

На правах рукописи

УДК 621.59

Соколик Андрей Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РЕГЕНЕРАТИВНОГО КОСВЕННО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники,
систем кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2016

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Гаранов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бабакин Борис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент
Емельянов Анатолий Леонович

Ведущее предприятие: ОАО НПО «НАУКА»

Защита диссертации состоится «26» октября 2016 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус «Энергомашиностроение».

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр. 1. Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16,
кандидат технических наук, доцент

Колосов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Кондиционирование воздуха решает задачу обеспечения заданных параметров микроклимата в производственных, общественных и жилых зданиях. Поддержание комфортных условий способствует сохранению здоровья трудящихся и повышению производительности труда. Энергозатраты на системы кондиционирования воздуха (в дальнейшем СКВ) составляют значительную часть энергопотребления здания. Для сокращения производственных издержек необходимо повсеместное внедрение СКВ, кроме того, необходимо стремиться к снижению капитальных и эксплуатационных затрат таких систем. В крупных городах, ввиду высокой плотности застройки, необходимо стремиться к снижению площади, занимаемой оборудованием СКВ и его энергопотребления. Немаловажным фактором также является постоянный рост тарифов на электроэнергию и высокая стоимость подключения к городским энергосетям.

Требуется разработка новых, нетрадиционных подходов к охлаждению воздуха в системах кондиционирования. Для повышения энергетической эффективности установок кондиционирования воздуха (в дальнейшем, УКВ) предлагается использовать водоиспарительное охлаждение. Несмотря на свою высокую энергоэффективность УКВ, работающие с использованием только принципов водоиспарительного охлаждения, не в состоянии обеспечить комфортные параметры микроклимата во всех климатических зонах. Учитывая вышесказанное, предлагается применить испарительное охлаждение воздуха в комбинации с традиционной парокомпрессионной холодильной машиной (ПКХМ). Такие комбинированные УКВ работоспособны во всех климатических зонах, и, в сравнении с традиционными СКВ с ПКХМ, более энергоэффективны. Промышленные образцы подобных систем выпускаются в РФ, странах западной Европы, США, Китае. При этом необходимо отметить, что методики расчета комбинированных установок кондиционирования воздуха не опубликованы.

Настоящая работа посвящена исследованию комбинированных СКВ.

Цель работы. Повышение энергоэффективности УКВ с использованием регенеративного косвенно-испарительного охлаждения (в дальнейшем РКИО).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

- проанализировать существующие решения в области комфортного кондиционирования воздуха на базе косвенно-испарительного охлаждения. Выбрать схемы УКВ для проведения дальнейших исследований;
- разработать методику расчёта цикла комбинированной УКВ;
- выполнить расчет цикла УКВ при различных условиях окружающей среды для получения интегральных показателей работы установки;
- разработать схему экспериментального стенда и методику проведения эксперимента;

- сопоставить экспериментальные данные с результатами теоретических расчетов, для подтверждения корректности принятых допущений, при необходимости внести поправки в расчеты;
- подготовить рекомендации по внедрению результатов работы.

Методы исследования. Использовались теоретические методы исследования работы УКВ при различных условиях окружающей среды. Расчет схемы УКВ проводился с помощью балансовых уравнений и теоретических зависимостей свойств влажного воздуха. Для подтверждения теоретических выводов результаты теоретических исследований сравнивались с экспериментальными данными, полученными автором диссертационной работы.

Научная новизна:

$$\zeta = \frac{Q_x^{полез}}{k_{то} \cdot F_{то}}$$

- получена зависимость комплекса ζ от эффективности КИТО.
- получена зависимость площади теплообменной поверхности установки, реализующей принцип РКИО от эффективности косвенно-испарительного теплообменника (в дальнейшем КИТО) и соотношения расходов продуктового и вспомогательного потоков;
- получена зависимость доли холодопроизводительности комбинированной УКВ, вырабатываемой в КИТО от температуры приточного воздуха и эффективности КИТО.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

- использование РКИО в качестве первой ступени в комбинированных УКВ позволяет значительно (до 80%) снизить нагрузку на парокompрессионную холодильную машину;
- В условиях сухого жаркого климата энергетическая эффективность комбинированной УКВ в 1,25...3 раза выше, чем у традиционной УКВ с ПКХМ. В условиях умеренного климата энергетическая эффективность комбинированной УКВ в 1,15...1,35 раза выше, чем у традиционной УКВ с ПКХМ (при эффективности КИТО 0,75).
- разработана инженерная методика расчета УКВ, позволяющая получить параметры для подбора основных аппаратов и агрегатов УКВ и расчета тех элементов, которые не представлены в номенклатуре предприятий, производящих климатическое оборудование;
- создан учебно-лабораторный стенд «Комбинированные УКВ на базе косвенно-испарительного охлаждения и парокompрессионного холодильного цикла», стенд внедрен в учебный процесс кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения;
- результаты исследования использованы при создании транспортных комбинированных установок кондиционирования воздуха.

Личный вклад автора состоит в разработке расчетной модели, создании экспериментального стенда, проведении испытаний, обработке результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– международная научная конференция «Холодильная и криогенная техника, промышленные газы, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Москва, 2010);

– международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур», (Москва, 2010);

– выставка CHILLVENTA Россия (Москва, 2011);

– международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур», (Москва, 2011);

– выставка CHILLVENTA Россия (Москва, 2012).

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Достоверность полученных автором данных подтверждается применением аттестованных измерительных приборов, апробированных методик измерения, воспроизводимостью результатов, полученных экспериментальным путем.

Публикации. По теме доклада опубликовано 4 научные работы, 3 из них в рецензированных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ, общим объемом 1,8 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 138 страниц текста, 30 иллюстраций, 7 таблиц и список литературы из 41 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы.

В первой главе проведен обзор существующих решений в области косвенно-испарительного охлаждения (в дальнейшем КИО) воздуха и комбинированных систем. Рассмотрены существующие конструкции косвенно-испарительных теплообменников (в дальнейшем КИТО), выпускаемых промышленностью стран РФ, Евросоюза, США, достоинства и недостатки применяемых материалов, способы подачи воды в «мокрые» каналы теплообменника. Приводятся данные из научных и экспериментальных работ, посвященных исследованию УКВ с использованием КИО и комбинированных УКВ. Даны рекомендации по построению комбинированных УКВ с использованием КИО и ПКХМ. В качестве первой ступени комбинированной УКВ предлагается использовать регенеративное косвенно-испарительное охлаждение (в дальнейшем РКИО).

На основании анализа собранных данных сформулированы цель и задачи для дальнейшего исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию РКИО.

Основной трудностью при теоретическом исследовании РКИО (Рис. 1, 2, 3) является отсутствие строгой математической модели процессов, происходящих в «мокрых» каналах КИТО. Данные, приводимые в литературе, как правило, относятся к конкретной конструкции теплообменного аппарата (в дальнейшем ТО), что затрудняет их использование при аналитических расчетах СКВ на уровне схемы. Таким образом одной из задач на теоретическом этапе исследования была разработка методики расчета схемы СКВ. При разработке методики были приняты следующие условия и допущения, которые затем требовали подтверждения на этапе экспериментального исследования:

- относительная влажность воздуха вспомогательного потока на входе в КИТО составляет 90%;
- нагрев вспомогательного потока в «мокрых» каналах КИТО идет с подводом воды и постоянной относительной влажностью;
- теплопритоки в установку, и перетечки потоков внутри УКВ – пренебрежимо малы;
- эффективность работы КИТО оценивается температурным КПД;
- минимальный расход воздуха вспомогательного потока определяется из условия равенства водяных эквивалентов прямого и вспомогательного потоков на холодном конце КИТО.

В основе методики лежат зависимости для расчета свойств влажного воздуха:

- Давление насыщенных паров $P_n = f(t)$, Па
- Температура насыщенного пара $T_n = f(P_n)$, К
- Влагосодержание воздуха $d = f(P, P_n, \varphi)$, г/кг
- Теплоёмкость влажного воздуха $c_{pв.в.} = f(d)$, кДж/(кг • К)
- Энтальпия влажного воздуха $i_{в.в.} = f(t, d)$, кДж/кг
- Парциальное давление водяного пара $P_n = f(d, P)$, Па
- Плотность влажного воздуха $\rho_{в.в.} = f(P, t, P_n)$, кг/м³
- Относительная влажность воздуха $\varphi_{в.в.} = f(P_n, P_n)$, %

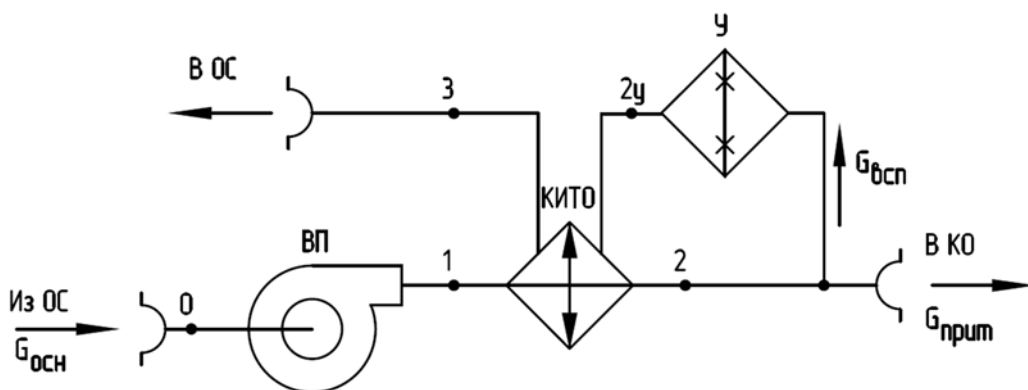


Рис. 1. Принципиальная схема установки РКИО. Обозначения, используемые на схеме: ВП – вентилятор приточный, КИТО – косвенно-испарительный теплообменник, КО – кондиционируемый объем; ОС – окружающая среда, $G_{осн}$, $G_{прит}$, $G_{всп}$ – массовые расходы воздуха основного, приточного и вспомогательного потоков соответственно

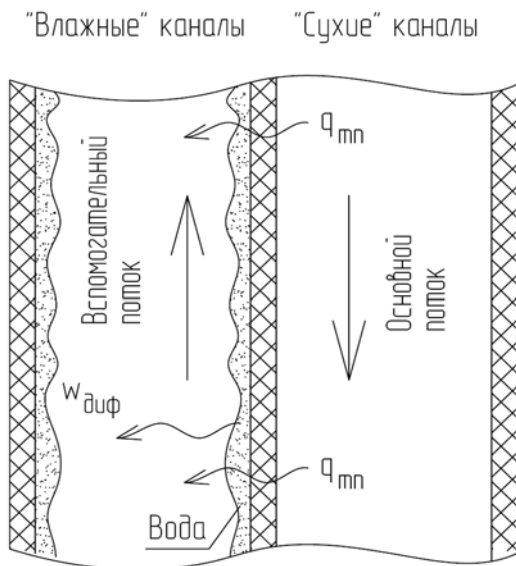


Рис. 2. Условное изображение процесса тепло-массообмена в КИТО

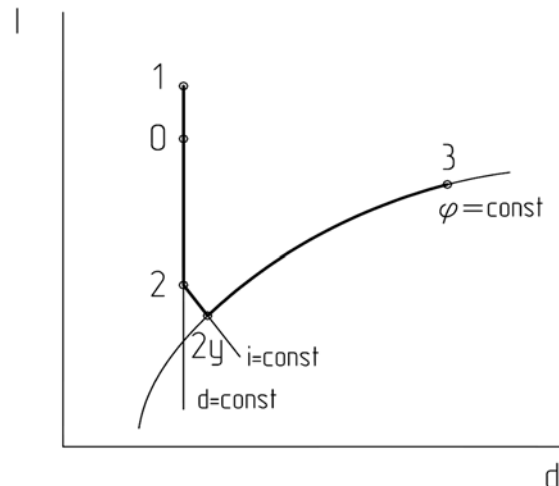


Рис. 3. Схема процессов обработки воздуха, протекающих в УКВ РКИО в I-d диаграмме

Основными параметрами, влияющими на работу УКВ, реализующей принцип РКИО, являются:

- параметры воздуха окружающей среды,
- эффективность КИТО,
- расход воздуха вспомогательного потока.

Было исследовано влияние эффективности КИТО на работу УКВ в различных климатических зонах. В качестве расчетных условий выбраны климатические параметры сухого, умеренного и влажного климатов (параметры «Б» по СНиП 23-01-99* г. Волгограда, Москвы, и Сочи соответственно), характерные для территории РФ. Кроме того, рассматривался режим пиковой нагрузки на СКВ (параметры «Б» г. Ашхабад по СНиП 23-01-99*). Для оценки эффективности работы КИТО принят температурный КПД, вычисляемый по

формуле:

$$\varepsilon_t = \frac{W_{np} \cdot (t_1 - t_2)}{W_{min} \cdot (t_1 - t_{2y})}, \quad (1)$$

где W_{np} – водяной эквивалент прямого потока, W_{min} – минимальный из водяных эквивалентов прямого и вспомогательного потоков.

При проведении расчетов температурный КПД КИТО варьировался в диапазоне 0,5...0,85 с шагом 0,05. Для оценки эффективности работы водоиспарительных УКВ традиционно применяются два критерия: эффективность по «мокрому» термометру и эффективность по температуре точки росы:

$$\varepsilon_p = \frac{t_0 - t_2}{t_0 - t_{mp}} \quad (2)$$

где t_0 , t_2 и $t_{тр}$ – температуры воздуха окружающей среды, воздуха на выходе прямого потока из КИТО и точки росы наружного воздуха соответственно.

На Рис. 4 представлена зависимость эффективности УКВ РКИО по температуре точки росы от температурного КПД КИТО. Характер зависимости линейный, отсутствуют выраженные экстремумы. В связи с этим использовать данный критерий в качестве оптимизационного не представляется возможным.

Холодопроизводительность и массо-габаритные характеристики УКВ РКИО определяются, главным образом, площадью ТО. Была исследована

зависимость комплекса $\zeta = \frac{Q_x^{полез}}{k_{то} \cdot F_{то}}$ (где $Q_x^{полез}$, кВт – полезная

холодопроизводительность УКВ, $k_{то}$, Вт/(м²·°C) – коэффициент теплопередачи аппарата, $F_{то}$, м² – площадь теплообменной поверхности) от эффективности КИТО ε_t (Рис. 5). Проведенные исследования показали, что зависимость носит практически линейный характер, в связи с этим она может быть обобщена уравнением прямой вида:

$$y = k \cdot x + b$$

Было исследовано влияние параметров окружающей среды на коэффициенты k и b . В результате обобщения зависимость можно представить следующим образом:

$$\zeta = 1,5 \cdot (d_{oc} - d_m) \cdot \varepsilon_t + 0,471 \cdot (t_{oc} - t_p), \quad (3)$$

где d_{oc} – влагосодержание воздуха окружающей среды, кг/кг; d_m – влагосодержание воздуха окружающей среды, рассчитанное по параметрам «мокрого» термометра, кг/кг; ε_t – эффективность КИТО; t_{oc} – температура воздуха окружающей среды по сухому термометру, °C; t_p – температура точки росы воздуха окружающей среды, °C.

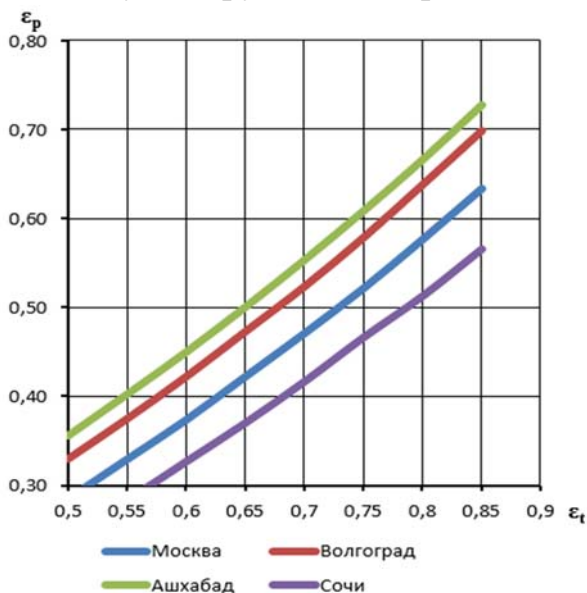


Рис. 4. Зависимость эффективности УКВ РКИО по точке росы от эффективности КИТО ε_t

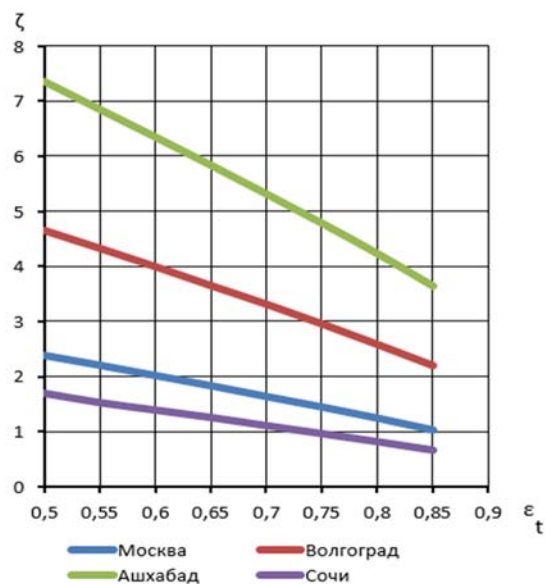


Рис. 5. Зависимость комплекса ζ от эффективности КИТО ε_t

Результаты, рассчитанные по зависимости (3) были сопоставлены с результатами, полученными по расчетной методике. Для проверки корректности зависимости использовались климатические данные 10 городов на территории

РФ. В условиях сухого, умеренного и влажного климатов отклонение составило не более 10%.

Была исследована зависимость комплекса $K_{то} \cdot F_{то}$ от расхода вспомогательного потока при различных значениях эффективности косвенно-испарительного теплообменника (Рис. 7). В условиях сухого климата требуемая площадь теплообменной поверхности возрастает с увеличением приведенного расхода воздуха вспомогательного потока при всех рассмотренных значениях эффективности КИТО. В условиях умеренного и влажного климата, начиная со значений эффективности КИТО 0,75, наблюдается экстремум, увеличение приведенного расхода воздуха вспомогательного потока до 0,4 позволяет сократить площадь теплообменной поверхности до 10% в условиях умеренного климата и до 18% в условиях влажного климата (при эффективности КИТО 0,85).

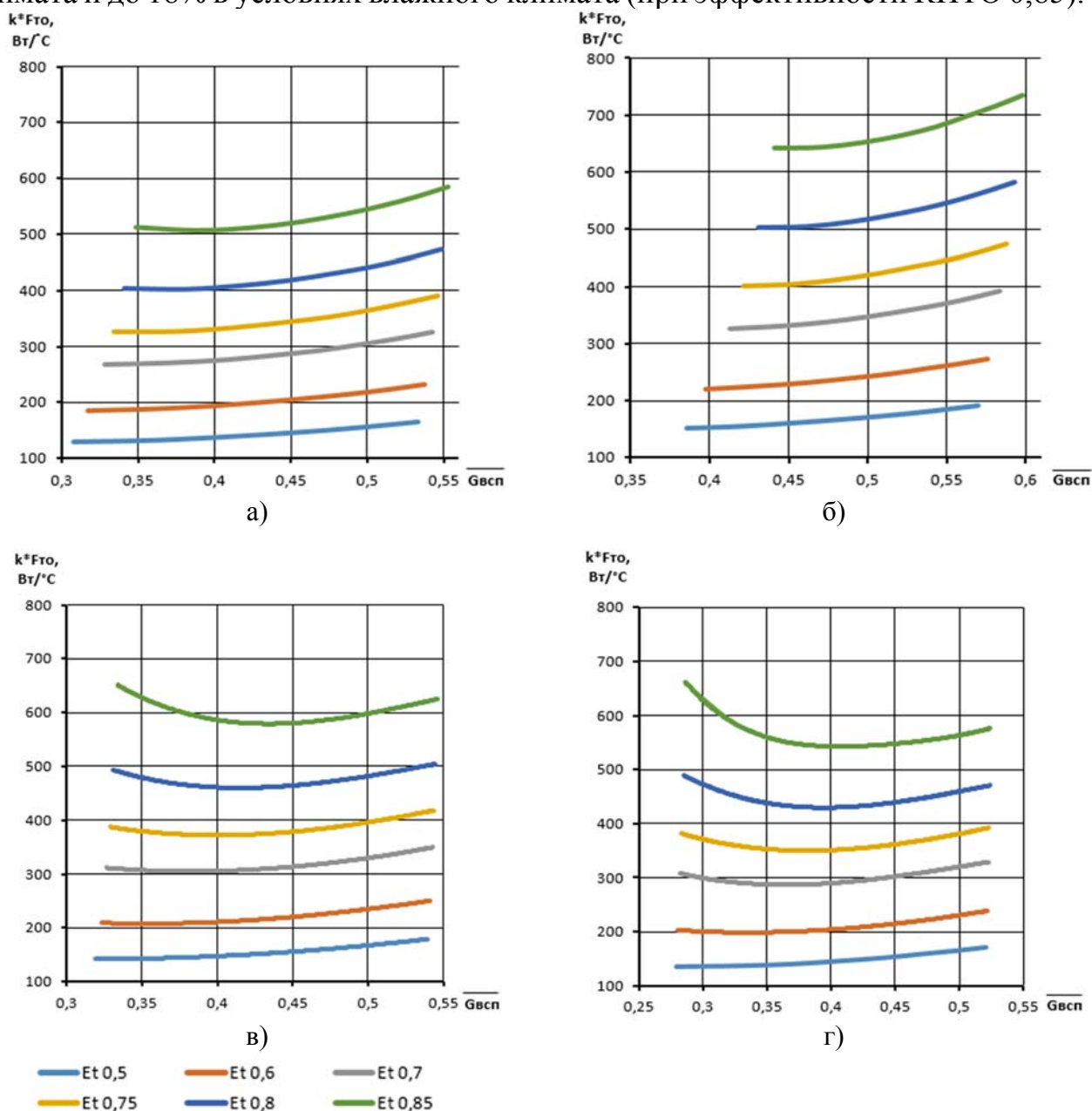


Рис. 7. Зависимость комплекса $K_{то} \cdot F_{то}$ от приведенного расхода воздуха вспомогательного потока при различных значениях эффективности КИТО: а) Ашхабада; б) Волгограда; в) Москвы; г) Сочи

Третья глава посвящена теоретическому исследованию комбинированной УКВ, использующей РКИО в качестве первой ступени охлаждения.

Рассмотрена схема двухступенчатой комбинированной УКВ, использующей РКИО в качестве первой ступени и ПКХМ в качестве второй ступени (Рис. 8). Методика, разработанная во второй главе работы, дополнена зависимостями для расчета пароконденсационной ступени охлаждения.

В дополнение к вышеизложенным допущениям приняты следующие:

- температура перегрева и переохлаждения хладагента принимаются равными 5°C тип хладагента: R407C;
- потребляемая мощность компрессора рассчитывается по данным производителя, с помощью полученных в ходе расчета температур кипения и конденсации хладагента и неизменном значении перегрева и переохлаждения.

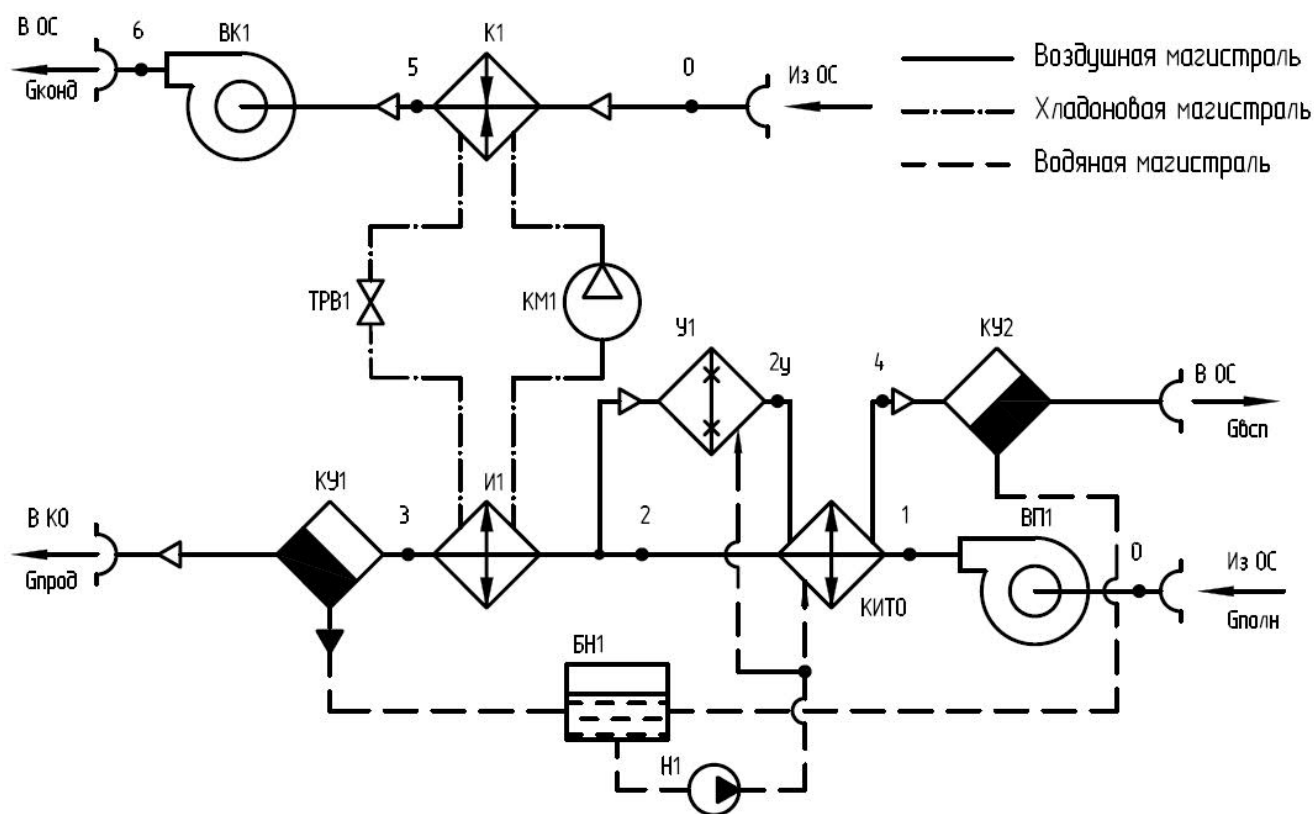


Рис. 8. Принципиальная схема комбинированной УКВ. Обозначения, используемые на схеме: БН1 – бак накопительный; ВК1 – вентилятор конденсатора; ВП1 – вентилятор приточный; К1 – конденсатор; КИТО – косвенно-испарительный теплообменник; КМ1 – компрессор; КО – кондиционируемый объем; КУ1 – каплеуловитель; ОС – окружающая среда; ТРВ1 – терморегулирующий вентиль. $G_{полн}$, $G_{прод}$, $G_{всп}$ – массовые расходы полного, продуктового, и вспомогательного потоков соответственно

Наружный воздух, поступающий в УКВ, охлаждается в теплообменнике РКИО, вспомогательный поток воздуха выбрасывается в окружающую среду,

продуктовый [приточный] поток доохлаждается в воздухоохладителе до требуемой температуры приточного воздуха и подается в кондиционируемый объем. Конденсатор является отдельно стоящим и охлаждается воздухом окружающей среды.

Алгоритм расчета комбинированной УКВ приведен на Рисунке 9.

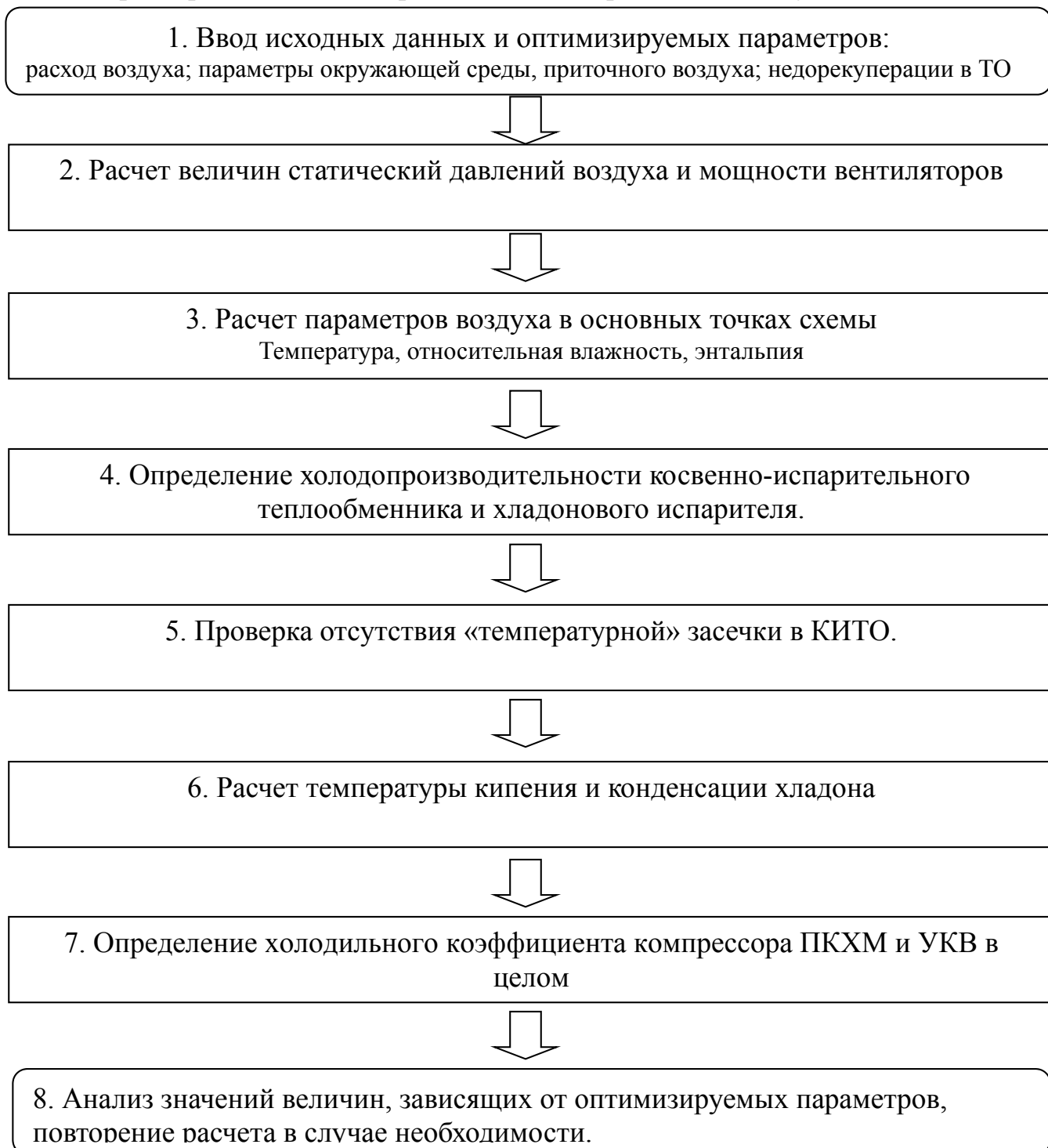


Рис. 9. Алгоритм расчета комбинированной УКВ

При проектировании комбинированных УКВ, важно знать, какая доля полезной холодопроизводительности УКВ обеспечивается КИТО. Было проведено несколько серий расчетов. Климатические параметры окружающей

среды принимались аналогично описанным в главе 2. На долю полезной холодопроизводительности, вырабатываемой КИТО, главным образом, влияют эффективность КИТО и глубина охлаждения продуктового потока, чем глубже охлаждается приточный воздух, тем большая нагрузка ложится на парокompрессионную часть (Рис. 10).

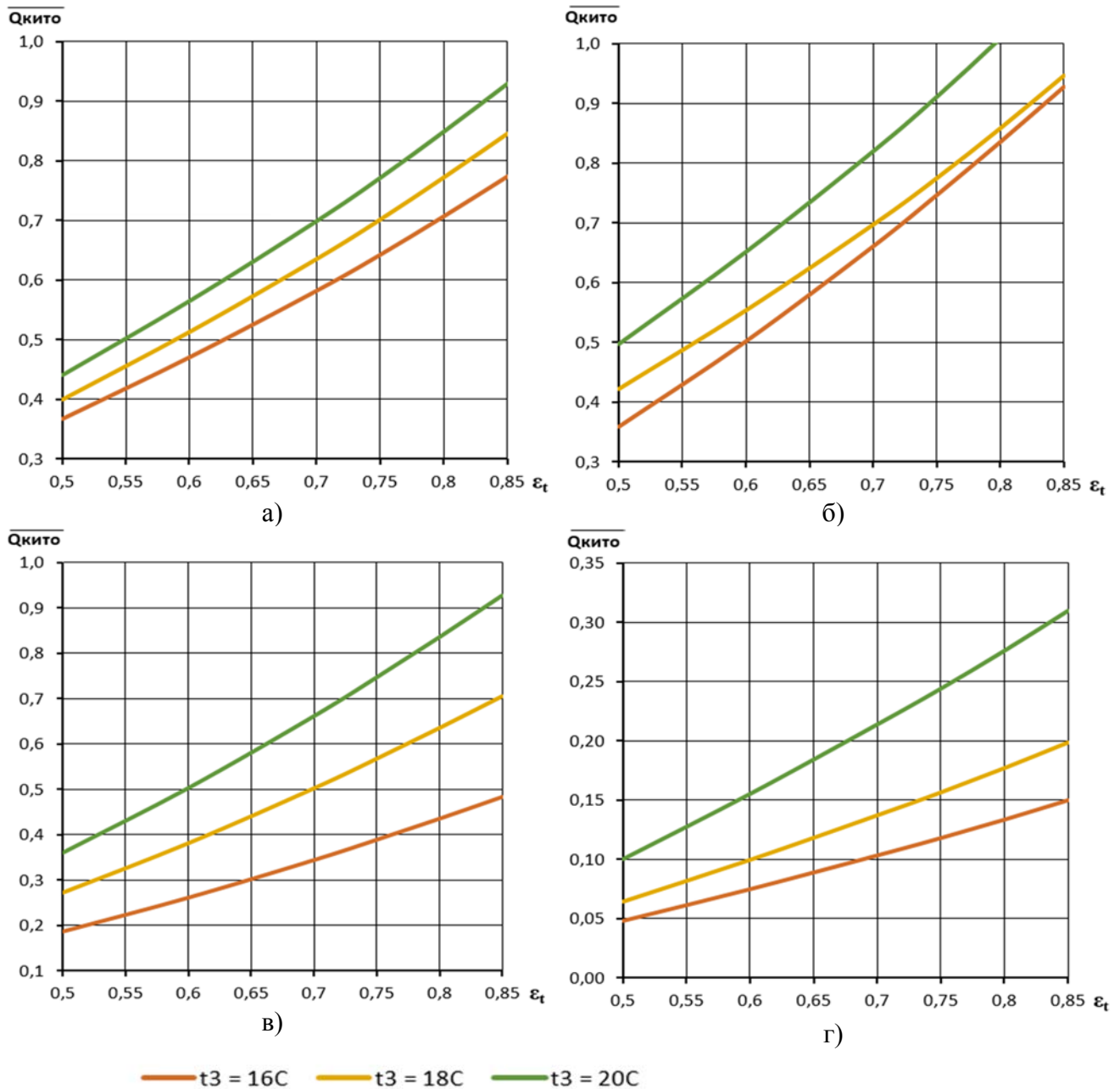


Рис. 10. Зависимость доли холодопроизводительности, вырабатываемой в ступени РКИО $Q_{\text{КИТО}}/Q_{\text{УКВ}}$ от температуры приточного воздуха и эффективности КИТО: а) Ашхабад; б) Волгоград; в) Москва; г) Сочи

В условиях г. Ашхабада КИТО позволяет снять от 40 до 85% тепловой нагрузки на УКВ. Повышение температуры приточного воздуха на 1°C (в пределах от 16°C до 20°C) позволяет увеличить долю холодопроизводительности от 2,5% до 3,5% на 1°C (при эффективности КИТО от 0,5 до 0,85 соответственно). В условиях г. Волгограда при эффективности КИТО выше 0,8 и увеличении температуры приточного воздуха до 20°C вся

холодопроизводительность УКВ обеспечивается только лишь за счет водоиспарительной ступени. В условиях влажного климата КИТО, даже при температуре приточного воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, позволяет обеспечить лишь до 30% холодопроизводительности УКВ. В условиях умеренного климата на долю холодопроизводительности, вырабатываемой в КИТО, влияет главным образом температура на выходе из воздухоохладителя. Так, при температуре приточного воздуха $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, увеличение эффективности КИТО от 0,5 до 0,85 позволяет повысить долю холодопроизводительности, обеспечиваемую КИТО, от 0,18 до 0,48. При температуре приточного воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ КИТО обеспечивает от 37 до 92% требуемой холодопроизводительности УКВ. Таким образом, повышение температуры приточного воздуха на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в пределах от $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяет увеличить долю холодопроизводительности от 5% до 10% на градус.

Для оценки энергетической эффективности предлагаемой комбинированной УКВ была произведена серия расчетов. Температура приточного воздуха t_3 принималась равной $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, а холодильный коэффициент компрессора ПКХМ варьировался в диапазоне от 2 до 5. Для оценки энергетической эффективности использовалась величина холодильного коэффициента УКВ, равная отношению полезной холодопроизводительности (по продуктовому потоку) к полной потребляемой мощности УКВ (складывается из потребляемой мощности приточного вентилятора, вентилятора конденсатора и холодильного компрессора). На Рис. 11 представлена зависимость приведенного холодильного коэффициента УКВ (равного отношению холодильного коэффициента комбинированной УКВ в холодильному коэффициенту традиционной УКВ с ПКХМ) от холодильного коэффициента компрессора ПКХМ и эффективности КИТО. В условиях сухого жаркого климата энергетическая эффективность комбинированной УКВ в 1,25...3 раза выше, чем у традиционной УКВ с ПКХМ. В условиях умеренного климата энергетическая эффективность комбинированной УКВ в 1,15...1,35 раза выше, чем у традиционной УКВ с ПКХМ (при эффективности КИТО 0,75). Не столь значительная прибавка объясняется тем, что при температуре приточного воздуха $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ и эффективности КИТО 0,75 только 40% тепловой нагрузки на УКВ снимается в КИТО, и увеличение мощности, потребляемой приточным вентилятором, приводит к снижению холодильного коэффициента установки в целом. В условиях влажного климата, при низкой эффективности КИТО, энергетическая эффективность комбинированной УКВ оказывается ниже, чем у традиционной УКВ с ПКХМ (при эффективности КИТО до 0,5).

Одним из критериев, которые следует учитывать при размещении конденсатора, является температура конденсации хладагента в контуре ПКХМ. Расчеты показали, что в условиях сухого и умеренного климата с повышением эффективности КИТО значительно снижается нагрузка на ступень ПКХМ. Это позволяет размещать конденсатор как на тракте вспомогательного потока, так и использовать отдельно стоящий конденсатор, обдуваемый воздухом окружающей среды. Причем с увеличением температуры приточного воздуха нагрузка на ступень ПКХМ падает еще значительно и встроенный конденсатор оказывается предпочтительней отдельно стоящего. В условиях влажного

климата, где степень РКИО обеспечивает максимум до 30% холодопроизводительности УКВ, целесообразно использовать выносной воздушный конденсатор. При необходимости использования встроенного конденсатора, следует увеличивать приведенный расход воздуха вспомогательного потока, так, увеличение с 0,3 до 0,5 позволяет снизить нагрев воздуха в конденсаторе в 2...2,5 раза.

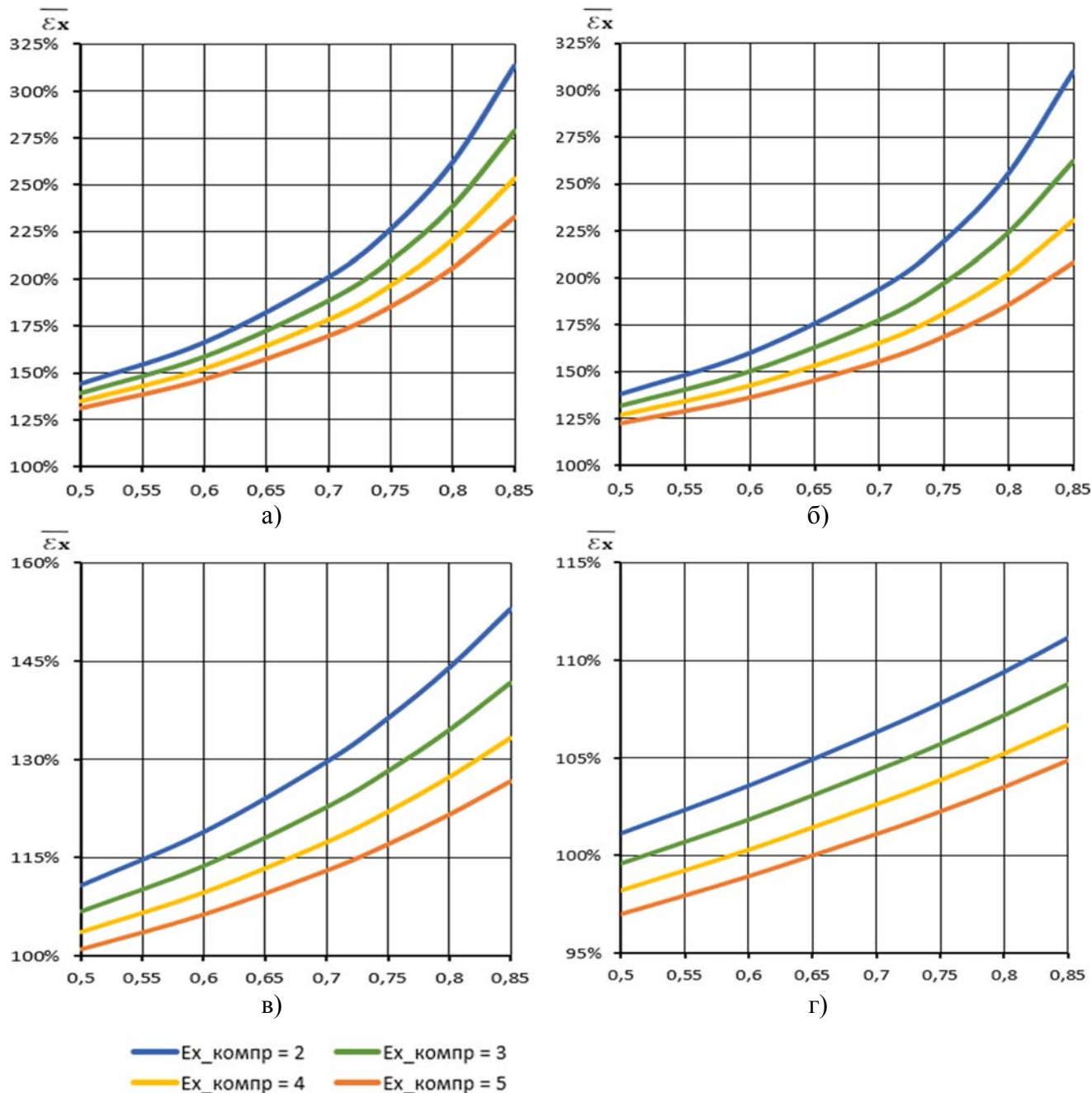


Рис. 11 Зависимость приведенного холодильного коэффициента УКВ $\varepsilon_{x_укв}/\varepsilon_{x_укв}$ от холодильного коэффициента компрессора ПКХМ и эффективности КИТО: а) Ашхабад; б) Волгоград; в) Москва; г) Сочи

Исследования, проведенные при параметрах наружного воздуха, принятых в СНиП показали невысокую эффективность степени РКИО в условиях умеренного климата при низкой температуре приточного воздуха (16 °С). Степень РКИО обеспечивает до 40% общей холодопроизводительности

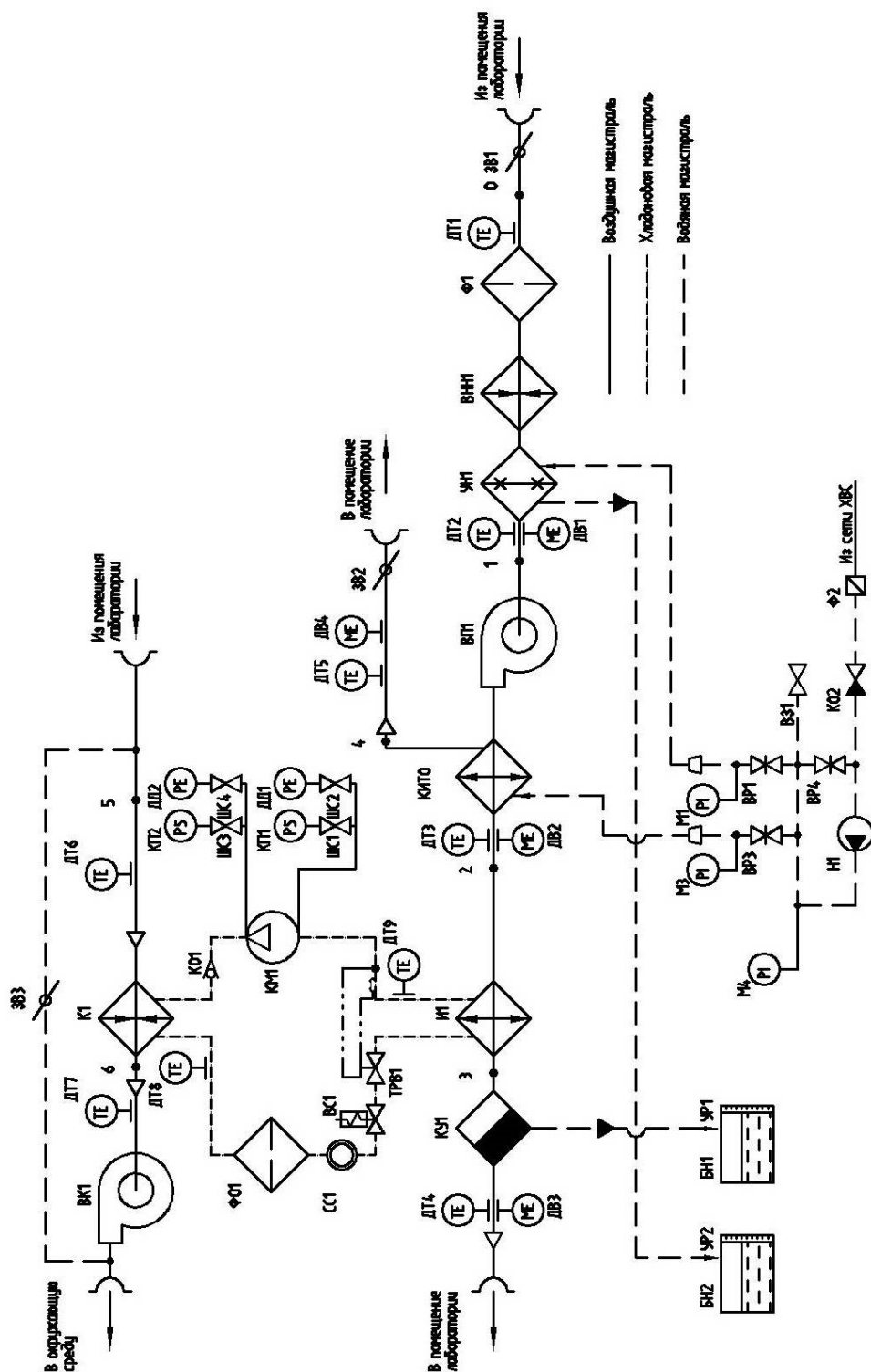
установки (при расчетных условиях, соответствующих параметрам «Б» г. Москвы по СНиП 23-01-99* и эффективности КИТО 0,75). Однако в связи с тем, что нагрузка на СКВ переменна как в течении дня, так и на протяжении теплого периода времени года, практический интерес представляет сезонная эффективность комбинированной УКВ. Был проведен ряд расчетов по климатическим данным г. Москвы (метеостанция ВВЦ) за период 1.06.2013 – 30.08.2013. В качестве расчетных условий принимались параметры в 15.00 соответствующих суток – как время, при котором нагрузка на систему кондиционирования воздуха является максимальной. Среднее значение доли холодопроизводительности, получаемой в ступени РКИО за летний период, составило 80%. В условиях, когда нагрузка на УКВ ниже номинальной расчетной, до 100% холодопроизводительности обеспечивается косвенно-испарительной ступенью, т.е без включения компрессора ПКХМ.

В четвертой главе дано описание экспериментального стенда, методики и оценка погрешности обработки опытных данных. Приведена схема экспериментального стенда (Рис. 12). Дано описание исследуемых ТО (Таблица 1). Описаны проведенные серии экспериментов. В ходе первой серии сравнивалась работа ТО различной конструкции (перекрестноточный и противоточный) в схеме с РКИО. В ТО реализован разный способ подачи воды в «мокрые» каналы. В перекрестноточном воздух предварительно увлажнялся в адиабатическом увлажнителе, а подача воды в «мокрые» каналы ТО осуществлялась путём распыления воды форсунками на входе в ТО.

Таблица 1

Наименование параметра	Теплообменник №1	Теплообменник №2
Схема движения потоков	Перекрестноточная	Противоточная
Материал пакета	Сплошной ПВХ, толщиной 1 мм	Мипласт, толщиной 1 мм
Подача воды	Форсунки мелкодисперсного распыла на входе в ТО	За счет капиллярных сил через систему водяных каналов
Площадь поверхности, м ²	14,4	16,2
Эквивалентный диаметр насадки, мм	4	4
Завод-изготовитель	Собственного производства	ООО «ТЭССО»

В противоточном ТО воздух направлялся в «мокрые» каналы непосредственно с выхода «сухих», а смачивание «мокрых» каналов осуществлялось за счет капиллярных сил. В ходе второй серии экспериментов анализировалась работа комбинированной УКВ при изменении доли вспомогательного потока в КИТО.



Было проведено три группы экспериментов, соответствующих условиям сухого, умеренного и влажного климатов. Эксперимент выполнялся с противоточным ТО, который показал себя более эффективным в первой серии экспериментов.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных данных. Первая серия экспериментов показала преимущество противоточной схемы организации потоков в КИТО (Таблица 2). УКВ с противоточным ТО показала эффективность по точке росы в 1,3...1,5 раза выше, чем установка с перекрестноточным ТО.

Таблица 2

Климатические условия	Эффективность по температуре точки росы	
	Перекрестноточный КИТО	Противоточный КИТО
Волгоград	0,33	0,51
Москва	0,43	0,56
Сочи	0,44	0,68

Следует, однако, отметить снижение эффективности работы системы с противоточным ТО в условиях сухого жаркого климата из-за недостаточного увлажнения продувочного потока. На основании обработки экспериментальных данных можно сделать вывод, что для УКВ, работающих по принципу РКИО целесообразно использовать противоточный ТО. Причем в условиях сухого жаркого климата подача воды в «мокрые» каналы КИТО за счет капиллярных сил не обеспечивает требуемого смачивания насадки.

Результаты второй серии экспериментов показали, что увеличение доли вспомогательного потока позволяет увеличить долю холодопроизводительности, вырабатываемой в КИТО. В условиях сухого климата до 50-70%, в условиях умеренного климата от 22% до 32 %, в условиях влажного климата от 12% до 16%. Для повышения эффективности работы КИТО в цикле РКИО необходимо наличие увлажнителя на входе вспомогательного потока в «мокрые» каналы ТО.

Основные результаты и выводы

1. Наиболее эффективным решением при построении приточных комбинированных УКВ является использование РКИО в качестве первой ступени.

2. Разработана расчетная модель УКВ, работающей по принципу РКИО, и комбинированной УКВ, использующей РКИО в качестве первой ступени.

3. Произведен анализ УКВ, работающей по принципу РКИО в различных климатических зонах, характерных для территории РФ. Определена зависимость температуры воздуха на выходе из КИТО от его эффективности, получена зависимость площади КИТО от его эффективности и расхода воздуха вспомогательного потока. Выведена зависимость отношения холодопроизводительности УКВ к площади теплообменной поверхности от начальных условий окружающей среды.

4. Выполнен анализ работы комбинированной УКВ в различных климатических зонах, характерных для территории РФ. Определено, что на долю

полезной холодопроизводительности, вырабатываемой в ступени РКИО, главным образом влияют эффективность КИТО и температура приточного воздуха на выходе из воздухоохладителя. Даны рекомендации по построению схемы комбинированной УКВ в зависимости от условий окружающей среды. Ступень РКИО способна обеспечить до 60-80% холодопроизводительности УКВ в условиях сухого жаркого климата, 30-40% в условиях умеренного и 15% в условиях влажного климата. В условиях сухого жаркого климата энергетическая эффективность комбинированной УКВ в 1,25...3 раза выше, чем у традиционной УКВ с ПКХМ. В условиях умеренного климата энергетическая эффективность комбинированной УКВ в 1,15...1,35 раза выше, чем у традиционной УКВ с ПКХМ (при эффективности КИТО 0,75).

5. Спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд. Результаты эксперимента подтвердили адекватность расчетно-аналитической модели и теоретических выводов. Экспериментально подтверждено, что для повышения эффективности КИТО в цикле РКИО необходимо наличие увлажнителя на входе вспомогательного потока в «мокрые» каналы ТО. Стенд внедрен в учебный процесс кафедры Э4 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гаранов С.А., Пантеев Д.А., Соколик А.Н. Водоиспарительное и комбинированное охлаждение воздуха. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 1(13), С. 84–90 (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Гаранов С.А., Пантеев Д.А., Соколик А.Н. Расчетно-аналитическая модель комбинированной установки кондиционирования воздуха. Известия высших учебных заведений, Машиностроение, 2015, №4 (661), С. 20-27 (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).

3. Гаранов С.А., Пантеев Д.А., Соколик А.Н. Расчетно-экспериментальное исследование комбинированной установки кондиционирования. Известия высших учебных заведений, Машиностроение, 2015, №5 (662), С. 3-11(0,6 п.л. / 0,2 п.л.).

4. Гаранов С.А., Пантеев Д.А., Соколик А.Н. Выбор оптимальной конструкции теплообменника регенеративного косвенно-испарительного охлаждения в составе комбинированной установки кондиционирования воздуха. Холодильная техника, 2015, №10, С. 33-37 (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

5. Жаров А.А., Гаранов С.А., Пронский Д.Ю., Соколик А.Н. Водоиспарительное охлаждение воздуха. Теоретические основы. Практическая реализация // Холодильная и криогенная техника, промышленные газы, системы кондиционирования: Тез. докл. конф. Москва. 2010 С. 56-60 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

6. Пронский Д.Ю., Соколик А.Н. Водоиспарительные и комбинированные циклы в СКВ // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур : Тез. докл. конф. Москва. 2010 С. 110-112 (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Пронский Д.Ю., Соколик А.Н. Водоиспарительные и комбинированные циклы в СКВ // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур : Тез. докл. конф. Москва. 2011 С. 120-122 (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).