

А.А. Жаров, А.Н. Соколик, Д.А. Пантеев

Косвенно-испарительная система кондиционирования воздуха

Учебно-методическое пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 2 6

УДК 621.5
ББК 31.392
Ж34

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8664/>

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Холодильная, криогенная техника,
системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

Рецензент:
д-р техн. наук, профессор *Н.А. Лавров*

Жаров, А. А.

Ж34

Косвенно-испарительная система кондиционирования воздуха : учебно-методическое пособие / А. А. Жаров, А. Н. Соколик, Д. А. Пантеев. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 69, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6779-2

Представлена лабораторная работа по косвенно-испарительным современным энергоэффективным системам кондиционирования воздуха с использованием комбинации косвенно-испарительного и парокомпрессионного охлаждения. Изложены теоретические основы и конструкции реальных устройств охлаждения, входящих в состав комбинированной системы кондиционирования воздуха, приведено описание лабораторного стенда, дана методика проведения испытаний и обработки экспериментальных данных.

Для студентов, изучающих дисциплины «Приборы и техника измерений специальных систем жизнеобеспечения», «Современные системы кондиционирования и жизнеобеспечения», «Кондиционирование воздуха и энергоэффективные решения», «Теория кондиционирования».

УДК 621.5
ББК 31.392



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных
опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте:
press@bmstu.ru*

ISBN 978-5-7038-6779-2

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Предисловие

В последнее время особое внимание уделяется проблеме перехода наземных стационарных и транспортных систем кондиционирования воздуха (СКВ) на экологически безопасные хладагенты и поиску энергоэффективных рабочих циклов. В рамках реализации Венской конвенции об охране озонового слоя атмосферы и Монреальского протокола о прекращении потребления веществ, разрушающих озоновый слой, широкое распространение в СКВ уже получили озонобезопасные хладагенты типа R-134a, R-407C и R-410A*. Однако, в связи с ратификацией большинством промышленно развитых стран, в том числе и Россией, Киотского протокола к «Рамочной конвенции ООН об изменении климата» актуальной задачей остается переход СКВ на хладагенты, не способствующие глобальному потеплению климата.

Одним из перспективных направлений поиска являются СКВ, использующие водоиспарительное, комбинированное водоиспарительное и парокомпрессионное охлаждение.

Лабораторную работу выполняют студенты кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Э4).

Цель работы — теоретическое и экспериментальное ознакомление с тремя способами охлаждения, применяемыми в СКВ: в парокомпрессионной холодильной машине, в водоиспарительной установке и комбинированной косвенно-испарительной и парокомпрессионной холодильной установке, которая значительно повышает энергоэффективность СКВ.

Задачи работы:

- 1) ознакомиться с правилами подготовки и проведения инженерных и научно-исследовательских испытаний и экспериментов;
- 2) изучить теоретические основы трех предложенных способов охлаждения, применяемых в СКВ, проанализировать их достоинства и недостатки и перспективные пути их совершенствования;
- 3) изучить устройство и принцип работы экспериментального стенда;
- 4) ознакомиться с принципом действия установки в зависимости от режима работы;
- 5) провести испытания и записать результаты измерений;
- 6) произвести обработку экспериментальных данных и оформить отчет;
- 7) ответить на контрольные вопросы, подвести итоги лабораторной работы и защитить полученные результаты.

* Здесь и далее обозначения хладагентов соответствуют ГОСТ ISO 817–2024 «Хладагенты. Система обозначения».

Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности в лаборатории, изучившие настоящие правила и расписавшиеся за проведение инструктажа.

1. Инструктаж по технике безопасности проводит преподаватель или учебный мастер, ведущий лабораторные занятия в группе, перед каждой лабораторной работой.

2. При выполнении лабораторных работ студенты работают по группам, сформированным в соответствии со списком группы и удобством проведения работы с точки зрения снятия показаний приборов и обработки результатов.

3. Все работы на лабораторной установке проводятся только под контролем преподавателя или учебного мастера.

4. Запрещается переходить из одной бригады в другую без разрешения преподавателя или учебного мастера.

5. Перед началом работы необходимо проверить визуально отсутствие внешних повреждений стенда, наличие и исправность контрольных, измерительных и сигнальных приборов, тумблеров, переключателей и других устройств.

6. Электропитание стенда можно подключать только после разрешения преподавателя или учебного мастера и под контролем преподавателя или учебного мастера.

7. Категорически запрещается прикасаться руками к металлическим зажимам, деталям, неизолированным проводам, если такие будут обнаружены, когда стенд находится под напряжением.

8. Запрещается оставлять под напряжением учебную схему и приборы без присмотра.

9. Запрещается проводить лабораторные работы на стенде, если на нем какие-либо провода имеют поврежденную изоляцию.

10. В случае обнаружения неисправности какого-либо прибора, элемента стенда или возникновения нештатной ситуации, вызывающей опасения, например искрение проводов, необходимо немедленно отключить стенд от электросети и известить преподавателя или учебного мастера.

11. В случае обнаружения неисправности какого-либо прибора, элемента стенда или возникновения нештатной ситуации, не вызывающей опасений, необходимо, не отключая стенда, прекратить продолжение эксперимента и известить преподавателя или учебного мастера.

12. После выполнения опытов с разрешения преподавателя или учебного мастера следует снять напряжение со стенда, привести рабочее место в порядок.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Парокомпрессионное охлаждение

Схема простой одноступенчатой парокомпрессионной холодильной машины (ПКХМ), которая имеет наибольшее распространение в современных системах кондиционирования воздуха, представлена на рис. 1. Основными принципиальными элементами ПКХМ являются компрессор, конденсатор, дроссель (чаще всего дроссельный вентиль), испаритель и соединительные трубопроводы.

Для изучения работы цикла ПКХМ на рис. 2 приведена $T-s$ -диаграмма, а на рис. 3 — $\lg p-h$ -диаграмма.

Рассмотрим работу цикла ПКХМ, используя схему, приведенную на рис. 1, и диаграммы, представленные на рис. 2 и 3. При этом для простоты диаграммы построим для циклов на индивидуальных холодильных агентах, у которых процессы испарения и конденсации при постоянном давлении проходят при постоянной температуре. В случае использования в качестве хладагента эотропных (азеотропных) смесей (R-407C и др.) необходимо учитывать температурное «скольжение». Пары хладагента поступают на всасывание в компрессор КМ с параметрами точки 1, где сжимаются от давления испарения (кипения) $p_{\text{и}}$ до давления конденсации $p_{\text{к}}$ (процесс 1–2). Затем в конденсаторе К сжатые пары охлаждаются, конденсируются, а полученный жидкий хладагент переохлаждается (процесс 2–3, где процесс 2–2' — охлаждение

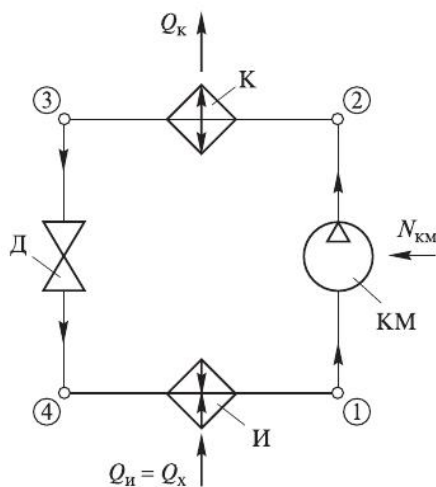


Рис. 1. Схема простой одноступенчатой парокомпрессионной холодильной машины

Д — дроссель; И — испаритель; К — конденсатор; КМ — компрессор; $Q_{\text{и}}$ — тепловая мощность испарителя или холодопроизводительность $Q_{\text{х}}$, Вт; $Q_{\text{к}}$ — тепловая мощность конденсатора ($Q_{\text{к}} = Q_{\text{х}} + N_{\text{км}}$), Вт; $N_{\text{км}}$ — потребляемая мощность компрессора, Вт; цифры в круге, означают расчетные точки

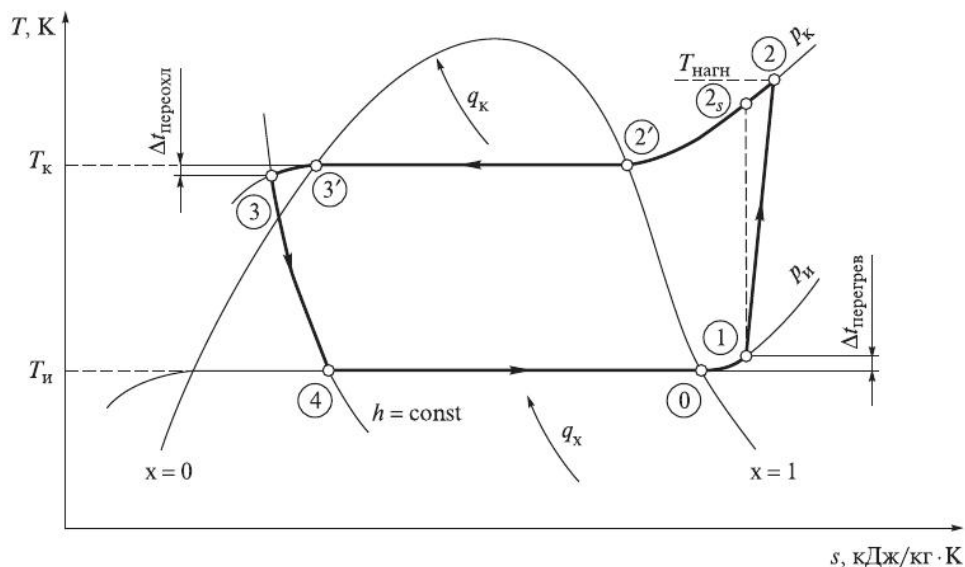


Рис. 2. T – s -диаграмма цикла парокомпрессионной холодильной машины:

T_i — температура испарения (кипения), К; T_k — температура конденсации, К; $T_{\text{нагн}}$ — температура нагнетания, К; p_i — давление на линии испарения (кипения), бар; p_k — давление на линии конденсации, бар; $\Delta T_{\text{перегрев}}$ — перегрев хладагента на выходе из испарителя, К или °С; $\Delta T_{\text{переохл}}$ — переохлаждение жидкого хладагента на выходе из конденсатора, К или °С; q_k — удельная мощность конденсатора, кДж/кг; q_x — удельная холодопроизводительность (удельная мощность испарителя), кДж/кг; цифры в круге означают расчетные точки, цифры в круге со штрихами относятся к промежуточным расчетным точкам; штриховая линия 1–2_s соответствует идеальному процессу

перегретых паров от температуры $T_{\text{нагн}}$ до начала конденсации; процесс 2'–3' — конденсация паров хладагента при температуре T_k ; процесс 3'–3 — переохлаждение жидкого хладагента на величину $\Delta T_{\text{переохл}}$. Далее жидкий хладагент дросселируется в дросселе Д, который может быть выполнен в виде нерегулируемого гидравлического сопротивления или, что чаще всего бывает, в виде управляемого дросселирующего вентиля (терморегулирующего вентиля ТРВ или электронного регулирующего вентиля ЭРВ), с образованием паро-жидкостной смеси (процесс 3–4) и поступает в испаритель И, где происходит испарение жидкой фракции хладагента в процессе 4–0 и перегрев образовавшегося пара в процессе 0–1 на величину $\Delta T_{\text{перегрев}}$. Перегрев паров хладагента в испарителе, т. е. перед всасыванием в компрессор, защищает компрессор от негативных последствий попадания на всасывание в него жидкого хладагента (гидравлического удара, разжижения, а значит, ухудшения смазки и других явлений). В случае малых гидравлических потерь в холодильном контуре процессы в конденсаторе можно считать изобарными при давлении p_k , а процессы в испарителе — изобарными при давлении p_i .

В испарителе И к хладагенту подводится полезная нагрузка Q_x (Q_i), также называемая холодопроизводительностью ПКХМ, которая, складываясь с потребляемой мощностью компрессора $N_{\text{км}}$, выделяется в конденсаторе тепло-

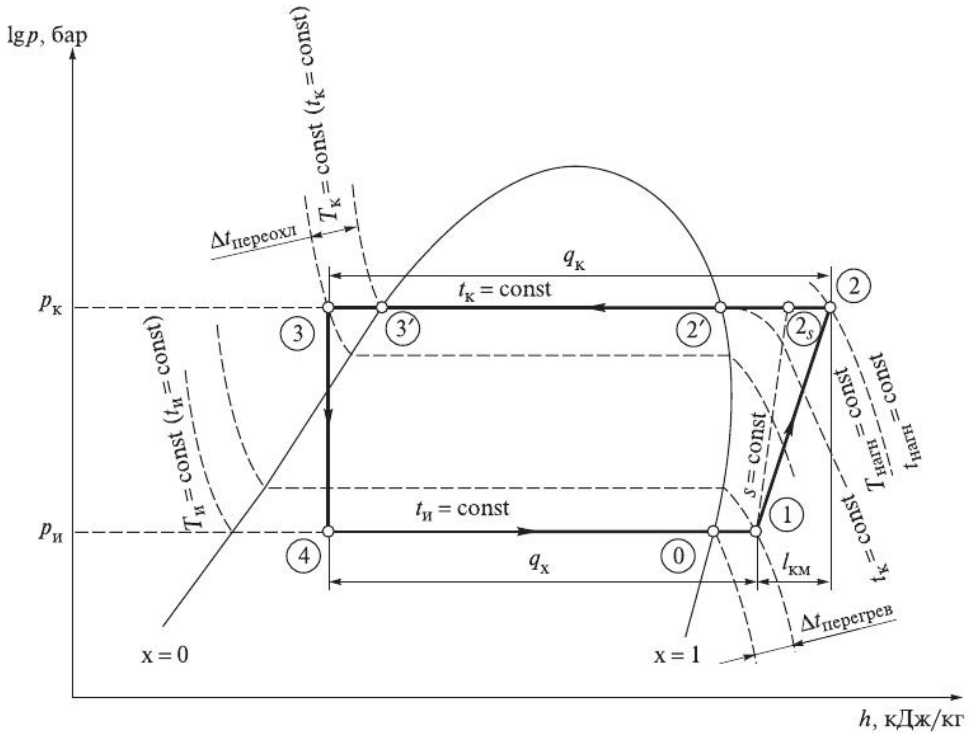


Рис. 3. $\lg p$ – h -диаграмма цикла парокомпрессионной холодильной машины:

T_n — температура испарения (кипения), К (на такой диаграмме она чаще обозначается как t_n , °С);
 T_k — температура конденсации, К (на такой диаграмме она чаще обозначается как t_k , °С);
 $T_{\text{нагн}}$ — температура нагнетания, К (на такой диаграмме она чаще обозначается как $t_{\text{нагн}}$, °С);
 p_n — давление на линии испарения (кипения), бар; p_k — давление на линии конденсации, бар;
 $\Delta t_{\text{перегр}}$ — перегрев хладагента на выходе из испарителя, К или °С; $\Delta t_{\text{перехл}}$ — переохлаждение жидкого хладагента на выходе из конденсатора, К или °С; q_x — удельная холодопроизводительность (удельная мощность испарителя), кДж/кг; q_k — удельная мощность конденсатора, кДж/кг; $l_{\text{км}}$ — удельная работа сжатия в компрессоре, кДж/кг; цифры в круге означают расчетные точки, цифры в круге со штрихами относятся к промежуточным расчетным точкам; штриховая линия 1–2_s соответствует идеальному процессу

вой мощностью Q_k . В удельных величинах этот тепловой баланс представляется в виде уравнения $q_k = q_x + l_{\text{км}}$, что на диаграмме $\lg p$ – h (см. рис. 3) представлено суммой горизонтальных отрезков, параллельных оси h .

Основными характеристиками, представляющими данный цикл ПКХМ с энергетической точки зрения, являются:

- 1) q_x — удельная холодопроизводительность хладагента (ХА), кДж/кг ХА;
- 2) q_k — удельная мощность конденсатора, кДж/кг ХА;
- 3) $l_{\text{км}}$ — удельная работа сжатия в компрессоре, кДж/кг ХА;
- 4) ϵ_x — холодильный коэффициент цикла.

Удельная холодопроизводительность q_x — это количество теплоты, подводимое в испарителе И к 1 кг потока хладагента:

$$q_x = h_1 - h_4 = h_1 - h_3,$$

Содержание

Предисловие	3
Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
Парокомпрессионное охлаждение	5
Водоиспарительное охлаждение	10
Прямое испарительное охлаждение	10
Косвенно-испарительное охлаждение	14
Комбинированное косвенно-испарительное и парокомпрессионное охлаждение	21
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	28
Описание лабораторного стенда	28
Измеряемые экспериментальные параметры и средства измерения	39
Методика и порядок выполнения лабораторной работы	40
Обработка экспериментальных данных	47
Требования к отчету по лабораторной работе	51
Контрольные вопросы и задания для подготовки к защите лабораторной работы	52
Литература	55
Приложение 1. Основные измеряемые параметры и средства измерения	56
Приложение 2. Оценка погрешности измерений	59
Приложение 3. Регулирующее оборудование стенда	63
Приложение 4. Форма отчета по лабораторной работе	65
Приложение 5. i – d -диаграмма влажного воздуха	70