15^{\circ}\text{C}$$

Таблица 18

$$t_0 = -25^{\circ}\text{C}$$

Параметры	Точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Р, МПа	0,115	0,331	0,331	0,331	0,951	0,951	0,331	0,331	0,951	0,115
Т, К	258	281	276	266	323	318	266	276	313	248
i, кДж/кг	565,60	594,80	587,60	572	648	315,20	315,2	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	0,75	-	-	0,33	-	-	-	-	-	-

Таблица 19

$$t_0 = -35^{\circ}\text{C}$$

Параметры	Точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Р, МПа	0,076	0,269	0,269	0,269	0,951	0,951	0,269	0,269	0,951	0,076
Т, К	248	271	266	256	327/321	318	256	256	313	238
i, кДж/кг	551,20	581,20	577,40	566,80	650,80	315,20	315,20	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	1,02	-	-	0,46	-	-	-	-	-	-

Таблица 20

Параметры	Точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Р, МПа	0,05	0,217	0,217	0,217	0,951 338/32	0,951	0,217	0,217	0,951	0,05
Т, К	238	261	256	245	5	318	245	245	313	228
i, кДж/кг	538	569,2	562	544,58	655,20	315,2	315,2	300,95	300,95	300,95
v, м ³ /кг	1,59	-	-	0,8	-	-	-	-	-	-

$$t_0 = -45^{\circ}\text{C}$$

Таблица 21

	T, K				
	228	238	248	258	268
$q_0, \text{кДж/кг}$	288,25	276,85	264,65	250,25	237,05
$l_s^I, \text{кДж/кг}$	30,4	28,2	29,2	30	31,2
$l_s^{II}, \text{кДж/кг}$	49,06	62,5	46	84	110,62
$G_a^I, \text{кг/с}$	0,347	0,361	0,378	0,4	0,422
$G_a^{II}, \text{кг/с}$	0,382	0,394	0,422	0,439	0,48
$N_s^I, \text{кВт}$	10,55	10,19	11,03	11,99	13,16
$N_s^{II}, \text{кВт}$	17,02	22,575	28,717	33,566	46,665
$V_d^I, \text{м}^3/\text{с}$	0,111	0,159	0,283	0,408	0,671
$V_d^{II}, \text{м}^3/\text{с}$	0,073	0,087	0,139	0,202	0,384
ε_T	3,63	3,05	2,52	2,20	1,67

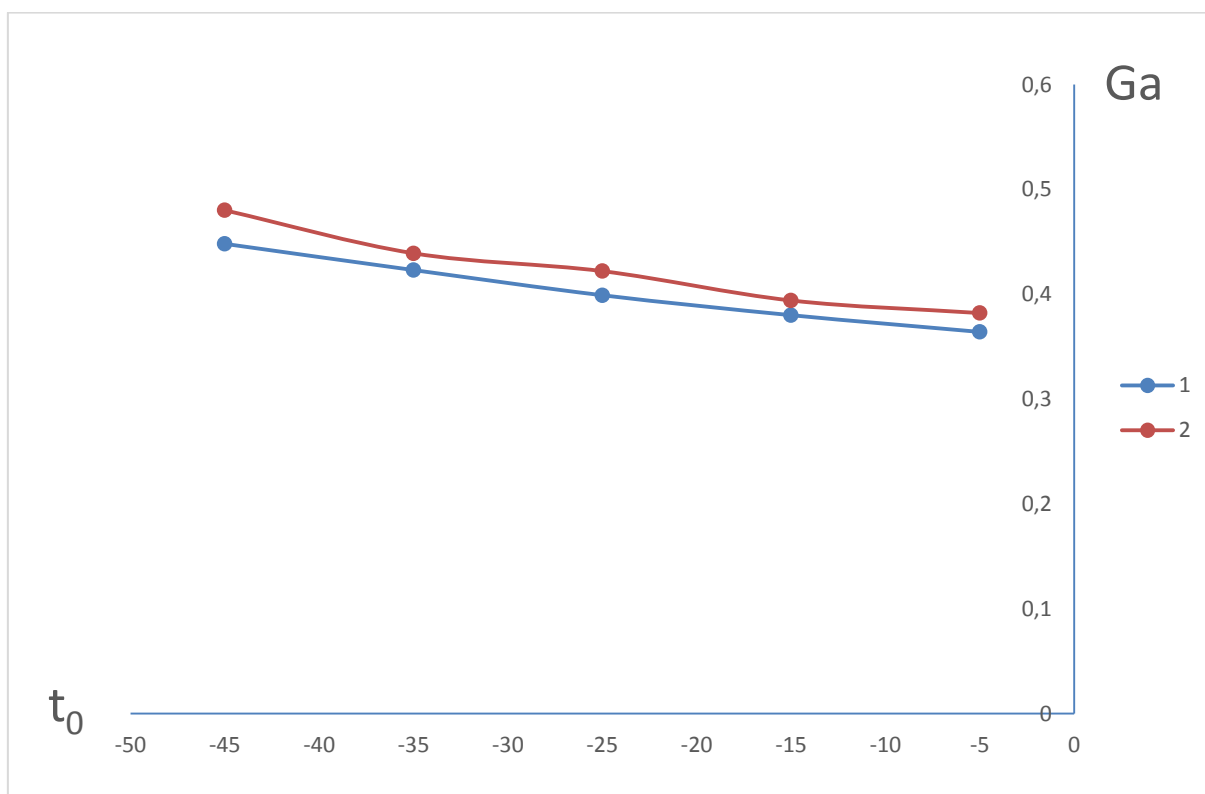


Рис. 15. Зависимость массового расхода от температуры кипения

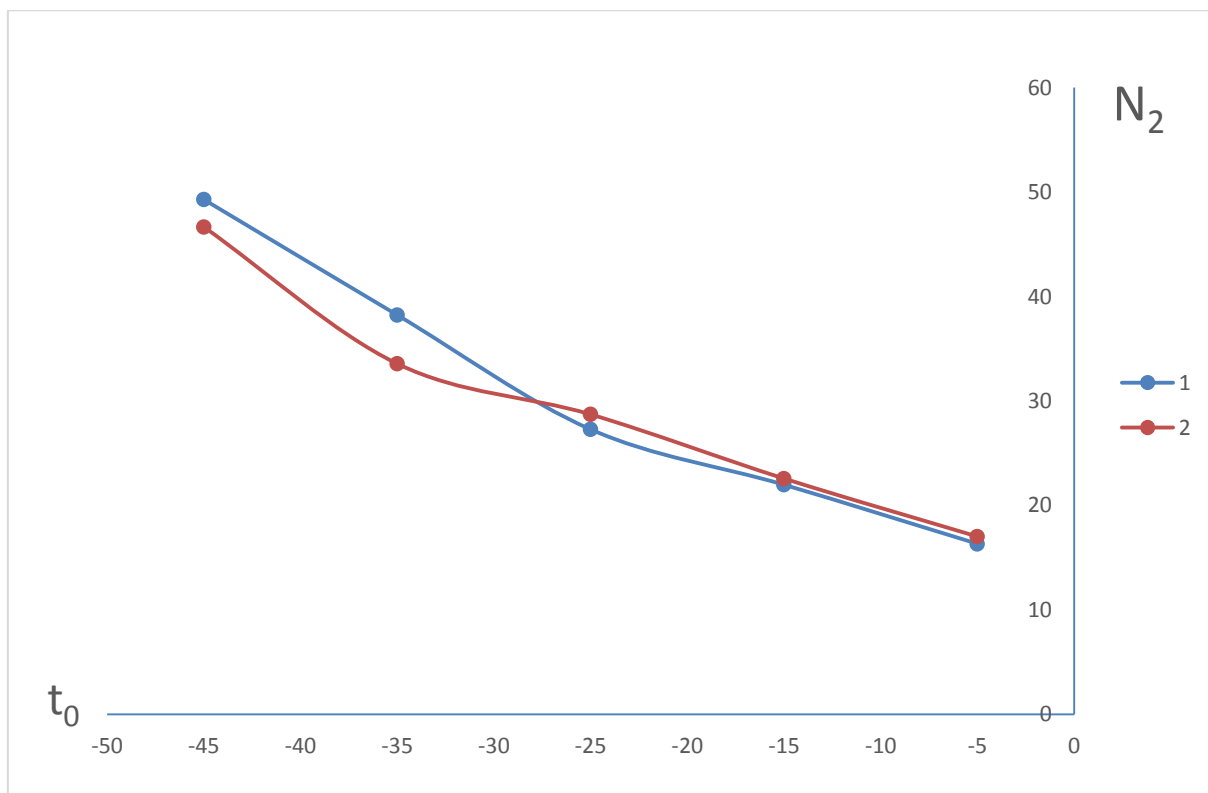


Рис. 16. Зависимость индикаторной мощности от температуры кипения

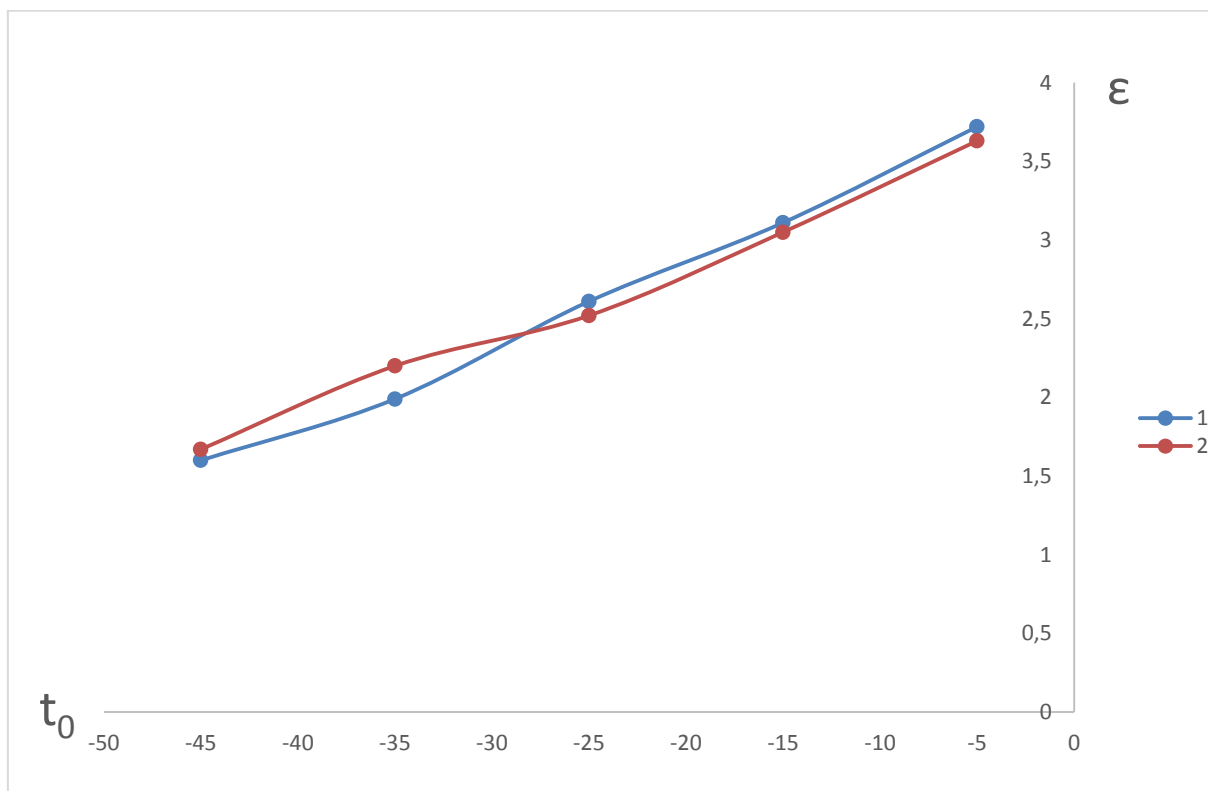


Рис. 17. Зависимость холодильного коэффициента от температуры кипения

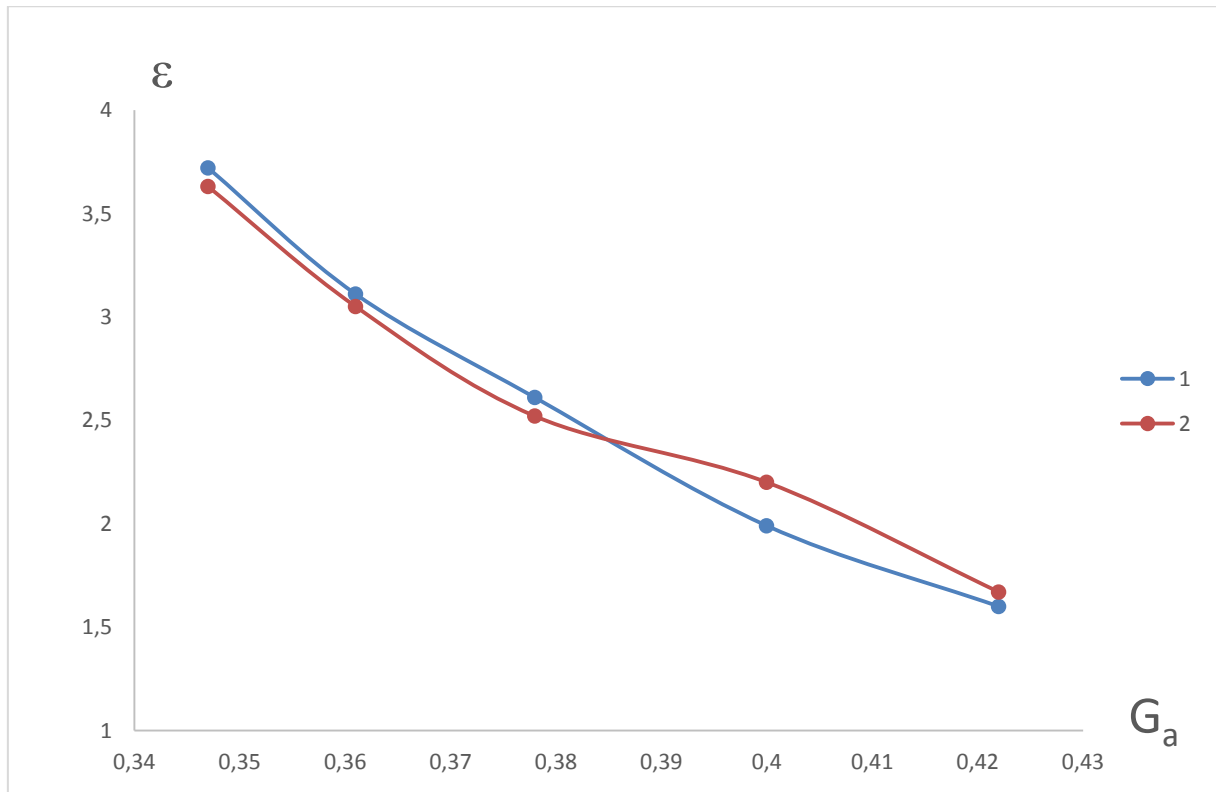


Рис. 18. Зависимость холодильного коэффициента от массового расхода

3.3. Эксергетический анализ двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением.

1) Удельное количество эксергии, подведенное к установке, по измерениям на зажимах электродвигателя компрессора

$$e'_{\text{BX}} = N'_s / G_a^I$$

$$e''_{\text{BX}} = N''_s / G_a^{II}$$

2) Электромеханические потери эксергии

$$d'_{\text{ЭМ}} = e'_{\text{BX}} - e'_{\text{BX}} \eta'_{\text{ЭМ}} = e'_{\text{BX}} (1 - \eta'_{\text{ЭМ}})$$

$$d''_{\text{ЭМ}} = e''_{\text{BX}} - e''_{\text{BX}} \eta''_{\text{ЭМ}} = e''_{\text{BX}} (1 - \eta''_{\text{ЭМ}})$$

3) Удельная эксергия, подводимая к компрессорам

$$e'_\text{B} = e'_{\text{BX}} - d'_{\text{ЭМ}}$$

$$e''_\text{B} = e''_{\text{BX}} - d''_{\text{ЭМ}}$$

4) Внутренние потери эксергии в компрессорах

$$d'_{\text{KM}} = e'_\text{B} - (e_2 - e_1) = \eta'_{\text{ЭМ}} e'_{\text{BX}} + e_1 - e_2$$

$$d''_{\text{KM}} = e''_\text{B} - (e_5 - e_4) = \eta''_{\text{ЭМ}} e''_{\text{BX}} + e_5 - e_4$$

$$e = i - i_{o.c} - T_{o.c}(s - s_{o.c}) = i - T_{o.c}s - (i_{o.c} - T_{o.c}s_{o.c})$$

6) Потеря эксергии в конденсаторе: эксергия, отданная хладагентом

$$\nabla e_{5-10} = e_5 - e_{10}$$

7) Потери эксергии в регулирующих клапанах (дресселях).

$$d'_{др} = e_6 - e_7$$

$$d''_{др} = e_{10} - e_{11}$$

8) КПД дресселя:

$$\eta'_{др} = \frac{e_7}{e_6}$$

$$\eta''_{др} = \frac{e_{11}}{e_{10}}$$

9) Потери эксергии в испарителе: эксергия отданная парами хладагента.

$$\nabla e_{1-11} = e_1 - e_{11}$$

$$\nabla e_{4-9} = e_4 - e_9$$

10) Коэффициент полезного действия компрессоров

$$\eta'_{км} = \frac{\Delta e_{2-1}}{e'_B}$$

$$\eta''_{км} = \frac{\Delta e_{5-4}}{e''_B}$$

Таблица 22

	-5	-15	-25	-35	-45
$e'_{вх}$	30,403	28,227	29,180	29,975	31,185
$e''_{вх}$	44,863	57,842	68,371	90,378	110,022
$d'_{эм}$	3,040	2,823	2,918	2,998	3,118
$d''_{эм}$	4,486	5,784	6,837	9,038	11,002
e'_B	27,363	25,404	26,262	26,978	28,066
e''_B	40,376	52,058	61,534	81,340	99,020
$d'_{км}$	-3,037	-2,796	-2,938	-3,022	-1,934
$d''_{км}$	85,176	96,298	128,404	171,560	207,670
∇e_{5-10}	298,71	299,97	298,35	307,11	312,03
$d'_{др}$	1,26	1,03	1,8	2,88	4,14
$d''_{др}$	1,44	1,62	2,52	3,6	5,13
$\eta'_{др}$	1,004	1,004	1,006	1,010	1,014
$\eta''_{др}$	1,005	1,005	1,008	1,012	1,017
∇e_{1-11}	240,91	229,15	217,13	202,37	189,8

∇e_{4-9}	256,16	256,99	232,74	218,87	205,99
η'_{KM}	1,111	1,1	1,112	1,112	1,112
η''_{KM}	1,11	0,847	1,087	1,109	1,097

3.4. Эксергетический анализ двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением

1) Удельное количество эксергии, подведенное к установке, по измерениям на зажимах электродвигателя компрессора

$$e'_{\text{BX}} = N'_s / G_a^I$$

$$e''_{\text{BX}} = N''_s / G_a^{II}$$

2) Электромеханические потери эксергии

$$d'_{\text{ЭМ}} = e'_{\text{BX}} - e'_{\text{BX}} \eta'_{\text{ЭМ}} = e'_{\text{BX}} (1 - \eta'_{\text{ЭМ}})$$

$$d''_{\text{ЭМ}} = e''_{\text{BX}} - e''_{\text{BX}} \eta''_{\text{ЭМ}} = e''_{\text{BX}} (1 - \eta''_{\text{ЭМ}})$$

3) Удельная эксергия, подводимая к компрессорам

$$e'_\text{B} = e'_{\text{BX}} - d'_{\text{ЭМ}}$$

$$e''_\text{B} = e''_{\text{BX}} - d''_{\text{ЭМ}}$$

4) Внутренние потери эксергии в компрессорах

$$d'_{\text{KM}} = e'_\text{B} - (e_2 - e_1) = \eta'_{\text{ЭМ}} e'_{\text{BX}} + e_1 - e_2$$

$$d''_{\text{KM}} = e''_\text{B} - (e_5 - e_4) = \eta''_{\text{ЭМ}} e''_{\text{BX}} + e_5 - e_4$$

$$e = i - i_{\text{o.c}} - T_{\text{o.c}}(s - s_{\text{o.c}}) = i - T_{\text{o.c}}s - (i_{\text{o.c}} - T_{\text{o.c}}s_{\text{o.c}})$$

6) Потеря эксергии в конденсаторе: эксергия, отданная хладагентом

$$\nabla e_{5-9} = e_5 - e_9$$

7) Потери эксергии в регулирующих клапанах (дросселях).

$$d'_{\text{др}} = e_6 - e_7$$

$$d''_{\text{др}} = e_9 - e_{10}$$

8) КПД дросселя:

$$\eta'_{\text{др}} = \frac{e_7}{e_6}$$

$$\eta''_{\text{др}} = \frac{e_{10}}{e_9}$$

9) Потери эксергии в испарителе: эксергия отданная парами хладагента.

$$\nabla e_{1-10} = e_1 - e_{10}$$

$$\nabla e_{4-8} = e_4 - e_8$$

10) Коэффициент полезного действия компрессоров

$$\eta'_{\text{км}} = \frac{\Delta e_{2-1}}{e'_\text{в}}$$

$$\eta''_{\text{км}} = \frac{\Delta e_{5-4}}{e''_\text{в}}$$

Таблица 23

	-5	-15	-25	-35	-45
$e'_{\text{вх}}$	30,403	28,227	29,180	29,975	31,185
$e''_{\text{вх}}$	44,863	57,842	68,371	90,378	110,022
$d'_{\text{эм}}$	3,040	2,823	2,918	2,998	3,118
$d''_{\text{эм}}$	4,486	5,784	6,837	9,038	11,002
$e'_\text{в}$	27,363	25,404	26,262	26,978	28,066
$e''_\text{в}$	40,376	52,058	61,534	81,340	99,020
$d'_{\text{км}}$	-3,037	-2,796	-2,938	-4,373	-3,134
$d''_{\text{км}}$	88,176	112,884	136,184	163,990	208,380
∇e_{5-9}	295,69	297,85	298,66	301,5	304,93
$d'_{\text{др}}$	1,26	2,61	1,8	2,88	4,14
$d''_{\text{др}}$	1,004	1,009	1,006	1,010	1,014
$\eta'_{\text{др}}$	1,44	1,62	2,52	3,62	5,58
$\eta''_{\text{др}}$	1,005	1,006	1,008	1,012	1,018
∇e_{1-10}	240,91	229,15	217,13	202,37	189,8
∇e_{4-8}	256,16	237,96	225,87	220,85	199,62
$\eta'_{\text{км}}$	1,111	1,110	1,111	1,162	1,112
$\eta''_{\text{км}}$	1,110	1,175	1,213	1,016	1,104

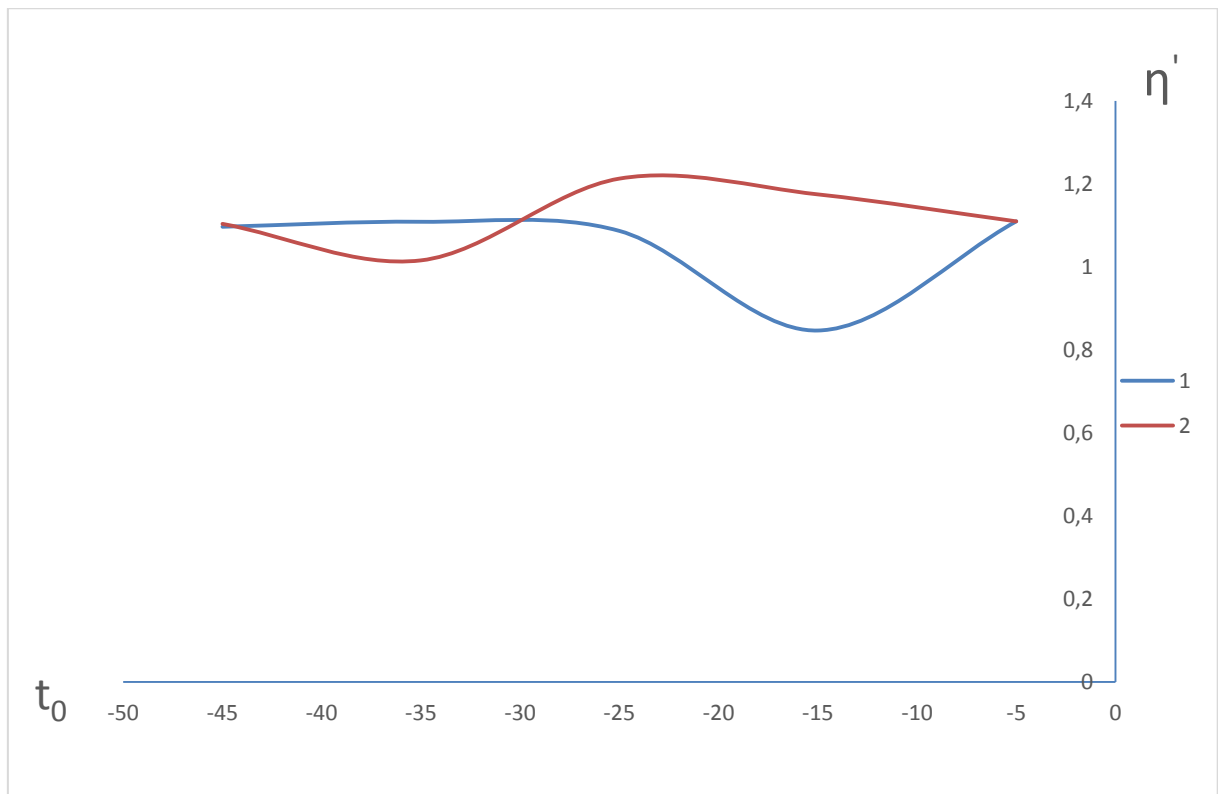


Рис. 19. Зависимость КПД компрессора от температуры кипения

Заключение

В настоящей диссертационной работе был рассмотрен один из теоретических методов прогнозирования термодинамических свойств рабочих веществ холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования. Были рассмотрены методы теоретического прогнозирования термодинамических свойств как для однокомпонентных так и для много компонентных, смесей хладагентов. Проанализирована работа 2 – х ступенчатых машин с неполным и полным промежуточными охлаждениями.

В заключении проведенного нами исследования можно сделать следующие основные выводы по теме.

1) Используя унифицированную базовую систему обобщенных уравнений были рассчитаны свойства однокомпонентных углеводородных хладагентов пропана и бутана с достаточной точность при этом погрешность не превысила 5%.

2) Был произведен проверочный расчет смеси хладагентов (R410) по правилу аддитивности. Расчет произведенный по правилу аддитивности показал, что этот метод расчета удобен при прогнозировании термодинамических свойств веществ много компонентных смесей хладагентов. Отклонения расчетных и опытных значений в среднем не превысила и 2% для значений энтальпий, для показателей давления погрешность не превысила 5%.

3) Используя правило аддитивности был произведен расчет углеводородной смеси хладагентов пропан – бутан (40/60). Были получены значения энтальпий в жидкой и газовых фазах.

4) Был произведен тепловой расчет 2-х ступенчатых холодильных машин с неполным и полным промежуточными охлаждениям.

5) Произведен эксергетический анализ обеих машин

Список использованной литературы.

1. Мирзиёев Ш.М. Эркинвафаровон, демократик Ўзбекистон давлатини биргаликда барпо этамиз. Ўзбекистон Республикаси Президентининг лавозимга киришиш тантанали маросими га бағишланган Олий Мажлис палаъаларининг кўшма мажлиси даг инутқи. – Т.: “Ўзбекистон” НМИУ, 2016. – 56 б.
2. Мирзиёев Ш.М. Қонун устави рлиги ва инсон манфаатларини таъминлаш – юрт тараққиёти ва халқ фаровонлигининг гарови. Ўзбекистон Республикаси Конституцияси қабул қилинганинг 24 йиллигига бағишланган тантанали маросимдаги маъруза 2016 йил 7 декабрь. Т.: “Ўзбекистон” НМИУ, 2016. - 48б.
3. Мирзиёев Ш.М. Буюк келажакимизни мард ва олижаноб халқимиз билан бирга курамиз. “Ўзбекистон” НМИУ, 2017. - 488б.
4. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида. - Т.: 2017 йил 7 февраль, ПФ-4947-сон фармони.
5. UNEP. Montreal protocol on substances that delete the ozone layer. Final act: date 16 September 1987.-6 p.
6. UNEP. Montreal protocol on substances that delete the ozone layer. As adjusted and amended by the second meeting of the parties: London. – 1990.
7. Справочник по международным договорам по охране озонового слоя: Венская конвенция (1985), Монреальский протокол (1987), Шестое издание (2003)-ISBN:92-807-2316. – ЮНЕП, 2003.
8. Клименко В. В., Терешин А. Г. Монреальский протокол и проблемы глобального потепления климата планеты//Холодильная техника. — 1996. — №5.-С. 15-17.

9. Закон Республики Узбекистан “Об охране атмосферного воздуха” – подписан президентом Республики Узбекистан И. Каримов г. Ташкент, 27 декабря 1996 г., № 353-І.
10. Постановление кабинета министров Республики Узбекистан “О мерах по выполнению международных обязательств республики Узбекистан по договорам в области защиты озонового слоя” - г. Ташкент 24 января 2000 г. № 20. Председатель Кабинета Министров И. Каримов.
11. Постановление кабинета министров Республики Узбекистан “О совершенствовании регулирования ввоза в республику Узбекистан и вывоза из республики Узбекистан озоноразрушающих веществ и продукции их содержащей” – г. Ташкент 11 ноября 2005 г. № 247. Премьер-министр Республики Узбекистан Ш. Мирзияев.
12. Цветков О.Б. Холодильные агенты. – СПб: СПбГУНиПТ, 2003. – 216 с.
13. Цветков О.Б. Аммиак - экологически безопасный холодильный агент // Холодильная техника. – 2000. – № 3. – С. 8–9.
14. Фадеков К.Н. Применение смесевых зеотропных хладагентов для повышения энергетической эффективности бытовых холодильников.
15. Цветков О.Б. Хладагенты и экологическая безопасность // Холодильная техника. – 1997. – № 1. – С. 20–22.
16. Цветков О.Б. Холодильные агенты: XX век и великая холодильная революция // Холодильная техника. – 2000. – № 1. – С. 7–9.
17. Переход на озонобезопасные хладагенты в условиях России / И. М. Калнинь, В. В. Катерухин, И. К. Савицкий и др. // Холодильная техника. — 1997. — № 1. — С. 17-19.
18. Цветков О.Б. Холодильные агенты на посткиотском экологическом пространстве // Холодильная техника. – 2012. – № 1. – С. 70-72
19. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1972.

20. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes; chlorine atoms catalyzed destruction of ozone// Nature. – 1974. – Vol. 249. – P. 810–814.
21. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. Гидрофторуглероды – в индустрии холода после 2012 года// Холодильная техника. – 2012. – № 3. – С. 32–34; № 4. – С. 6–8.
22. Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E. The properties of gases and liquids. 4 ed. New York: McGraw Hill, 1987.
23. Подчерняев О. Н. Характеристики озонобезопасных хладагентов, альтернативных R502 и R1122//Холодильная техника. — 1998. — № 3. — С. 10—
24. Перельштейн И.И., Парушин Е.Б. Обобщенные температурные зависимости для давления насыщенных паров и плотности кипящей жидкости // Термодинамические свойства важнейших рабочих веществ холодильных машин. М.: ВНИИХИ, 1976.
25. Перельштейн И.И., Парушин Е.Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. - М.: Легкая промышленность и пищевая промышленность, 1984.
26. Перельштейн И.И. Исследование термодинамических свойств холодильных агентов. М.: Госторгиздат 1962.
27. Перельштейн И.И., Рура Е.Н. Базовая система обобщенных уравнений для расчета и прогнозирования термодинамических свойств хладагентов // Холодильная техника. 1995. №1. С. 19-22
28. Перельштейн И.И., Прогнозирование теплофизических свойств рабочих веществ // Холодильная техника. 1990, № 12.
29. Лавренченко Г.К. Формирование оптимальных многокомпонентных рабочих тел для дроссельных рефрижераторов. - Холодильная техника и технология, Киев: Техника. - 1982. - Вып.34. С.69 - 77.

30. Лавретченко Г.К., Артеменко Н.И., Валякин В.Н. Термодинамический анализ циклов холодильных машин, использующих неазеотропные смеси веществ // Холодильная техника и технология. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - 1984. - Вып.38.
31. Лавретченко Г.К., Проценко А.В. Термодинамическая эффективность дроссельного цикла на многокомпонентных рабочих телах // Холодильная техника и технология. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - 1981. - Вып.33. - С.47 - 50.
32. Мусаев А.А., Бродянский В.М., Боярский М.Ю. Экспериментальное исследование низкотемпературной холодильной установки, работающей на смеси хладагентов // Холодильная техника. - 1978. - №12. - С.10 - 14.
33. Чагина М.А., Силина Л.Б. Проблема разработки смазочных масел для озонобезопасных хладагентов // Холодильная техника. - 1991. - № 10. - С.5 - 8.
34. Ambrosino, J.- L. De non-veaux fluéigés frigorigents: les mélanges nonazeotropiques. - Revue Generale du Froid. - 1986. - № 12. - pp.615-620.
35. Saluja, S.N. Operation characteristics mixed refrigerants in vapor compression system. - Refrigerating and conditioning. - 1978. - № 3. - pp.80-86.
36. Saluja, S.N. Operation characteristics mixed refrigerants in vapor compression system. - Refrigerating and conditioning. - 1978. - № 3. - pp.80-86.
37. Экология и холодильная техника/ Б.С. Бабакин, К.В., К.В. Показеев, В.А. Выгодин, Т.О. Чаплина. – М.: ДеЛипринт, 2009. – 532 с.
38. Ларин И.К. Фреоны и озоновый слой Земли // Холодильная техника. – 2002. – № 1. – С. 34–37.
39. Цветков О.Б. Хладагенты и окружающая среда// Холодильная техника. – 2013. – № 1. – С.4–7.

40. Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Периодические изменения энергетического баланса и криосферы Земли под воздействием долговременных вариаций солнечной постоянной // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 41–44.
41. Афанасьева И. А., Лунин А. И. Применение озонобезопасных смесевых хладагентов в бытовых холодильных приборах // Холодильная техника. — 1997. - № 3. - С. 5-7.
42. Цветков О.Б. Климатические доминанты альтернатив ГХФУ-хладагентов // Холодильная техника. – 2012. – № 6. – С. 4–6.
43. Б.Н. Максимов, В.Г. Барабанов, И.Л. Се- рушкин, В.С. Зотиков, И.А. Семерикова, В.П. Степанов, Н.Г. Сагайдакова, Г.И. Каурова. – Промышленные фторорганические продукты/ - СПб.: Химия, 1996. – 544 с.
44. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. Энергосбережение в холодильной технике и проблемы эко- логии – развитие и перспективы // Вестник Международной академии холода. 2011. № 2. С. 3–9.
45. Мензер М., Мур Э. Замена HCFC: опыт США в области кондиционирования воздуха и холодильной техники // Холодильное дело. — 1996. — № 5-6. - С. 4-5.
46. Каримов К.Ф. Исследование холодильной машины на озонобезопасном холодильном агенте // Тезисы докладов XI Международной научно-технической конференции «Научные химические технологии-2006». Самара. Россия. 16-20 октября 2006 г. Том II. С.135-136.
47. Клименко А.П. Сжиженные углеводородные газы. – Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. Москва 1962 г.
48. Перельштейн И.И., Анисимов В.Н., Горыкин С.Ф. Прецизионное описание и прогнозирование термических свойств смесей // Холодильная техника. 1994, № 1.

49. Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. А. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Агро- промиздат, 1985. — 208 с.
50. 2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)
51. Thermodynamic Properties of DuPont Suva 410A Refrigerant– 2004
52. Кошкин Н. Н., Стукаленко А. К., Бухарин Н. Н. и др. – Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин. Под ред. Кошкина Н. Н.Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.) - 1976 г. - 464 стр, ил.
53. Кошкин Н.Н., И.А. Сакун и др. – Холодильные машины. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.) – 1985
54. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. – Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с., ил.
55. Мартыновский В.С. Анализ действительных термодинамических циклов. – М.: Энергия, 1972. – 216 с.
56. Мартынов А.В. – Установки для трансформации тепла и охлаждения
57. Бродянский В.М. – Эксергетический метод термодинамического анализа. М., “Энергия”, 1973.