

Автор ер,  
К 89

Входящий № 1638  
19/IV-652

МИНИСТЕРСТВО  
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

---

*Т. С. Сидорова*

**А. П. КУЗНЕЦОВ**

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕАЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ АГЕНТОВ  
В КОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИНАХ**

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

Научный руководитель —  
доктор технических наук,  
профессор В. С. Мартыновский

ОДЕССА—1965

МИНИСТЕРСТВО  
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

---

А. П. КУЗНЕЦОВ

Переучет 1984 г.

ПРИМЕНЕНИЕ  
НЕАЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ АГЕНТОВ  
В КОМПРЕССИОННЫХ  
ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИНАХ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
доктор технических наук,  
профессор В. С. Мартыновский

V000679

Одесский технологический  
институт  
им М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

ОДЕССА--1965

Одесский технологический институт пищевой и холодильной промышленности направляет Вам для отзыва настоящий автореферат диссертации тов. А. П. Кузнецова на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Работа выполнена в 1960—1963 г.г. в научно-исследовательской лаборатории кафедры холодильных машин Одесского технологического института пищевой и холодильной промышленности.

Отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направить в Совет института по адресу: г. Одесса, Петра Великого, 1/3.

Защита состоится в 14<sup>30</sup> час. 20 мая 1965 г.

в 15 IV 1965 г., № 03-182, Ученый секретарь

Совета.

*Мезг*  
*У. В. З. Жаран*

## ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в холодильной технике в значительной степени связан с изысканием новых рабочих тел, использование которых позволит наиболее рационально решить разнообразные эксплуатационные и техно-экономические требования к холодильным машинам.

Наряду с работами проводимыми в СССР и других странах по теоретическому и экспериментальному исследованию свойств новых рабочих веществ, в последнее время проявляется интерес к проблемам практического использования различных смесей известных агентов.

В области азеотропных смесей некоторых агентов выполнен ряд работ, и такие смеси уже находят практическое применение. Значительно меньше исследованы неазеотропные (растворимые и нерастворимые) смеси агентов и четко не определены области их наиболее эффективного использования.

Перспективность применения неазеотропных смесей наряду с чистыми агентами может быть по достоинству оценена, если учесть следующее: а) применение смесей агентов расширяет номенклатуру рабочих веществ, что увеличивает возможности унификации холодильного оборудования; б) использование смесей агентов может улучшить энергетические характеристики машин при необходимости осуществления изотермических процессов отвода тепла; в) в одноступенчатых холодильных машинах возможно осуществлять низкотемпературные циклы без вакуума в испарителе; г) регулируя состав рабочей смеси, можно обеспечить оптимальные условия работы одноступенчатого компрессора в широком диапазоне холодопроизводительностей и температур в испарителе; д) можно получить одновременно несколько температурных уровней в соответствующих испарителях при одном и том же давлении; е) применяя вместо чистого агента смеси агентов, представляется возможным повысить холодопроизводительность обыч-

ной парокомпрессионной установки, либо снизить температурный уровень в испарителе (соответственно: при той же температуре кипения, или при том же давлении в испарителе).

Данная диссертация относится, главным образом, к вопросам теоретического и экспериментального исследования компрессионных машин, работающих на ряде взаиморастворимых бинарных неазеотропных смесей фреонов — Ф-12, Ф13, Ф22 и включает в себя: 1) обзор зарубежной и отечественной литературы по проблемам использования смесей холодильных агентов; 2) определение специфики термодинамического поведения некоторых бинарных смесей агентов и использование их в холодильной технике; 3) исследование термодинамических свойств смесей агентов Ф12-Ф13 и Ф12-Ф22; 4) рассмотрение особенностей равновесных и неравновесных процессов фазовых превращений бинарных неазеотропных смесей; 5) схемы и циклы холодильных машин, работающих на неазеотропных смесях агентов; 6) расчетные характеристики некоторых машин; 7) результаты экспериментальных исследований простого и сложного биагентных циклов; 8) некоторые вопросы контроля концентрации рабочей смеси; 9) построение номограмм рабочих параметров низкотемпературной машины, работающей на смеси Ф12-Ф13; 10) приложения: библиография, таблицы к построению диаграмм, номограмм, протоколы испытаний и др.

#### Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЗАДАЧ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕСЕЙ АГЕНТОВ В ХЛАДОТЕХНИКЕ

Идея применения смесей агентов в компрессионной холодильной машине принадлежит Р. Пикте, который еще в 1885 г. высказал мысль о том, что смесь может иметь лучшие термодинамические свойства, чем ее компоненты. Предложенная Р. Пикте в качестве примера смесь  $\text{CO}_2$ — $\text{SO}_2$  оказалась неудачной, что вскоре было подтверждено исследованиями А. Блюмке (1888 г.).

Почти 45 последующих лет никто из исследователей не возвращался, как тогда считали, к «порочной идее Р. Пикте». Лишь в 1933 г. А. Страделли вновь проводит ряд теоретических исследований с целью выяснения работоспособности смесей агентов в компрессионных машинах.

В 1939 г. Г. Мэйури, по-видимому, был первым, кто оценил одно из преимуществ неазеотропных смесей, состоящее в

их способности кипеть при данном давлении в определенном температурном интервале.

Модифицированный способ применения смесей холодильных агентов был описан в 1947 г. М. Руэманом, который хотел показать применимость неазеотропной смеси для получения низких температур ( $\approx -90^\circ\text{C}$ ) в одноступенчатом цикле.

В 1949 г. Ф. Карр и позже (1953 г.) Г. Хассельден и Л. Клибек привели существенные доводы (теоретически и экспериментально) в пользу применения смесей агентов для реализации процессов неизотермического охлаждения, что позволяет существенно экономить энергию по сравнению с использованием чистых агентов для тех же целей.

В 1950 г. К. Эшли публикует свойства азеотропной смеси «Каррен-7».

В 1952 г. Л. М. Розенфельд впервые рассмотрел рабочие процессы компрессионной холодильной машины с раствором в качестве рабочего тела, а также предложил методику построения энтропийных диаграмм бинарных смесей.

В 1954 г. А. П. Клименко предложил однопоточный цикл глубокого охлаждения, результаты экспериментального исследования которого были опубликованы в 1956 г. Г. И. Высоцким. В институте газа АН УССР было также экспериментально показано, что смесь углеводородов может успешно применяться как холодильный агент.

В патенте Британской компании «Йорк Шипли Лимитид» (1957 г.) была изложена сущность регулирования холодопроизводительности и др. параметров машины, работающей на неазеотропной смеси агентов.

Д. Нагаока и С. Такаги (1959 г.) на основании обширных исследований получили свойства смесей фреонов (Ф12—Ф11, Ф12—Ф21) как рабочих тел холодильных машин.

В 1958—1959 г.г. А. И. Лавочник в своих работах показывает рациональность использования некоторых смесей вместо чистых агентов. Значительный интерес представляют взаимонерастворимые (в испарителе) смеси агентов для получения более низких температур.

В 1959—1960 г.г. Г. Лефлер, Г. Мандель и др. опубликовали результаты исследований взаимной растворимости некоторых смесей фреонов с минеральными маслами.

На перспективность применения смесей агентов в холодильной технике в некоторых своих работах указывают Р. Планк и И. Куприянов.

Приведенные здесь данные показывают, что с каждым годом интерес к проблемам применения смесей возрастал.

Начиная с 1959—1960 г.г., кроме работ, проводимых в СССР (ВНИИХ, ОТИПХП, ЛТИХП, ЦКБХМ и др.), аналогичными проблемами по смесям агентов начали активно заниматься в США (Р. Мак-Гарнесс, Д. Чипмен — 1962 г.), ФРГ (Х. Швинд — 1962 г.) и др. странах.

Обзор основных литературных источников по проблемам смесей показывает, что за период с 1885 по 1964 г.г. все же было мало реализовано работ, дающих положительный эффект, хотя заманчивых идей было много.

Для возможностей практического использования смесей агентов как рабочих тел холодильных машин в данной главе даются рекомендации основных направлений исследований в этой области.

## Глава II. СПЕЦИФИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НЕКОТОРЫХ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ АГЕНТОВ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Специфика обратных круговых процессов, совершаемых при посредстве смесей агентов, базируется на основных положениях теории растворов.

В принципе, для получения того или иного холодильного эффекта возможно формировать различные бинарные смеси агентов, в чем и состоит их одно из главных достоинств.

Азеотропные смеси (равнокипящие) могут иметь более высокую объемную холодопроизводительность, более низкую температуру кипения при том же давлении, обладать растворимостью со смазочными маслами и отличаться лучшими конструктивно-эксплуатационными показателями по сравнению со свойствами компонентов данной смеси или другими чистыми веществами.

Неазеотропные смеси (взаимосмесимые) в отличие от азеотропных обладают неизотермичностью в процессах фазовых превращений (при  $P = \text{const.}$ ), что дает возможность осуществить более обратимый процесс теплообмена в противоточных аппаратах некоторых холодильных установок.

Кроме того, неазеотропные смеси позволяют реализовать новые низкотемпературные циклы, благодаря возможности их фракционного разделения в самой холодильной установке.

Неазеотропные растворы с зоной несмешиваемости в области низких давлений представляют собой

моновариантные системы, для которых температура кипения лежит ниже температур кипения компонентов (при данном  $P$ ). Применение таких смесей должно привести к снижению отношения давлений  $\frac{P_k}{P_0}$  и расширить возможности использования одноступенчатых компрессоров для получения низких температур.

## Глава III. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ Ф12—Ф13 и Ф12—Ф22

Так как использование бинарных смесей агентов в компрессионных машинах в общем случае не исключает применения в них процессов ректификации, дефлегмации и др., то представляется наиболее удобной диаграмма «концентрация—энтальпия» ( $\xi - i$ ), с помощью которой наглядно изображаются как обычные, так и специфические процессы биагентных холодильных машин.

### Диаграмма $\xi - i$ смеси фреон 12 — фреон 13

Не известна еще ни одна из неазеотропных смесей фреонов, которая была бы столь подробно исследована и давала возможность построить диаграмму состояния на основе опытных данных.

Отсутствие таких данных для смеси Ф12—Ф13 вынуждает применять к этой системе законы идеальных растворов.

По Ван-Лаару, молярная теплота смешения мала или равна нулю в том случае, если критические давления компонентов смеси близки или равны друг другу. Близость критических давлений для Ф12 ( $40,87 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2$ ) и Ф13 ( $39,46 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2$ ) указывает на то, что данная смесь будет обладать небольшой теплотой растворения. В пользу идеальности раствора  $\text{CF}_2\text{CL}_2 - \text{CF}_3\text{CL}$  говорят и другие доводы: компоненты имеют сходную структуру молекул, близкие молекулярные веса, химически индифферентны и др.

То, что смесь Ф12—Ф13 состоит из термодинамически подобных компонентов, также свидетельствует весьма близкое значение для них критериев Гульдберга ( $G_u = \frac{T_s}{T_{кр}}$ ) и Менделеева ( $Me = \lg P_{кр}$ ), которые, по И. С. Бадылькесу, являются важными критериями подобия веществ.

Принимая к сведению, что смесь Ф12—Ф13 является идеальным гомогенным раствором, пользуясь уравнениями законов Рауля и Дальтона, получаем зависимость между мольным составом  $N'$  жидкого раствора и мольным составом  $N''$  пара при данной температуре  $T$ :

$$N'' = \frac{N' \cdot P_2^0 / P_1^0}{1 + N'(P_2^0 / P_1^0 - 1)}$$

Полученные таким образом равновесные концентрации были использованы для построения диаграммы  $N$ — $P$ , которая с помощью изобарических сечений перестроена в диаграмму  $N$ — $T$ .

Изотермы в паровой фазе в диаграмме  $N$ — $i$  представляют собой прямые линии, уравнением которых является:

$$i = (1 - N)i_1 + N \cdot i_2,$$

где  $i_1$ ,  $i_2$  — энтальпии чистых компонентов при данной температуре и давлении.

В области, далекой от критической, энтальпия пара для Ф12 мало зависит от давления и выбиралась только по температуре на линии насыщения.

Для Ф13 энтальпия выбиралась с учетом давления, так как при рассматриваемых температурах Ф13 находился близко к критической точке.

Изотермы жидкой фазы раствора представляют собой также прямые линии, потому что теплоту смешения компонентов в жидкой фазе мы положили равной нулю.

Построение изобарных кривых в диаграмме  $N$ — $i$  проводили с использованием диаграммы  $N$ — $T$ , которая содержит изобары  $0,2 \div 16$  ата и охватывает интервал температур  $-120 \div 29^\circ\text{C}$ .

### Диаграмма $\xi$ — $i$ смеси Ф12—Ф22

Смесь Ф12—Ф22 по известным признакам не может быть отнесена к идеальному раствору и для построения диаграммы необходимо было располагать опытными данными.

Нами были использованы наиболее обширные опытные данные Лефлера, в работе которого даны значения давления в зависимости от концентрации Ф22 в жидкой фазе для интервала концентрации  $0 \div 100\%$  в интервале температур  $-80 \div +50^\circ\text{C}$ . В работе Лефлера отсутствуют данные по равновесным концентрациям в паровой фазе.

Некоторые дополнительные данные по указанной смеси содержат также экспериментальные работы Уиппла, Пенningтона, группы американских исследователей Колумбийского университета, которые были использованы, главным образом, для проверки построенной диаграммы.

Равновесные составы пара были определены расчетным путем с помощью достаточно точного метода Кричевского-Казарновского, который основан на численном интегрировании уравнения Гиббса-Дюгема, справедливого для любой фазы.

Для построения изобар и изотерм в жидкой фазе нами использовано уравнение фазового обмена в применении к процессу парообразования:

$$q'^{\rightarrow''} = AT \Delta v'^{\rightarrow''} \left( \frac{dP}{dT} \right)_{N''},$$

где  $\Delta v'^{\rightarrow''} = v' - v'' - (N' - N'') \cdot \frac{dv''}{dN''}$ .

Удельные объемы пара находились по уравнению Битти, составленному для смеси на основании опытных данных, содержащихся в работе американских исследователей.

Для нахождения производной  $\left( \frac{dP}{dT} \right)_{N''}$ , характеризующей наклон кривой давления пара смеси постоянной концентрации в диаграмме  $P$ — $T$ , было использовано достаточно точное и теоретически оправданное уравнение Антуана (см. работы Карапетьянца, Казавчинского и Катхе и др.).

Расчеты показали, что теплота смешения максимальна при концентрации  $\approx 35\%$  Ф22.

На основании проведенных расчетов и построений получена диаграмма  $N$ — $i$  смеси Ф12—Ф22, которая охватывает температуры от  $-70$  до  $+50^\circ\text{C}$  и давления от  $0,2$  до  $14$  ата.

Сравнение опытных данных с расчетными показало: результаты работы Уиппла с погрешностью в  $\approx 0,5\%$  согласуются с расчетными, в то время как расхождение расчетов и опытных данных американских исследователей превышает  $10\%$ . Ограниченность экспериментальных данных по паровой фазе затрудняет оценку точности указанной диаграммы.

Для удобства проведения инженерно-технических расчетов молярная концентрация  $N$  в диаграммах  $N$ — $i$  для Ф12—Ф13 и Ф12—Ф22 путем пересчета была заменена весовой концентрацией  $\xi$ , а также были нанесены вспомогательные кривые для построения изотерм в области насыщения.

**Глава IV. РАВНОВЕСНЫЕ И НЕРАВНОВЕСНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ БИНАРНЫХ  
НЕАЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ. ДВА ОСНОВНЫХ  
НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕАЗЕОТРОПНЫХ  
СМЕСЕЙ АГЕНТОВ**

Фазовые превращения — процессы конденсации и кипения бинарной неазеотропной смеси — в зависимости от условий их реализации могут протекать при:

- 1) равновесном состоянии,
- 2) неравновесном состоянии.

Тот или иной принципиально отличающийся друг от друга метод конденсации или кипения смеси зависит от того, находятся ли обе фазы в непосредственном контакте при фазовых изменениях или одна из фаз немедленно отводится.

В конденсаторах и испарителях обычного кожухотрубного типа процессы приближаются к условиям второго состояния (неравновесного); в аппаратах же с внутритрубными процессами конденсации или кипения условия приближаются к первому состоянию (равновесному).

Изменение энтальпии  $di''$  для идеальной бинарной смеси, конденсирующейся при неравновесных условиях, может быть рассчитано по тепловому и материальному балансам:

$$(i_0'' - di'') = i' dm' + i''(1 - dm'),$$

где  $i_0''$  — мольная энтальпия поступающего пара;

$i'$  — мольная энтальпия конденсата;

$i''$  — мольная энтальпия оставшегося пара;

$dm'$  — сконденсированная фракция.

Фракция  $dm'$  может быть определена из следующего материального баланса:

$$m'' N'' = (m'' - dm'') \cdot (N'' + dN'') + N' \cdot dm'. \quad (2)$$

Здесь:  $N''$  — мольная концентрация поступающего пара;

$N'$  — мольная концентрация полученного конденсата;

$dm''$  — конденсирующаяся паровая фракция.

После преобразования уравнение (2) принимает вид:

$$\int_1^0 \frac{dm''}{m''} = \ln\left(\frac{1}{m''}\right) = \int_{0,5}^1 \frac{dN''}{N'' - N'}. \quad (3)$$

Уравнение (3) решается графически при помощи диаграммы фазового равновесия. После его решения изменение эн-

тальпии в процессе дифференциальной конденсации (и испарения) определяется с помощью диаграммы  $N-i$  данной смеси.

При неравновесной конденсации пара на поверхности раздела конденсат будет находиться в контакте не с парами такого же состава, а с парами, в которых содержание более летучего компонента будет выше.

Молекулярный процесс на поверхности раздела, имеющий тенденцию сохранять различие состава фаз, проходит настолько быстро, что даже при высокой скорости движения массы вдоль поверхности раздела это резкое изменение состава фаз почти не нарушается.

Описанный процесс неравновесной конденсации бинарной смеси объясняет возможность разделения неазеотропной смеси на высококипящую и низкокипящую фракции.

Наоборот, внутритрубный процесс однопоточного способа конденсации приводит к перемешиванию фаз, что создает условия, близкие к равновесным на каждой ступени процесса, в результате чего фракционное разделение бинарной смеси становится невозможным.

В настоящей главе с термодинамической точки зрения рассматриваются два основных направления использования неазеотропных смесей в хладотехнике:

1) использование неизотермичности процесса кипения неазеотропной смеси (при  $P = \text{const.}$ ),

2) использование таких смесей для реализации низкотемпературных циклов в однокомпрессорных схемах холодильных машин.

Для улучшения энергетических характеристик холодильных машин неазеотропные смеси целесообразно применять при поточном охлаждении различных тел, когда отвод тепла необходимо производить при переменной температуре; наоборот, для пространственного (объемного) охлаждения целесообразно применять чистые агенты, обеспечивающие отвод тепла при изотермических условиях.

При использовании бинарной смеси для поточного охлаждения, когда обе жидкости — охлаждаемая и охлаждающая — имеют постоянные удельные теплоемкости, соотношение между холодопроизводительностью, затраченной работой и температурными условиями цикла может быть установлено с помощью следующего уравнения, записанного в интегральной форме:

$$AL = Q_0 \left[ \frac{T_{к2}}{\Delta T_{к}} - \frac{T_{01} \cdot \Delta T_{к}}{\Delta T_{02}} \ln \frac{T_{01}}{T_{02}} + \frac{\Delta T_{к}}{\Delta T_0} - 1 \right],$$

где  $T_{01}, T_{02}$  — высшая и низшая температуры рабочего тела в испарителе;

$T_{к1}, T_{к2}$  — низшая и высшая температуры рабочего тела в конденсаторе.

$$\Delta T_0 = T_{01} - T_{02}; \quad \Delta T_{к} = T_{к2} - T_{к1}.$$

Весьма эффективным оказывается применение регенеративного парожидкостного теплообменника при реализации цикла на бинарной смеси для поточного охлаждения, так как при этом не только повышается холодопроизводительность 1 кг рабочего тела, но и снижается его низшая температура кипения и расширяется температурный интервал кипения. С этой точки зрения, целесообразно применение испарительного теплообменника.

Использование неазеотропных смесей для реализации низкотемпературных циклов по предложенной однокомпрессорной схеме холодильной машины основывается на том, что при прочих равных температурных условиях смеси дают значительно меньшие отношения давлений конденсации и кипения.

Так, при  $t_0 = -70^\circ\text{C}$ ,  $t_k = +30^\circ\text{C}$  значение  $\frac{P_k}{P_0}$  будет:

а) аммиак — 106,0;    в) фреон 22 — 58,6;

б) фреон 12 — 60,0;    г) Ф12 — Ф13 ( $\xi=0,505$ ) — 13,0 ( $t_0^H = -70^\circ\text{C}$ ).

Полученная в фракционирующем конденсаторе смесь, богатая более летучим компонентом (напр.,  $\xi=0,506$ ), направляется в основной испаритель для создания холодильного эффекта.

#### ГЛАВА V. СХЕМЫ И ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ НА НЕАЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЯХ АГЕНТОВ. РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ БИАГЕНТНЫХ МАШИН

В главе рассматриваются простые циклы машин, работающих на неазеотропных смесях агентов (семь модификаций схем), главным достоинством которых является: уменьшение необратимостей при теплообмене, повышение холодопроизводительности при замене чистого агента смесью, реализация низкотемпературных циклов при меньших значениях  $P_k/P_0$

(при прочих равных температурных условиях для биагентной установки и установки, работающей на одном из компонентов данной смеси) и др.

Сложные циклы биагентных холодильных машин характеризуются тем, что в определенных элементах схемы происходит разделение рабочей смеси на низкотемпературную и высокотемпературную фракции. В главе подробно рассматриваются девять различных модификаций таких схем, приводятся расчетные характеристики, отмечаются их достоинства и недостатки.

Оптимальный состав смеси в машинах, реализующих сложные циклы, определяется уравнением:

$$x \cdot q_{\text{кип}} \cdot \tau = (1 - x) \cdot (q_{\text{конд}} + q_{\text{пер}}),$$

где  $x$  — влагосодержание пара после водяного дефлегматора;

$q_{\text{кип}}$  — скрытая теплота парообразования высококипящей фракции при давлении  $P_0$ ;

$\tau$  — влагосодержание высококипящей фракции после дросселирования от давления  $P_k$  до  $P_0$ ;

$q_{\text{конд}}$  — скрытая теплота конденсации пара низкокипящей фракции;

$q_{\text{пер}}$  — удельное тепло переохлаждения низкокипящей фракции в конденсатор-испарителе.

Главными достоинствами рассмотренных схем являются: получение низких температур ( $-60 \div -75^\circ\text{C}$ ) без вакуума в испарителе при использовании одноступенчатого компрессора; получение различных температурных уровней в нескольких испарителях при одном и том же в них давлении; обеспечение оптимальных условий работы компрессора в широком диапазоне регулирования холодопроизводительности и температуры в охлаждаемом объекте и др.

Для оценки энергетического совершенства таких одноступенчатых машин с двумя разнотемпературными испарителями вводится коэффициент:

$$\eta = \frac{Q_0^B (T_{к, \text{ср}}/T_0^B - 1) + Q_0^H (T_{к, \text{ср}}/T_0^H - 1)}{AL},$$

где  $Q_0^B, Q_0^H$  — холодопроизводительность [ккал/час] в высокотемпературном и низкотемпературном испарителях;

$AL$  — работа компрессора [ккал/час];

$T_{к, ср}$  — среднепланиметрическая температура конденсации смеси [°K];

$T_{0, ср}^в, T_{0, ср}^н$  — среднепланиметрические температуры кипения смеси в высокотемпературном и низкотемпературном испарителях [°K].

Представляет интерес схема вакуумной биагентной низкотемпературной холодильной машины двухступенчатого сжатия при равных описанных объемах ступеней компрессора.

Параметры такой машины на базе компрессора ФУ-12 ( $n = 1440 \frac{об}{мин.}$ ) приводим в таблице.

Наименование величин	Значение величин
Низшая температура кипения II фракции (°C)	-92
Высшая температура кипения II фракции (°C)	-70
Низшая температура конденсации I фракции (°C)	+25
Давление конденсации (ата)	11
Промежуточное давление (ата)	1
Давление в основном испарителе (ата)	0,25
Холодопроизводительность (ккал/час)	860
Удельная эффективная холодопроизв. (ккал/квт. час)	354
Объемная холодопроизводительность компрессора (ккал/м³)	14
Весовое содержание Ф13 в смеси Ф12-Ф13 (кг/кг)	0,30
Соотношение часовых объемов ступеней	1

## ГЛАВА VI. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ЦИКЛОВ НА НЕАЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЯХ ФРЕОНОВ

Экспериментально исследовались две частные задачи, связанные с применением смесей Ф12—Ф22, Ф12—Ф13:

1) повышение холодопроизводительности установки, работающей по обычной одноагентной схеме;

2) получение низких температур в биагентной схеме с одноступенчатым компрессором.

Для исследований был создан экспериментальный стенд на базе агрегата АК-ФВ4 с компрессором ФВ-6 (часовой объем 12,1 м³/час при  $n = 560$  об/мин).

Холодопроизводительность измерялась электрокалориметром со вторичным агентом. Изменялись и регулировались все необходимые параметры в соответствии с правилами проведения испытаний.

На рисунке показана принципиальная схема стенда, кото-

рая позволяет при переключении вентилей (а, в, с) осуществить простой или сложный цикл на смесях фреонов.

В соответствии с первой поставленной задачей (обычная схема) проводились предварительные испытания такой установки на чистых агентах Ф12 и Ф22 и затем — сравнительные исследования при различных неазеотропных весовых концентрациях Ф22 в смеси Ф12—Ф22 и Ф13 в смеси Ф12—Ф13. Испытания были проведены в интервале температур кипений  $-15 \div -35^\circ\text{C}$  (измеряемых непосредственно после РВ). Температура выходящего конденсата поддерживалась на уровне  $+30^\circ\text{C}$ .

Экспериментальные исследования показали, что цикл на смесях существенно увеличивает холодопроизводительность установки (по сравнению с работой на Ф12 при тех же температурных режимах) либо позволяет снизить температурный уровень в испарителе (при той же холодопроизводительности).

Смесь Ф12—Ф22 в исследованном диапазоне содержания в ней Ф22 (до 40%) в процессах конденсации и кипения имеет незначительный температурный интервал и может быть использована, как и чистые агенты, для объемного охлаждения; смесь Ф12—Ф13 обладает значительным температурным интервалом ( $12 \div 16^\circ\text{C}$  при  $\xi_{13} = 32\%$ ) и может быть рекомендована для охлаждения потоков, когда отвод тепла протекает при переменных температурах.

Обработка опытных данных также показала, что объемные, энергетические и весовые коэффициенты компрессора улучшаются при повышении концентрации соответствующей смеси по низкокипящему компоненту.

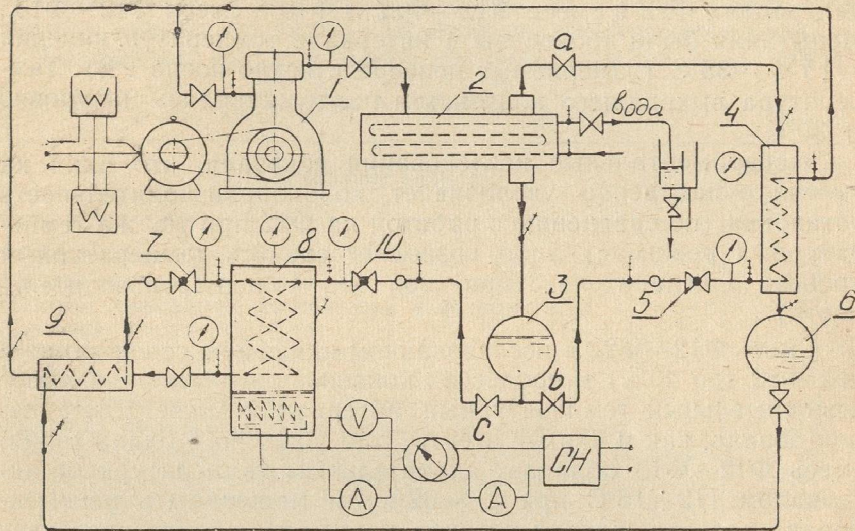
Сопоставление этих смесей между собой показывает, что характеристики оказываются лучшими для Ф12—Ф22 при сравнительно высоких температурах кипения (от  $-25^\circ\text{C}$  и выше) и, наоборот, лучшими становятся характеристики для Ф12—Ф13 при более низких температурах.

При температурах ниже  $-25^\circ\text{C}$  характеристики смеси Ф12—Ф13 лучше, чем у Ф22.

С ростом концентрации низкокипящего компонента смеси разность давлений нагнетания и всасывания растет; отношение этих давлений для смеси Ф12—Ф22 практически остается постоянным при любой концентрации, а для смеси Ф12—Ф13 при исследованных концентрациях (до 35%) — растет весьма незначительно.

Исследования в соответствии со второй задачей (низкотемпературная схема) проводились на том же стенде.

Сжатые в компрессоре (1) пары смеси агентов нагнетаются в водяной конденсатор (2), где, преимущественно, конденсируется при своем парциальном давлении высококипящий компонент (Ф12) и отводится в ресивер первой фракции (3).



Пары, богатые низкокипящим компонентом (Ф13), из конденсатора отводятся в испаритель-конденсатор (4), где и конденсируются за счет кипения первой фракции, поступающей в этот аппарат через регулирующий вентиль (5).

Вторая фракция (богатая ф13) накапливается в ресивере (6), откуда через регулирующий вентиль (7) направляется в испаритель электрокалориметра (8).

Для низкотемпературной фракции предусмотрен регенеративный теплообменник (9).

Расчетные данные, полученные с помощью диаграммы  $\xi - i$ , показали, что весовая концентрация рабочей смеси по Ф13 должна быть в пределах  $29 \div 35\%$ .

Приведем здесь основные результаты экспериментального исследования работы установки при концентрации Ф13 в смеси  $32\%$ .

При низших температурах кипения  $-60^\circ\text{C}$  и конденсации  $+30^\circ\text{C}$  холодопроизводительность машины на базе АК-ФВ4 ( $n = 960 \text{ об/мин}$ ) составила  $565 \text{ ккал/час}$ , отношение и раз-

ность давлений нагнетания и всасывания соответственно:  $11,5$  и  $14,0 \text{ атм}$ . При этом в испарителе отсутствовал вакуум ( $P_0 = 1,3 \text{ ата}$ ).

Сопоставление характеристик двухступенчатых и каскадных холодильных машин с одноступенчатой биагентной машиной показывает, что последняя может быть отнесена к разряду конструктивно простых машин.

При низших температурах кипения  $-60^\circ\text{C}$  и конденсации  $+30^\circ\text{C}$  основные характеристики имеют следующие значения:

$$\text{объемная } \frac{Q_0}{V_h} = 28 \text{ ккал/м}^3;$$

$$\text{весовая } \frac{G_k}{Q_0} = 83 \frac{\text{кг}}{1000 \text{ ккал/час}};$$

$$\text{энергетическая } \frac{Q_0}{N_e} = 412 \text{ ккал/квт. час.}$$

Опыт эксплуатации такой машины показал, что компрессор не нуждается в конструктивных изменениях.

В качестве конденсатора первой фракции использовался рядовой кожухотрубный аппарат, хотя применение специального (фракционирующего) конденсатора позволило бы улучшить характеристики машины.

Интересно отметить, что в некотором диапазоне температур кипения разности и отношения давлений нагнетания и всасывания для низкотемпературного цикла оказываются ниже, чем для обычного, что объясняется наличием двухступенчатой конденсации в таком цикле.

Если рассматривать представленную на рис. принципиальную схему как одну из модификаций, то в ней практически возможно обеспечить широкий диапазон холодопроизводительности и температур кипения без необходимости перехода на схемы сложных и дорогостоящих установок. Это подтверждено экспериментально, когда в схеме с одноступенчатым компрессором был получен последовательный ряд температур кипения от  $-15$  до  $-70^\circ\text{C}$  ( $\xi_{13} = 32\%$ ).

Длительной эксплуатацией установлено, что такая холодильная машина нормально работает при использовании масла ХФ-12. Основной контур циркуляции масла в системе совпадает с циркуляцией высококипящей фракции. В контуре низкокипящей фракции содержание масла незначительное. Незамерзаемость масла в регулирующих вентилях объясняется тем, что в состав обеих фракций входит Ф12.

На всех режимах работы биагентной машины температу-

ра нагнетания не превышала допустимых для фреоновых машин (+85 ÷ +96°C).

Нами исследовался вопрос рациональной организации процессов в аппаратах с внутритрубной и межтрубной конденсацией смеси. Опыт показал, что для реализации сложного цикла на смесях разделение фракций в аппарате с внутритрубной конденсацией протекает неудовлетворительно.

Экспериментальные исследования подтверждают работоспособность неазеотропных смесей агентов в парокompрессорных холодильных машинах.

#### Глава VII. НОМОГРАММЫ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СМЕСИ Ф12—Ф13

Специфика схемы и применение в качестве рабочего тела смеси агентов значительно усложняет зависимости между рабочими параметрами. Знание этих зависимостей необходимо при проектировании и эксплуатации таких машин.

Для наиболее рационального решения поставленной задачи мы пришли к необходимости построения номограмм — графического изображения законов, по которым изменяются рабочие параметры.

Для построения номограмм не была известна аналитическая функциональная зависимость определяющих параметров:

$$F(P_k, P_0, t_k^H, t_0^B, t_0^H, \xi_{13}) = 0.$$

Поэтому пришлось ограничиться подбором сравнительно простых формул, которые с достаточной степенью точности согласуются с вычисленными табличными значениями.

Так как число переменных равно шести, то возможным оказалось построение только составных номограмм.

В главе излагается подробная методика построения таких номограмм (номограммы прилагаются).

#### ВЫВОДЫ

1. В работе показано, что применение смесей наряду с чистыми агентами увеличивает возможности унификации холодильного оборудования.

2. При осуществлении неизотермических процессов отвода (подвода) тепла использование неазеотропных смесей мо-

жет улучшить энергетические характеристики холодильных машин.

3. В биагентных холодильных машинах возможно осуществить низкотемпературные циклы без вакуума в испарителе при одноступенчатом сжатии, вводя при этом в схему теплообменный аппарат вместо компрессорной ступени (при технико-экономических расчетах вес аппарата нельзя считать равноценным весу компрессора, так как последний является более сложным в изготовлении и эксплуатации).

4. Регулируя состав рабочей смеси, можно обеспечить оптимальные условия работы одноступенчатого компрессора в широком диапазоне холодопроизводительностей и температур кипения.

5. Применяя вместо чистого агента смесь, в обычной схеме компрессионной установки можно повысить ее холодопроизводительность либо снизить температурный уровень в испарителе.

6. На основании экспериментальных данных показано, что равновесный или неравновесный процесс фазового превращения бинарной неазеотропной смеси существенно зависит от конструкции теплообменного аппарата.

7. Проведенные экспериментальные исследования низкотемпературного биагентного цикла следует рассматривать как предварительные. Сравнительно небольшой опыт эксплуатации такой машины (460 часов) показал прежде всего ее работоспособность и удовлетворительные характеристики.

Эффективность такой машины может быть намного выше, если применить аппараты специальных конструкций.

