

Автореферат  
УБ-1

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

ЦИМЕРМАН Александр Бенционович

УДК 628.84

ТЕОРИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА  
РЕГЕНЕРАТИВНОГО КОСВЕННО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

Специальность 05.04.03 - машины и аппараты  
холодильной и криогенной техники и систем  
кондиционирования

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1985

*Многоуважаемый  
Игорю  
с любовью  
15.09.85*

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холодильной промышленности и ОСКПТБ НПО "Агроприбор".

Научный руководитель - заслуженный деятель науки УССР, доктор технических наук, профессор ЧУМАК И.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор КОКОРИН О.Я.; кандидат технических наук, старший научный сотрудник ДОГОШЕНКО А.В.

Ведущая организация - Институт технической теплофизики АН УССР, г. Киев.

Защита диссертации состоится "21" октября 1985 г. в 11 часов на заседании специализированного совета К 068.27.01 Одесского технологического института холодильной промышленности: 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "21" сентября 1985 г.

Ученый секретарь

Никольшин

Актуальность проблемы. Основными направлениями развития народного хозяйства СССР, разработанными XXVI съездом КПСС, предусмотрено дальнейшее улучшение условий труда, быта и отдыха советских людей. Осуществление этих целей возможно при условии активного вовлечения в производство нетрадиционных возобновляемых энергоресурсов. Их использование целесообразно в областях техники, не требующих высокой плотности потоков энергии. Одной из таких весьма энергоемких областей является комфортное и технологическое кондиционирование воздуха. Применяемые в летний период для охлаждения помещений системы кондиционирования воздуха, оснащенные традиционными генераторами холода, обладают низкой степенью термодинамического совершенства, что приводит к значительным перерасходам топливных ресурсов и электроэнергии.

Наряду с этим, в обширных континентальных районах летом существует термодинамическая неравновесность в системе вода-воздух, выражающаяся через психрометрическую разность температур ( $\Delta t_{псхр}$ ), которую можно использовать как возобновляемый энергоресурс для производства холода. Использование этой природной неравновесности для получения механической работы с последующим производством холода, представляется бесперспективным, так как при малой величине психрометрической разности температур ( $\Delta t_{псхр} < 25^{\circ}$ ) неизбежна необратимость, возникающая в процессах трансформации, уничтожит полезный эффект.

Получение холода в диапазоне температур, характерном для кондиционирования, возможно при косвенно-испарительном охлаждении воздуха. Под этим термином подразумевается охлаждение основного потока (ОП) воздуха сухой поверхностью, которая с противоположной стороны охлаждается испаряющейся во вспомогательный поток (ВП) водой. Основной - приточный воздух охлаждается по линии  $d=const$  и направляется в помещение, вспомогательный - подогревается, насыщается парами воды и выбрасывается в атмосферу.

Уст новки косвенно-испарительного охлаждения воздуха получили определенное распространение у нас в стране и за рубежом, однако их широкому использованию препятствуют высокая предельно допустимая температура охлажденного основного потока воздуха ( $t_2 > t_{им} + 20^{\circ}C$ ), а также значительные габариты и масса.

Целью работы является совершенствование способа косвенно-испарительного охлаждения воздуха в направлении снижения температурного уровня получаемого холода, уменьшение энергозатрат, улучшение конст-

руктивных и эксплуатационных характеристик косвенно-испарительных воздухоохлаждателей.

Научная новизна. Впервые на основании теоретического анализа, подтвержденного экспериментом, показано, что в совмещенном одноступенчатом косвенно-испарительном воздухоохладителе (КОВ) возможно охлаждение ненасыщенного воздуха до температур, близких к его точке росы, и определены оптимальные условия осуществления этого процесса.

Основные научные положения, заглаемые в работе.

1. Получаемый в результате самопроизвольного необратимого процесса эффект психрометрической разности температур, реализуемый при испарительном охлаждении воздуха, можно перевести на существенно более низкий температурный уровень точки росы путем введения теоретически обратимого регенеративного процесса тепло- и массообмена между воздухом и водой при непременном разделении полного потока (III) на основной и вспомогательный.

2. Степень термодинамического совершенства  $Z$  (коэффициент неидеальности) любой установки косвенно-испарительного охлаждения воздуха с достаточной для инженерных задач точностью определяется: степенью использования воздуха  $\Lambda = \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{вд}}}$  и коэффициентом эффективности по точке росы  $Z = \Lambda \cdot \epsilon_r^2$ . (I)

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований создан новый тип охладителя воздуха - регенеративный косвенно-испарительный воздухоохладитель (РКВ) (авт. свидет. СССР № 407519).

2. Разработаны теоретические основы расчета и конструирования регенеративных косвенно-испарительных воздухоохлаждателей (РКВ).

3. Выявлены климатические зоны целесообразного применения РКВ.

4. Разработаны, изготовлены и прошли испытания кондиционеры с РКВ промышленного и бытового назначения.

Основные научные результаты, полученные в диссертации.

1. Наиболее совершенной схемой организации процесса косвенно-испарительного охлаждения воздуха является совмещенная регенеративная схема. Весь поступающий воздух (молярный поток -  $C_n$ ) охлаждается в контакте с сухой поверхностью, после чего одна часть этого воздуха (основной поток -  $C_0$ ) поступает в помещения. Другая часть (вспомогательный поток -  $C_{\text{г}}$ ) в противотоке поступает на противоположную поверхность, смоченную испаряющейся водой (авт. свид. СССР № 407519). В этом случае теоретическим пределом охлаждения является температура

точки росы.

2. Предложена и обоснована идеальная модель (ИМ) процесса косвенно-испарительного охлаждения воздуха, в которой максимальный эффект достигается при минимальных затратах воздуха и воды. В этой модели III воздуха охлаждается до температуры точки росы, а ВП - подогревается до начальной температуры охлаждаемого воздуха, сохраняя состояние полного насыщения. Процессы тепло- и массообмена в ИМ протекают обратимо. Изображение ИМ см. рис. I.

3. Установлено, что степень термодинамического совершенства процессов косвенно-испарительного охлаждения определяет меру приближения реальных процессов к ИМ. Полученное на основе изложенного выше подхода уравнение  $Z = \Lambda \cdot \epsilon_r^2$  позволяет оценить степень термодинамического совершенства любой установки косвенно-испарительного охлаждения воздуха.

4. На основе анализа ИМ установлена связь между коэффициентом эффективности по точке росы и изменением эксергии вещества в потоке.

5. Основной характеристикой ИМ является удельный расход основного потока  $M_{\text{вд}}$ . Эта величина является функцией состояния воздуха и определяет его энергетические возможности как смеси сухой части и водяных паров.

Построена диаграмма  $M_{\text{вд}} - t_1$  и установлены основные закономерности изменения удельного расхода ОП в зависимости от начальных параметров воздуха.

6. Определены пределы максимально возможного приближения реальных процессов к ИМ. Предложена образцовая модель (ОМ) процессов КОВ, в которой реализуется максимально достижимая степень термодинамического совершенства при  $M_{\text{вд}} = M_{\text{вд}}^{\text{р}}$ . Изображение ОМ см. рис. I.

7. Установлено, что все схемы организации процессов КОВ (прямоточная, перекрестноточная, смешанная) обладают меньшей степенью термодинамического совершенства, чем регенеративная противоточная.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Всесоюзной научно-технической конференции по холодильной технике, г. Ташкент, 1977 г.;

Уч. Научно-техническом совещании по кондиционированию воздуха, г. Тбилиси, 1977 г.;

- Всемирном электротехническом конгрессе, г. Москва, 1977 г., секция 8а.

Основные положения диссертации опубликованы автором в 22 пе-

чатных работах, общим объемом 74 страницы.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений, содержит 105 страниц основного текста, 87 рисунков и 24 таблицы, 23 страниц приложений, 105 названий библиографий.

В первой главе сделан анализ современного состояния техники косвенно-испарительного охлаждения воздуха, результатов известных исследований и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе изложены теоретические и экспериментальные исследования метода КОВ.

В третьей главе приведено обоснование применения РКВ в различных климатических районах СССР.

В четвертой главе содержатся данные по экспериментальным исследованиям и натурным испытаниям опытных образцов РКВ.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние вопроса. Дефицит энергии и экологические проблемы способствовали появлению многочисленных работ в области косвенно-испарительного охлаждения воздуха.

К основным недостаткам существующих КОВ можно отнести высокую конечную температуру охлаждаемого воздуха при больших габаритах и массе.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований метода КОВ показал, что при значительном многообразии схемных и конструктивных решений, аналитических и эмпирических методик расчетов аппаратов отсутствуют единые термодинамические критерии оценки их работы. На основании изучения существующих схемных и конструктивных решений КОВ определены рациональные направления теоретических и экспериментальных исследований.

Выбор оптимальной схемы КОВ. В результате анализа отдельной регенеративной схемы КОВ установлено, что неременным условием существенного повышения эффективности КОВ является обеспечение регенеративного характера теплообмена между потоками и увлажнение ВП при  $\varphi = 1$  в процессе отбора тепла от Ш.

Для выбора оптимальной схемы КОВ в совмещенном аппарате рассмотрены процессы тепло- и массообмена, возникающие при движении потока ненасыщенного воздуха вдоль односторонне смоченной пластины (рис. 1). Воздух движется сначала вдоль сухой поверхности, затем после поворота - вдоль влажной. При этом, в целом, происходит адиабатическое увлажнение воздуха. Разность температур по обеим сторонам

пластин обуславливает возникновение теплового потока, нормального поверхности пластины и направленного в сторону увлажняемого воздуха.

Из теплового баланса следует, что в каждом сечении пластины разность температур между потоками равна психрометрической разности температур. Поэтому при обтекании односторонне смоченной пластины, воздух охлаждается в пределе на сухой стороне до значения

$\Delta t_{\text{психр}} = 0$ , т.е. до температуры точки росы. На влажной стороне он нагревается до температуры мокрого термометра входящего воздуха. Для проверки приведенных выше положений и проведения исследований КОВ создан экспериментальный стенд, позволивший имитировать необходимые начальные параметры охлаждаемого воздуха и измерять расходы и параметры Ш, ОП, ВП на входе и выходе из аппарата, а также изучить распределение температур по длине и высоте сухого и влажного каналов.

Анализ экспериментальных данных по замерам температур в сухом и влажном каналах показал, что их распределение полностью соответствует теоретическим положениям и температура Ш на выходе из сухого канала близка к его температуре точки росы, а ВП покидает аппарат при  $t_3 \approx t_{1м}$  (рис. 1).

Холод в рассмотренном процессе не производится, так как тепло-содержание воздуха остается неизменным.

Воздух покидает влажную сторону пластины еще обладая охлаждающей способностью, характеризуемой  $\Delta t_{\text{психр}}$ . Полное ее использование наступит при подогреве ВП с одновременным его увлажнением до параметров т. 3<sup>б</sup> ( $t_1 = t_3$  при  $\varphi = 1$ ). В этом случае

$\dot{Q}_3 - \dot{Q}_p > \dot{Q}_1 - \dot{Q}_p$ , следовательно, часть охлажденного воздуха можно полезно использовать. Для этого осуществляется промежуточный отбор части Ш после его охлаждения и таким образом в совмещенном устройстве КОВ выполняются два основных требования:

- регенеративный характер теплообмена,
- увлажнение ВП в процессе нагрева.

Реализация этих требований обеспечивается в совмещенном регенеративном косвенно-испарительном воздухоохладителе, предложенном автором (А.С. № 407519).

Термодинамический анализ метода КОВ. Модель такого косвенно-испарительного воздухоохладила, в котором обеспечивается охлаждение ненасыщенного воздуха до точки росы при полном использовании психрометрической разности температур, назовем идеальной (ИМ).

Основной характеристикой ИМ является удельный расход ОП

$$M_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{аб}}^{\text{уд}}}{Q_{\text{н}}^{\text{уд}}} = \frac{t_3 - t_1}{t_3 - t_p} = \frac{a_p}{a_n} \quad (2)$$

Эта величина является функцией состояния воздуха и характеризует его энергетические возможности с точки зрения получения холода в процессах КОВ.

Расчетная проверка уравнения

$$\frac{\sum Q_{вх}}{\sum Q_{вых}} = \frac{M_{уд} S_p (1 + M_{уд}) S_d}{S_1 + (1 - M_{уд}) \Delta S_w} = 1 \quad (3)$$

показала, что процессы тепло- и массообмена, протекающие в ИМ, можно считать обратимым. ИМ является абстракцией, характеризующей предельные возможности метода КОВ, и степень ее термодинамического совершенства равна 1.

На основе (2) получено уравнение для аналитического вычисления удельного расхода основного потока

$$M_{уд} = 1 + \frac{C_p - C_p t_1 - d_1 (2500 + 1.81 t_1)}{C_p t_1 + d_3 (2500 + 1.81 t_1) - C_p} \quad (4)$$

Полученная зависимость (4) позволила протабулировать функцию  $M_{уд}$  в широкой области параметров наружного воздуха и построить диаграмму  $M_{уд} - t_1$  (рис. 2). Ее анализ показывает:

1. При  $t_1 = \text{const}$  и  $d_1 \rightarrow 0$   $M_{уд}$  уменьшается, т.е. снижение температурного уровня получаемого холода приводит к уменьшению величины ОП, т.е. затраты на производство холода увеличиваются.

2. При  $d_1 = \text{const}$  увеличение  $t_1$  приводит к росту  $M_{уд}$ . Максимальное значение  $M_{уд} = 1$  наступает при  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ . Это означает, что при температуре кипения исчезает ВП - процесс испарения сменяется процессом кипения, интенсивность которого не зависит от парциального давления водяных паров над поверхностью жидкости.

3. При  $d_1 = \text{const}$   $M_{уд}$  принимает минимальное значение на линии насыщения при  $t_1 = t_p$ .

Проведена оценка степени термодинамического совершенства (коэффициента неидеальности)  $\bar{z}$  реальной установки в сопоставлении с ИМ. Поскольку температурные уровни в этом случае различны, сопоставлялись эксергии полученного холода:

$$\bar{z} = \frac{E_{вх}}{E_{вх}^0}, \quad \text{где } E_{вх} = \frac{Q_p}{\epsilon_n}$$

После соответствующих подстановок степень термодинамического совершенства (КОВ):

$$\bar{z} = \Lambda \cdot E_p^2,$$

где  $\Lambda = \frac{M_{уд}}{M_{уд}^0}$  - степень использования воздуха.

На основании (1) получена связь между эксергией вещества в потоке  $e$  и коэффициентом эффективности  $E_p$ .

$$E_p = \sqrt{\frac{e_2 - e_1}{e_p - e_1}} \quad (5)$$

В процессе охлаждения по  $d = \text{const}$   $M_{уд}$  уменьшается и достигает минимального значения в точке росы. Это означает, что реализация ИМ возможна при условии непрерывного отбора определенной части ВП, что при переменном количестве отбираемого воздуха практически неосуществимо. Максимальное приближение к ИМ реализуется при минимальном значении  $M_{уд}$ , соответствующего точке росы охлаждаемого воздуха.

В этом случае полный поток воздуха  $C_n$  охлаждается до точки росы, а вспомогательный  $C_b$  не достигает температуры III. Эту модель назовем предельно образцовой. Конечная энтальпия ВП определяется

$$C_{пр об} = \frac{C_1 - C_p}{1 - M_{уд}^p} + C_p \quad (6)$$

Степень термодинамического совершенства предельно образцовой модели

$$\bar{z}_{образ} = \frac{M_{уд}^p}{M_{уд}} \quad (7)$$

Следующим приближением к реальности является образцовая модель (ОМ) с  $E_p < 1$ . В сечении поворота III в этом случае существует перепад температур  $\Delta t_2 = t_2 - t_{2н}$  и степень термодинамического совершенства.

$$\bar{z}_{об} = \bar{z}_{max} E_p^2 \quad (8)$$

Сопоставление ОМ с другими идеализированными схемами КОВ показало, что использование принципа регенерации позволяет существенно повысить степень их термодинамического совершенства.

Реальный процесс в РКВ отличается от ОМ только тем, что воздух во влажном канале приобретает  $\varphi < 1$ .

Определение основных термодинамических характеристик процессов КОВ. В соответствии с характером процессов в КОВ число единиц переноса тепла

$$N = \frac{(t_1 - t_p) E_p}{\Delta t_{ср}} = \frac{KF}{C_n C_p} \quad (9)$$

Таким образом определение основной термодинамической характеристики числа единиц переноса тепла  $N$  для ОМ сводится к вычислению истинного температурного напора  $\Delta t_{ср}$ . Вычисление  $\Delta t_{ср}$  проводилось на ЭВМ ВЭСМ интегральным методом по специально разработанной программе.

Лимитирующим термическим сопротивлением в аппаратах КОВ является сопротивление теплоотдачи в сухом канале. Число единиц переноса тепла от ПШ к стенке:

$$N' = \frac{N(\epsilon + 1)}{\epsilon} \quad (10)$$

Анализ характера изменения числа единиц переноса показал:

1. При уменьшении температуры  $t_p$  реализация заданной ОМ возможна при увеличении числа единиц переноса тепла.

2. Уменьшение  $t_1$  при постоянном влагосодержании ведет к увеличению необходимого для данной ОМ числа единиц переноса тепла.

Экспериментальная проверка изменения числа  $N$ , проведенная на аппаратах РКВ различной конструкции и производительности, показала хорошее совпадение с результатами теоретических расчетов.

Определение энергетических характеристик КОВ. Низкая плотность потока используемой в РКВ энергии обуславливает целесообразность их практического применения только при малых энергозатратах на привод насоса и вентилятора. Оценка мощности, затрачиваемой на транспортировку воды, дает значение  $W_{ж} \leq 1$  Вт из расчета на 1000 Вт произведенного холода. Такие незначительные затраты в дальнейшем могут не учитываться.

Другая ситуация возникает при транспортировке воздуха. В этом случае со всей остротой встает вопрос минимизации энергозатрат, поэтому рассмотрены режимы работы РКВ, характеризующиеся малыми скоростями потоков в области ламинарного течения газа при малых числах Рейнольдса. Из аэродинамической схемы движения потоков воздуха в РКВ следует, что сопротивления в сухом и влажном каналах не суммируются. Энергия затрачивается на транспортировку ПШ в сухом канале. При этом аэродинамическое сопротивление влажного канала не должно сильно отличаться от сопротивления вентиляционной сети. С учетом приведенных выше условий, на основе анализа уравнения мощности, затрачиваемой для перемещения несжимаемого газа, получено уравнение удельных затрат мощности в РКВ

$$P_w = \Delta p \cdot P_z \frac{V_{п}^2 N'}{Nu} \quad (11)$$

При постоянной скорости ПШ и заданной формы каналов величина удельных затрат энергии  $P_w$  зависит только от необходимого числа единиц переноса тепла  $N'$ , которое определяется ОМ.

Постоянство значения коэффициента пропорциональности критериев Прандтля и Нуссельта в (11) дает возможность записать

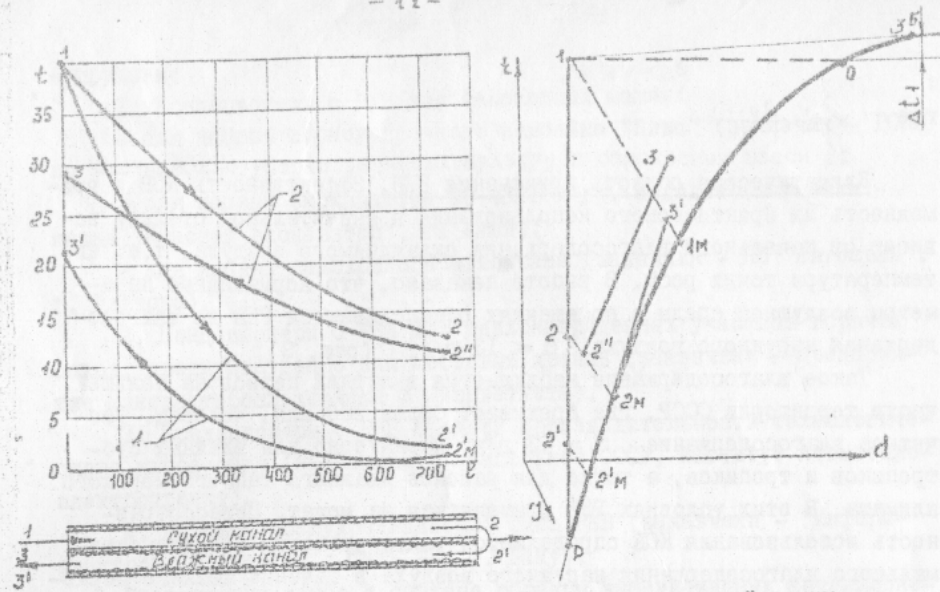


Рис. 1 Изображение процессов РКВ: 1-рециркуляционный режим ( $C_0=0$ )-1-2'-2м-3; 2-реальный режим -1-2-2''-3; идеальная модель - 1-Р-3''; предельно образцовая модель-1-Р-0; образцовая модель - 1-2'-2м-0.

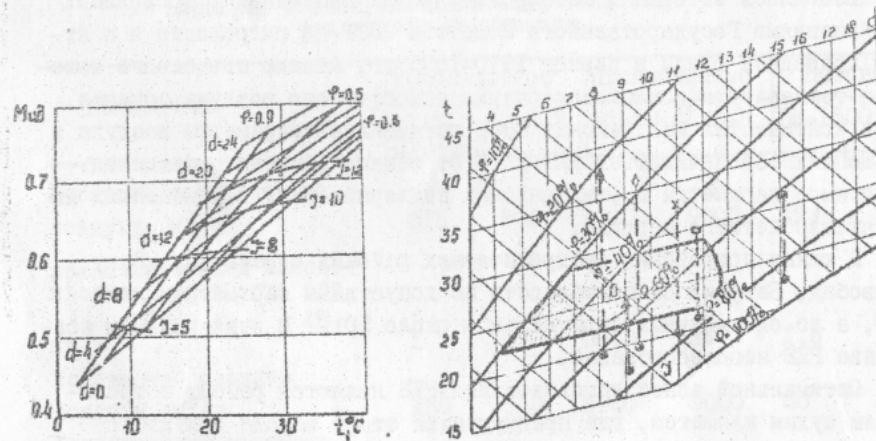


Рис. 2 Диаграмма  $M_{уд} - t_1$

Рис. 3 К анализу климатической области применения РКВ. Расчетный параметр наружного воздуха: □ - г.Одесса; ◆ - г.Ашхабад; ■ - г.Батуми; ◇ - г.Ташкент; ▲ - г.Рига; ● - параметры приточного воздуха.

$$P_w = \psi N' v_n^2, \quad (12)$$

где  $\psi = \frac{D_n \cdot P_v}{Nu}$

Климатическая область применения РКВ. Эффективность КОВ и возможность их практического использования в значительной степени зависит от начального влагосодержания охлаждаемого воздуха, т.е. его температуры точки росы. В работе показано, что нормативные параметры воздушной среды в помещениях обеспечиваются РКВ до влагосодержания наружного воздуха  $d \leq 13$  г/кг (рис. 3).

Такое влагосодержание наблюдается в летний период на большей части территории СССР, где проживает более 200 млн. человек. Расчетное влагосодержание  $d > 13$  г/кг характерно для влажных субтропиков и тропиков, а также для районов влажного теплого морского климата. В этих условиях РКВ применяться не может. Целесообразность использования КОВ определяется также временем стояния оптимального влагосодержания наружного воздуха в течение летнего периода. Так как эта проблема ранее не изучалась, в работе проведены исследования динамики суточных изменений влагосодержания воздуха в типичных климатических зонах СССР по следующим городам: Москва, Киев, Харьков, Баку, Одесса, Кишинев, Алма-Ата и зона Средней Азии. Использовались материалы метеорологических наблюдений, проводимых организациями Государственного Комитета СССР по гидрологии и контролю природной среды в период 1970-1975 гг. Анализ почасового изменения температуры и влагосодержания атмосферного воздуха показал, что в континентальных районах СССР оптимальные параметры воздуха в помещениях обеспечиваются РКВ 90 % от общего времени охлаждения. Допустимые параметры в этих районах поддерживаются в помещениях на протяжении летнего периода.

В южных приморских субтропических районах страны (гг. Баку, Кировобад, Батуми) обеспеченность по допустимым параметрам ниже 80 %, а по оптимальным параметрам - около 50 %. В этих районах применение РКВ нецелесообразно.

Оптимальной зоной использования РКВ являются районы с тропическим сухим климатом, где преимущества этого метода охлаждения воздуха особенно значительны.

В этой зоне находятся территории более 40 стран с населением около 0,5 млрд. человек.

Практическое применение РКВ. В период с 1974 по 1984 гг. были разработаны и изготовлены кондиционеры с РКВ различного назначения и производительности. Эти разработки можно классифицировать по

4 группам:

1. Кондиционеры с РКВ для самоходных машин:
  - для кабины зерноуборочного комбайна "Нива" (заказчик - ГСКБ по машинам для уборки зерновых культур) и самоходным шасси);
  - для кабины экскаватора ЭО-432I и др. моделей (заказчик - завод "Красный экскаватор", г. Киев);
  - для кабины самоходного автокрана (заказчик - ПО "Автокран", г. Иваново).

2. Кондиционеры с РКВ для теплонапряженных участков горячих цехов, преимущественно для мостовых кранов (заказчики - предприятие Минтракторсельхозмаши и Минцветмета).

3. Кондиционеры с РКВ средней производительности технологического назначения (заказчики - Минсельхоз СССР, Институт Атомтеплоэлектропроект).

4. Бытовой воздухоохладитель типа РКВ (заказчики - "Информэлектро", г. Москва и СКТБ БК, г. Баку).

Экспериментальные и опытные образцы вышеуказанных кондиционеров типа РКВ прошли лабораторные исследования и приемочные испытания в производственных условиях (см. табл. I).

Таблица I

Сравнительные характеристики серийных кондиционеров и воздухоохладителей типа РКВ различного назначения

Показатели	Транспортные		Промышленные		Бытовые		
	КТА2-053-0,1	РКВ-Т	КС-50	РКВ-П	БК-1500	РКВ-Б	
Производительность по воздуху, м <sup>3</sup> /ч	315	300	10000	9000	420	320	
Ассимиляционная холодопроизводительность при $t_n = 28^\circ\text{C}$ и $\psi = 40+60\%$	1,3	1,05	38,0	34	1,5	1,1	
Количество свежего воздуха, м <sup>3</sup> /ч	150	300	5000	9000	50	320	
Установочная мощность, кВт	1,62	0,24	23	6,8	1,0	0,16	
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	-	0,003	0,3	0,1	-	0,003	
Габаритные размеры, е	l	975	1240	2000	2300	600	600
	h	640	840	2000	1600	585	600
	b	392	240	1130	2100	400	250
Масса, кг	92	91	2000	1700	46,5	40	

Анализ данных табл. I показывает:

1. Ассимиляционная холодопроизводительность парокомпрессионных кондиционеров, работающих со значительной рециркуляцией воздуха помещений, всегда выше, чем у кондиционеров с РКВ.
2. Эффективность использования РКВ возрастает при увеличении начальной температуры охлаждаемого воздуха.
3. Мощность, потребляемая РКВ, существенно ниже (в 2,5-8 раз), чем у аналогичных парокомпрессионных кондиционеров.
4. Массогабаритные характеристики РКВ находятся в тех же пределах, что у парокомпрессионных кондиционеров.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Теоретически и экспериментально доказано, что оптимальным способом проведения процесса КОВ является регенеративное косвенно-испарительное охлаждение воздуха, позволяющее получить максимальный эффект охлаждения при минимальных затратах воздуха и воды.
2. На основе представлений об идеальной и образцовой моделях процесса КОВ создан регенеративный косвенно-испарительный воздухоохладитель (А.С. № 407519), обладающий более высокой степенью термодинамического совершенства, чем существующие аппараты КОВ.
3. Получены и экспериментально подтверждены аналитические зависимости, определяющие основные теплотехнические и энергетические характеристики РКВ.
4. Обработаны статистические данные по состоянию влагосодержания атмосферного воздуха в различных климатических районах СССР. На основе теоретического анализа, подтвержденного результатами натурных испытаний РКВ, установлено, что регенеративные косвенно-испарительные воздухоохладители обеспечивают оптимальные и допустимые параметры воздуха в помещениях на всей территории СССР, кроме зон влажных субтропиков.
5. Разработаны и реализованы конструкции кондиционеров РКВ различного назначения. Их лабораторные и приемочные испытания подтвердили предложенные расчетные зависимости.
6. Расход энергии на привод РКВ в 2,5-8 раз меньше, чем у серийно выпускаемых парокомпрессионных кондиционеров аналогичной производительности. Их массогабаритные характеристики находятся в тех же пределах.
7. Простота конструкции и обслуживания, отсутствие потребности в дефицитных материалах и комплектующих, небольшие энергозатраты при эксплуатации определяют высокую экономичность применения РКВ.
8. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования,

а также конструктивные разработки, в совокупности составляют основу для проектирования, теплотехнического расчета и конструирования регенеративных косвенно-испарительных воздухоохладителей, а также систем кондиционирования воздуха с их применением.

Основные публикации по материалу, изложенному в диссертации:

1. Цимерман А.Б., Майсоценко В.С., Печерская И.М. Косвенно-испарительный воздухоохладитель нового типа. Холодильная техника, 1976, № 3, с. 12.
2. Цимерман А.Б., Майсоценко В.С., Печерская И.М. Термодинамическая неравновесность атмосферного воздуха - источник получения холода в установках кондиционирования. Тез. докл. УИ научно-технического совещания по кондиционированию воздуха. - Тбилиси, 1977, с. 160.
3. Майсоценко В.С., Цимерман А.Б., Михайлова Л.Д., Печерская И.М. Использование метода косвенно-регенеративного охлаждения воздуха в электробытовых приборах. Всемирный электротехнический конгресс, секция 8А, доклад 32. - М., 1977.
4. Цимерман А.Б., Майсоценко В.С., Печерская И.М. Исследование метода косвенно-испарительного охлаждения воздуха. - Водоснабжение и санитарная техника, 1977, № 3, с. 3.
5. Цимерман А.Б. Об оптимальном способе использования психрометрической разности температур для получения холода. Инженерно-физический журнал, том XXXIV, - Минск, 1978, № 3, с. 542.
6. Цимерман А.Б., Майсоценко В.С., Печерская И.М. Выбор оптимальной схемы косвенно-испарительного охлаждения воздуха. Строительство и архитектура, - Новосибирск, 1978, № 7, с. 129-133.
7. Волкун А.Д., Цимерман А.Б., Зексер М.Г., Майсоценко В.С. Кондиционер для кабины зерноуборочного комбайна "Нива". Холодильная техника, 1980, № 3, с. 12-15.
8. А.с. 357424 (СССР). Устройство для косвенно-испарительного охлаждения газа / СПКНБ; Авт. изобрет. Цимерман А.Б., Лейдикер Р.Ш., Фаликсон Я.З. - Заявл. 04.01.71 № 1605771/29-14. Опубл. в Б.И. 1972, № 33, МКИ ф 24 § 3/14, УДК 697.973.
9. А.с. 407519 (СССР). Установка для косвенно-испарительного охлаждения воздуха / СПКНБ; Авт. изобрет. Цимерман А.Б., Лейдикер Р.Ш., Фаликсон Я.З. - Заявл. 26.05.72, № 1788388/29-14; Опубл. в Б.И. 1977, № 23, МКИ ф 24 § 3/14, УДК 697.932.3.
10. А.с. 407520 (СССР). Установка для косвенно-испарительного охлаждения воздуха / СПКНБ; Авт. изобрет. Цимерман А.Б., Лейдикер Р.Ш., Фаликсон Я.З. - Заявл. 26.05.72 № 1788386/29-14; Опубл. в

Б.И. 1977, № 23, МКИ F 24 f 3/14, УДК 697.932.3.

11. А.с. 690271 (СССР). Способ испарительного охлаждения воды / ОИСИ; Авт. изобрет. Майсоенко В.С., Цимерман А.Б., Печерская И.М., Зексер М.Г. - Заявл. 09.11.76, (21) 2416940/24-06; Оpubл. в Б.И. 1979, № 37, МКИ F 28 C3/06, УДК 536.423.

12. А.с. 826148 (СССР). Установка для охлаждения воздуха / ОФ НПО "Агроприбор"; Авт. изобрет. Цимерман А.Б., Зексер М.Г., Майсоенко В.С. - Заявл. 06.08.79, (21) 2817769/29-06; Оpubл. в Б.И. 1981, № 16, МКИ F 24 f 3/14, УДК 697.932.

13. А.с. 952747 (СССР). Способ опреснения воды / ОИСИ. Авт. изобрет. Майсоенко В.С., Цимерман А.Б., Зексер М.Г. - Заявл. 08.02.77, (21) 2450421/23-26; Оpubл. в Б.И. 1982, № 31, МКИ C02 f 1/04; УДК 663.63.048.

14. А.с. 985607 (СССР). Устройство для косвенно-испарительного охлаждения воздуха / ОФ НПО "Агроприбор". Авт. изобрет. Цимерман А.Б., Эннан А.А. - Заявл. 20.07.81, (21) 3323345/29-06; Оpubл. в Б.И. 1982, № 48, МКИ F 24 f 3/14, УДК 697.932.

Кроме указанных выше, автором получено 49 авторских свидетельств на различные способы проведения процессов КОВ, схемные решения и конструктивные модификации аппаратов для охлаждения воздуха, воды и опреснения солоноватых вод.

#### Основные условные обозначения

$T, t$  - температура, К, °С;  $G$  - весовой расход, кг/час;  
 $J$  - энтальпия, кДж/кг;  $Q$  - количество тепла, кВт;  
 $S$  - энтропия, кДж/кг.°С;  $F$  - площадь т/о поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $\xi$  - коэффициент влаговываждения;  $V$  - скорость, м/с.  
 $A_n$  - коэффициент, зависящий от формы канала и КПД нагнетателя.  
И н д е к с ы

КОВ - косвенно-испарительный воздухоохладитель; о - основной поток;  
в - вспомогательный поток; л - полный поток; I - начальные параметры воздуха; 2 - параметры охлажденного воздуха; 3 - параметры выхода вспомогательного потока; м - мокрый термометр; р - точка росы; д - действительный; ид - идеальный; об - образцовый;  
ср - средняя.

