

Литература

1. Алексеев В.В., Чекарев К.В. Получение пресной воды из влажного воздуха // Аридные экосистемы. – 1996. – Т. 2. – № 2-3.
2. Перельштейн Б.Х. Новые энергетические системы: Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – 244 с.
3. Ваш Солнечный Дом. Все для автономного и резервного энергоснабжения // <http://solarhome.ru>.
4. Бадилькес И.С. Абсорбционные холодильные машины. / И. С. Бадилькес, Р. Л. Данилов. – М.: Пищевая промышленность, 1996. – 356 с.
5. Галимова Л.И. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы: Курс лекций // Л.И. Галимова. – Астрахань, изд-во АГТУ, 1997. – 226 с.
6. Ищенко И.Н. Моделирование циклов насосных и безнасосных абсорбционных холодильных агрегатов // Наукові праці ОНАХТ. – 2010. – Вип. 38. – Т. 2. – С. 393-405.
7. Осадчук Е.А. Аналитические зависимости для расчета термодинамических параметров и теплофизических свойств водноаммиачного раствора / Осадчук Е.А., Титлов А.С. // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Вип. 39. – Т. 1. – С. 178-182.

УДК [621.565:664.045.5]:66.012-52

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВЫМИ АБСОРБЦИОННЫМИ ХОЛОДИЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Титлова О.А., канд. техн. наук, ассистент, Холодков А.О., аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Приведены новые системы автоматического управления (САУ) абсорбционными холодильными приборами (АХП). Обоснована концепция управления, предполагающая переход от позиционных к непрерывным (квазинепрерывным) алгоритмам и реализацию новых функций, обеспечивающих во всех режимах работы АХП необходимую степень очистки пара аммиака от воды и минимизацию потерь тепла. Исследованы изменения статических и динамических свойств АХП при изменениях интенсивности отвода тепла от внешней поверхности дефлегматора в окружающую среду и подводимой к генераторному узлу тепловой мощности. Показано, что существует как минимум три основных диапазона тепловой мощности — не запуск генератора, неоптимальной и квазиоптимальной эффективности работы.

The new automatic control systems (ACS) of absorption refrigerators (AR) are presented. The control concept, which presumes the transition from position to continuous (quasi-continuous) algorithms and realization of the new functions providing for all operating modes of AR the necessary degree of purification of the ammonia vapor from water and minimization of the heat losses, is substantiated. The changes of the static and dynamic properties of the AR The changes of the static and dynamic characteristics with changes in the intensity of heat rejection from the dephlegmator outer surface into the environment and supplied to the generator output, are explored. It is shown that there are at least three basic heat output ranges — not launching the generator, quasi-optimal and sub-optimal efficiency of work.

Ключевые слова: АХП, САУ, энергетическая эффективность, дефлегматор, метод косвенного контроля качества очистки аммиака, концепция построения эффективной САУ.

Использование искусственного холода является приоритетным способом длительного хранения пищевых продуктов. При стабильных температурных режимах он позволяет сохранить их первоначальные свойства без существенных изменений. Основными источниками искусственного холода являются компрессионные и абсорбционные холодильные приборы (КХП и АХП). Основным преимуществом КХП, которое обусловило их широкое распространение, является более высокая энергетическая эффективность. Системы автоматического управления (САУ), как КХП, так и АХП, обеспечивают только стабилизацию температур в охлаждаемых камерах. При этом они традиционно реализуют простейшие позиционные алгоритмы. Для КХП это сводится к периодическим включениям и отключениям компрессора, а для АХП — периодическому подводу тепловой мощности к генераторному узлу. Такие алгоритмы управления обуславливают значительные амплитуды колебаний температур в охлаждаемых камерах и смещение среднего значения этих колебаний относительно заданных значений. В конечном итоге это приводит к снижению качества хранящихся продуктов.

В АХП, реализация таких САУ предопределяет, еще на этапе их проектирования, установку в генераторном узле нагревателя существенно ограниченной мощности. Это связано с тем, что при относительно продолжительных его включениях на полную мощность, дефлегматор АХП может не обеспечить полную очистку пара аммиака от воды. Вода, попадая в конденсатор, резко снижает энергетическую эффективность АХП. Важно отметить, что такое снижение мощности нагревателя не гарантирует полной очистки аммиака во всех режимах работы АХП, особенно, в переходных, в том числе — пусковых. При этом время переходных процессов, достаточно большое, из-за ограничения мощности увеличивается еще больше. Это является еще одним фактором ухудшения условий хранения продуктов.

Проведенный анализ показывает [5], что для эффективного управления процессом производства искусственного холода в АХП необходимо сформулировать общую концепцию управления, которое может обеспечить повышение энергетической эффективности и улучшение условий хранения пищевых продуктов за счет поддержания стабильных температурных режимов и сокращения времени переходных процессов. Показано [8], что АХП относятся к классу статических объектов с высокой тепловой инерционностью и имеют нелинейность по каналу «подводимая к генераторному узлу тепловая мощность — температура в охлаждаемой камере». Особенность управления двухкамерных и однокамерных с низкотемпературным отделением (НТО) АХП состоит в том, что контролю подлежит только температура в холодильной камере (ХК).

Сформулированы задачи управления процессом производства искусственного холода в АХП [9, 10]. Главная задача управления АХП заключается в повышении динамической точности стабилизации регулируемой температуры в ХК на ее заданном значении для обеспечения оптимальных условий хранения пищевых продуктов. Вторая, но не второстепенная, — в повышении энергетической эффективности АХП, которая может быть решена, в частности, за счет оптимизации тепловых режимов работы подъемного участка дефлегматора. Решение вышеуказанных задач не должно приводить к нарушениям работы основных элементов АХП.

Таким образом, перспективным направлением совершенствования САУ АХП является переход от простейших позиционных алгоритмов управления к непрерывным и использование дополнительной информации о ходе процесса, в частности — о положении уровня парожидкостного фронта (ПЖФ) на подъемном участке дефлегматора, который оказывает значительное влияние на энергетическую эффективность АХП.

Цель исследования — повысить энергетическую эффективность процесса производства искусственного холода и улучшить условия хранения пищевых продуктов в АХП за счет совершенствования их систем автоматического управления.

Рассмотрена концептуальная модель АХП как ОУ (рис. 1) [8]. В соответствии с ней АХП рассматривается как объект с: входными параметрами (управляющими воздействиями) — подводимой к генератору тепловой мощностью P (u_1) и интенсивность отвода тепла от поверхности дефлегматора (u_2); выходными параметрами — температурой на поверхности нагревателя θ_n и в ХК $\theta_{хк}$, уровнем ПЖФ на подъемном участке дефлегматора h_ϕ ; контролируемые возмущениями — температурой воздуха окружающей среды θ_{oc} и напряжением сети переменного тока $u_{сети}$; неконтролируемые возмущениями — характеристиками продукта и степени загрузки охлаждаемых камер W , конструкционными ψ_k и эксплуатационными $\psi_{экс}$ особенностями.

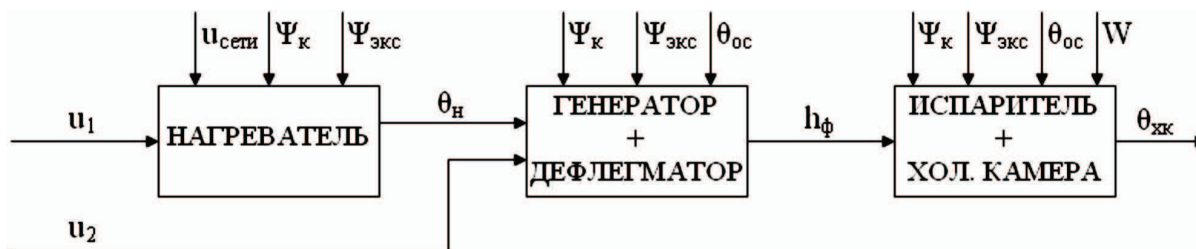
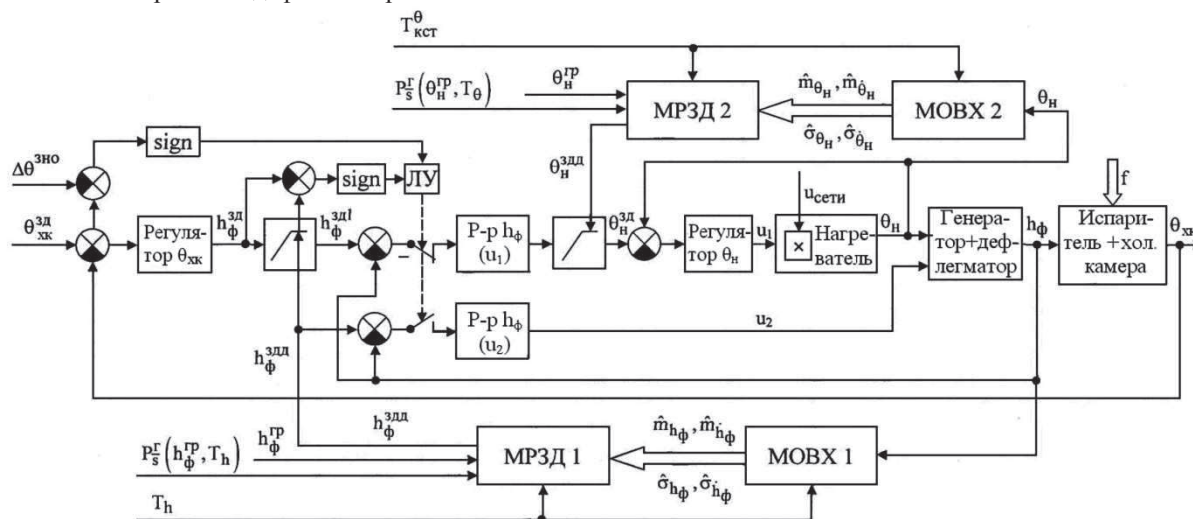


Рис. 1 – Структурная схема концептуальной модели АХП как ОУ

Анализ концептуальной модели АХП как ОУ позволил сформулировать и формализовать концепцию построения многоконтурной САУ АХП с коммутируемой структурой, целью которой является увеличение их энергетической эффективности (без ограничений сложности реализации). Такая САУ имеет два канала управления (рис. 2): 1) традиционный, управляющее воздействие — изменение тепловой мощности, подводимой к генератору АХА; 2) новый, управляющее воздействие — изменение интенсивности отвода тепла от поверхности подъемного участка дефлегматора в окружающую среду. За счет работы

этих каналов САУ позволяет стабилизировать уровень ПЖФ h_{ϕ} на его заданном значении и ограничить температуру на поверхности нагревателя θ_n в пусковых режимах работы АХП. Выбор канала управления осуществляется автоматически в зависимости от текущей ситуации, в частности, от колебаний интенсивности подвода тепловой мощности к генератору и температуры воздуха окружающей среды.

Предварительные исследования показали [10], что ПЖФ не имеет четкой границы и распределен в дефлегматоре на участке длиной до 50 см. Поэтому в дальнейших исследованиях завершение очистки аммиака контролируется по верхней границе ПЖФ, т.е. при достижении температурой в контрольной точке на поверхности дефлегматора значения $45 \dots 50 \text{ } ^\circ\text{C}$.



MOBX – модуль оценки вероятностных характеристик случайных процессов $h_{\phi}(t)$ и $\theta_n(t)$ на скользящем интервале времени T ;

MP3D – модуль расчета текущих допустимых значений $h_{\phi}^{злд}(t)$ и $\theta_n^{злд}(t)$;

ЛУ – логическое устройство управления коммутатором структуры САУ

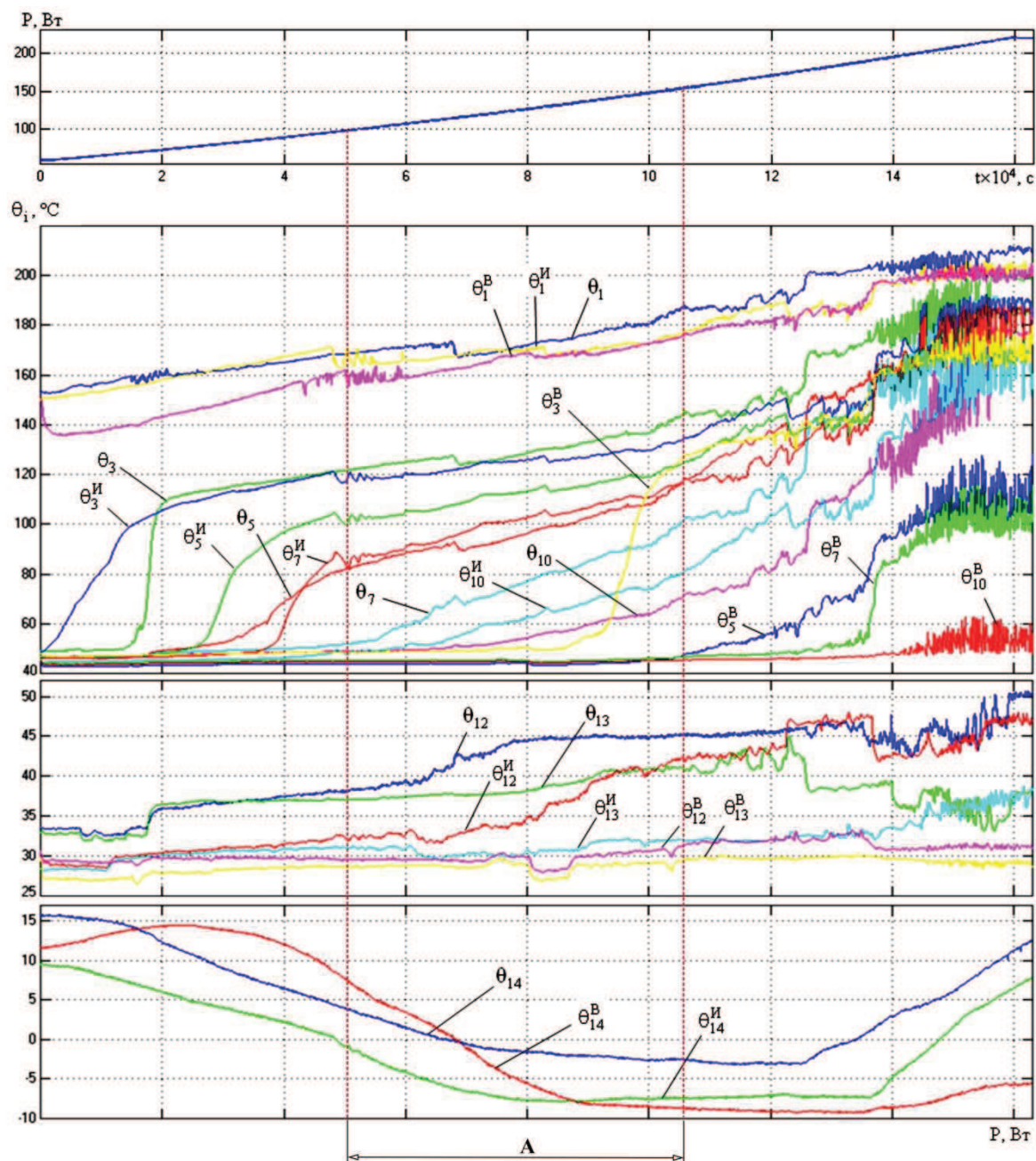
Рис. 2 – Структурная схема САУ АХП с коммутируемой структурой:

Для изучения статических свойств АХП по каналам «подводимая к генератору АХА тепловая мощность — температуры поверхности элементов АХА в контрольных точках», были организованы автоматизированные эксперименты, которые можно рассматривать как получение квазистатических характеристик. Их сущность состоит в изменении с постоянной, заранее выбранной, скоростью значения подводимой к генераторному узлу АХА мощности от 60 Вт до 220 Вт и регистрацией изменения при этом температур в контрольных точках АХП (θ_1 — на выходе из термосифона, $\theta_2 \dots \theta_{11}$ — по длине дефлегматора, θ_{12} и θ_{13} — в середине и на выходе конденсатора, соответственно, θ_{14} — на ребре испарителя). Каждый опыт по получению квазистатических характеристик проводился на протяжении 48 часов. В результате таких экспериментов был получен набор квазистатических характеристик АХП по исследуемым каналам при различных условиях теплоотвода с внешней поверхности дефлегматора АХА. Сравнительный анализ полученных квазистатических характеристик АХП (рис. 3) позволил выделить три основных диапазона тепловой мощности — не запуск генератора, неоптимальной и квазиоптимальной (рабочая область) эффективности работы АХА [6, 10].

Проведены экспериментальные исследования переходных тепловых режимов в дефлегматоре АХА при: запуске АХП в работу при разных значениях тепловой мощности, подводимой к генератору АХА (рис. 4); изменении подводимой к генератору АХА тепловой мощности в рабочем диапазоне, выделенном на квазистатических характеристиках, т.е. от 70 Вт до 180 Вт; теплоизоляции подъемного участка дефлегматора и значении подводимой к генератору тепловой мощности, равном 70 Вт; принудительном отводе тепла от подъемного участка дефлегматора вентилятором, мощностью 6 Вт и 12 Вт, и значении подводимой к генератору тепловой мощности, равном 150 Вт.

Разработаны и реализованы семь вариантов структур САУ АХП: одноконтурная позиционная САУ с идеальным двухпозиционным регулятором (реле) без гистерезиса с позициями управления 0 и 110 Вт, 0 и 220 Вт; одноконтурная позиционная САУ с реальным двухпозиционным регулятором (реле) с гистерезисом $\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$, с позициями управления 0 и 110 Вт, 0 и 220 Вт; одноконтурная линейная САУ с ПИД-регулятором; одноконтурная САУ с двухпозиционным ПИД-регулятором и вибрационной линеаризаци-

ей релейного елемента; каскадная двухконтурная САУ АХП с вспомогательной САУ температуры на выходе из термосифона; каскадная двухконтурная САУ АХП с вспомогательной САУ температуры на выходе из подъемного участка дефлегматора; каскадная трехконтурная САУ АХП с вспомогательными САУ температуры на выходе из термосифона и температуры на выходе из подъемного участка дефлегматора.



θ_i , θ_i^B , $\theta_i^И$ – температури без изменения условий теплоотвода в окружающую среду, при интенсивном теплоотводе с помощью вентилятора и с тепловой изоляцией по всей длине подъемного участка дефлегматора соответственно

Рис. 3 – Сравнение квазистатических характеристик зависимостей температур поверхности элементов АХА в контрольных точках от подводимой к генератору тепловой мощности при различных условиях работы подъемного участка дефлегматора

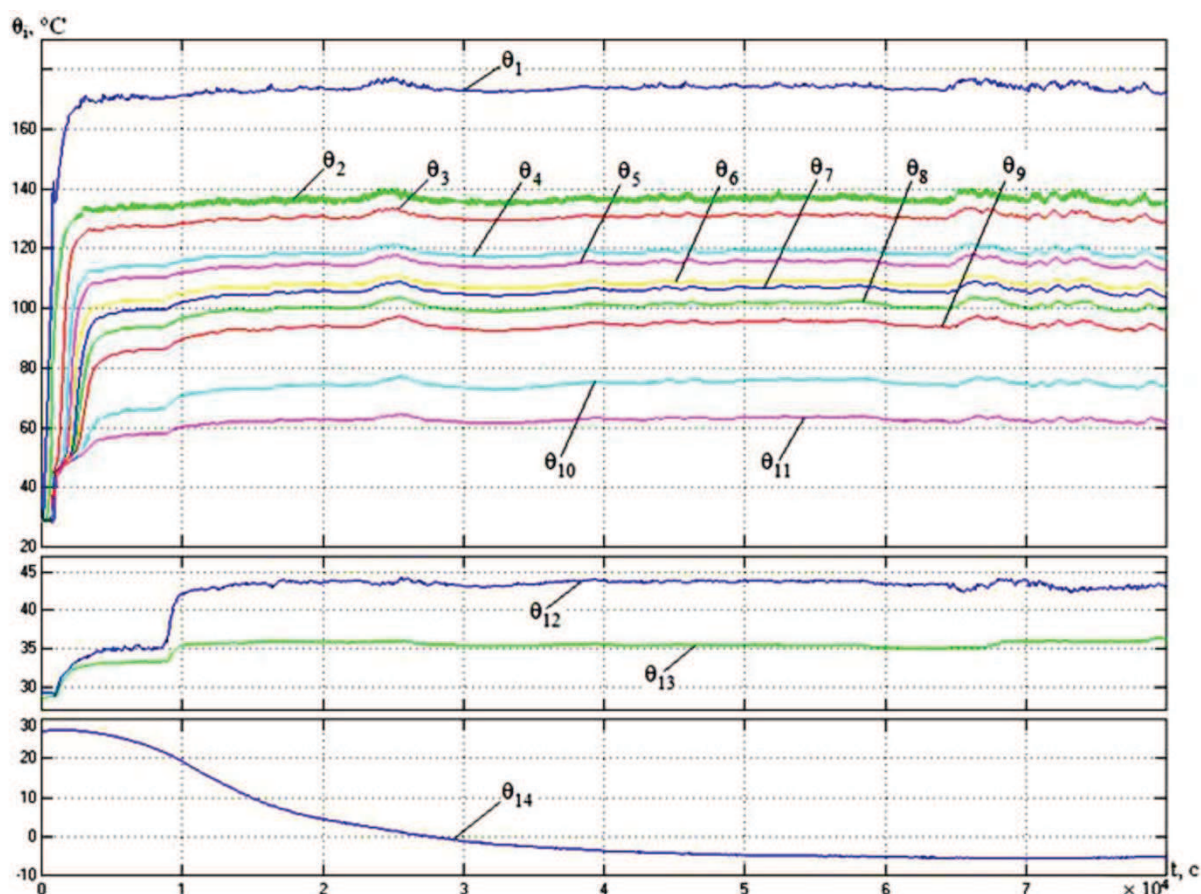


Рис. 4 – Динамика изменения температур поверхности элементов АХА в контрольных точках при запуске и установившейся работе АХП на мощности в 140 Вт на интервале времени $0...8 \cdot 10^4$ с (примерно 22,2 ч)

Результаты работы каскадной трехконтурной САУ приведены на рис. 5.

Проводился отдельный поиск энергосберегающих режимов работы перекачивающего термосифона в составе холодильного агрегата абсорбционного типа.

В качестве объекта исследований использовались отдельные абсорбционные холодильные агрегаты (АХА) типа АШ-160 производства ВЗХ. Об энергетической эффективности режимов судили по величине среднеинтегральной температуры испарителя. Исследования проводились в диапазоне температур окружающей среды, соответствующему классу SN, т.е. $T_{o.c} = 10...32$ °C. Исследовались два типа АХ: в «стандартном» и «низкотемпературном» исполнении, отличающиеся составом рабочего тела.

Исследования термосифона в составе АХА показали значительную (до 7 °C) неравномерность температурного поля по длине подъемного участка, что связано с потерями тепла в окружающую среду [11]. Такая ситуация предопределяет частичную конденсацию пара. Конденсация вызывает увеличение плотности парожидкостного столба и рост гидравлического сопротивления на подъемном участке ПТС. Для обеспечения первоначального расхода необходимо дополнительно увеличить подъемную (Архимедову) силу, величина которой определяется количеством генерируемого пара, т.е. величиной подводимой тепловой нагрузки.

Для устранения тепловых потерь на подъемном участке был установлен дополнительный электрический нагреватель. Длина основного нагревателя составляла 0,1 м, а дополнительного — 0,23 м [12].

Теплоподвод к крепкому раствору в этом случае осуществлялся последовательно — сначала в зоне основного нагревателя (Q'_{TC}), а затем — в зоне дополнительного (Q''_{TC}), т.е. раствор проходит как бы первый каскад, а затем — второй. Величина мощности теплоподвода к дополнительному электронагревателю не превышала 20 % от мощности основного. Суммарная мощность основного и дополнительного нагревателей не превышала номинальной мощности теплоподвода к термосифону АХА (Q_{TC}).

Снижение энергопотребления при таком способе достигает 12 %.

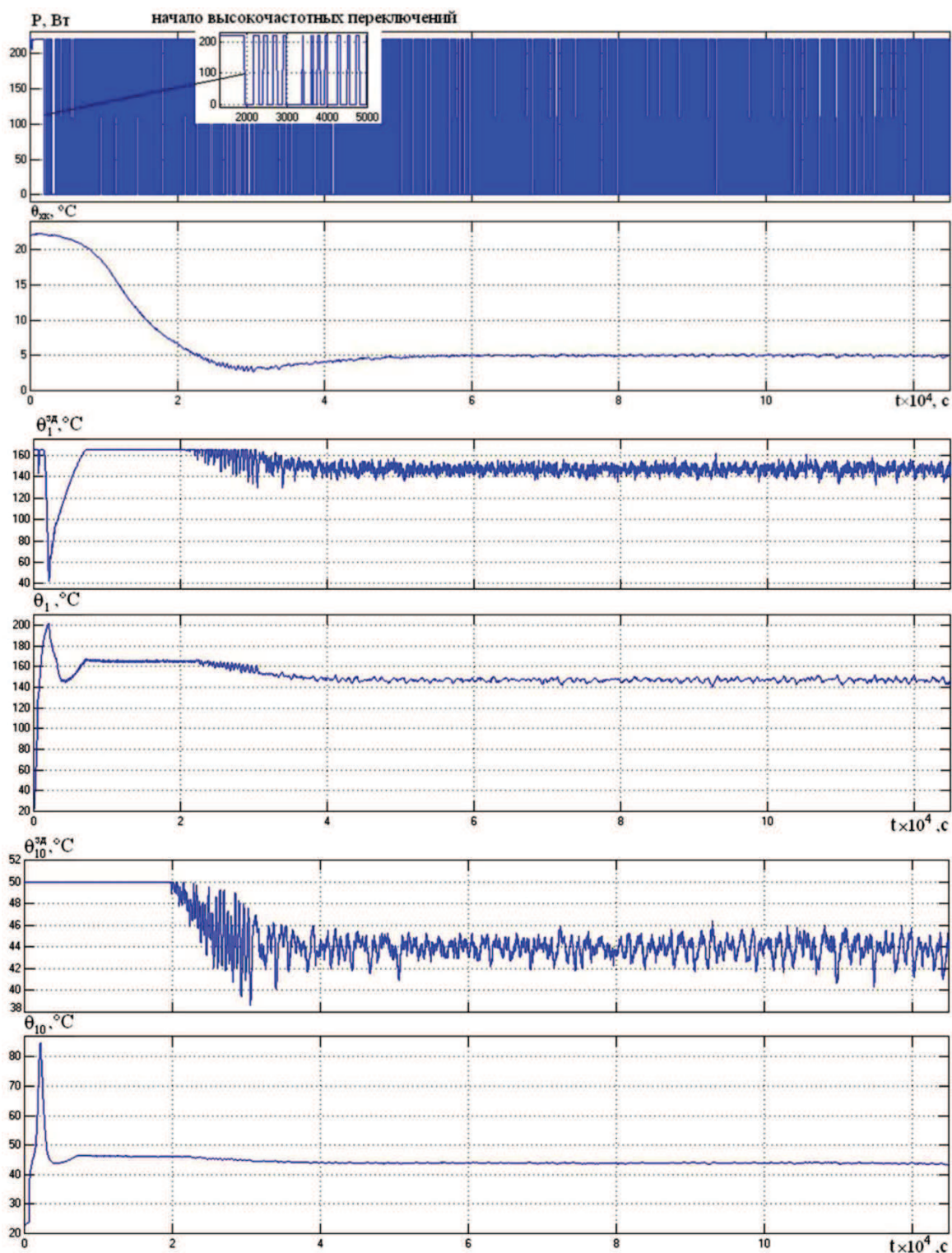


Рис. 5 – Результаты работы при умеренной температуре воздуха окружающей среды САУ АХП с вспомогательными САУ θ_1 и САУ θ_{10} , ПИД-регуляторами во всех контурах управления и вибрационной линеаризацией релейного элемента с охватом части объекта

В результате экспериментальных исследований ПТС были обнаружены оптимальные значения величины мощности теплопровода и температуры на выходе термосифона, соответствующие минимуму энергозатрат.

Верхний предел тепловой нагрузки на ПТС в настоящих исследованиях соответствовал оптимальным величинам и составил — для АХА в «стандартном» исполнении $Q'_{TC} = 70$ Вт, в «низкотемпературном» — $Q'_{TC} = 80$ Вт.

Величина теплоподвода на дополнительный электронагреватель (Q''_{TC}) не превышала 20 Вт, а суммарная величина Q_{TC} во всех случаях не превышала Q'_{TC} , т.е. диапазон изменения тепловой нагрузки на основной нагреватель составил 40...70 Вт (для «стандартной» АХА) и 40...80 Вт (для «низкотемпературной» АХА).

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает следующее.

В обоих случаях («стандартное» и «низкотемпературное» исполнение АХА) в исследуемом диапазоне величин тепловых нагрузок на ПТС и их комбинациях имеется оптимум (минимум) суммарной тепловой нагрузки Q_{TC} .

В исследуемом диапазоне тепловых нагрузок при $T_{o.c} = 25$ °С оптимум (минимум) суммарной тепловой нагрузки лежит в области $Q_{TC} \approx 60$ Вт, при этом диапазон $Q'_{TC} = 45...50$ Вт, а $Q''_{TC} = 10...15$ Вт.

Эти результаты показывают, что одна и та же величина холодопроизводительности АХА может быть достигнута при подаче тепловой нагрузки на основной нагреватель 67,5 Вт или распределенной нагрузкой на основной и дополнительный нагреватели в сумме 60 Вт. Наиболее стабильные результаты достигаются, когда $Q_{TC} = Q'_{TC} + Q''_{TC} = 47,5 + 12,5 = 60$ Вт.

Таким образом можно утверждать, что при обеспечении некоторой холодопроизводительности «стандартного» АХА при $T_{o.c} = 25$ °С, соответствующей тепловой нагрузке на основном нагревателе 67 Вт, можно получить экономию энергии 7,5 Вт или 10,4 %, если распределить между основным и дополнительным нагревателями тепловую нагрузку 60 Вт, таким образом, чтобы на основном нагревателе она составляла 45...50 Вт, а на дополнительном — 10...15 Вт.

Анализ температурных полей ПТС показывает, что оптимум холодопроизводительности АХА достигается в том случае, когда имеет место наименьший перепад температур по высоте подъемной части, т.е. температуры конца кипения (t''_s) и выхода ПТС (t''_{TC}) максимально близки. Таким образом, распределенная тепловая нагрузка на ПТС позволяет осуществить последовательную (каскадную) генерацию пара на минимальном уровне температур, что и обеспечивает энергосберегающие режимы АХА.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что минимальное энергопотребление АХА достигается при одновременном использовании каскадного и комбинированного теплоподвода к термосифону [12]. Этот режим характеризуется кратковременным периодом пуска (100 % номинальной мощности) с дальнейшим переходом на меньшую мощность (до 60 % номинальной мощности) и отключением теплоподвода при достижении заданной температуры в камере. Снижение энергопотребления при таком режиме достигает 20 %.

Выводы

1. На основе анализа процесса производства искусственного холода в АХП обоснована общая концепция построения эффективной САУ. Разработана концептуальная модель АХП как ОУ и на ее основе, в рамках общей концепции управления, предложена структура САУ, которая реализует два управляющих воздействия — изменение величины подводимой к генераторному узлу АХП тепловой мощности и интенсивности отвода тепла от внешней поверхности подъемного участка дефлегматора в окружающую среду. Такая САУ позволяет минимизировать потери тепловой энергии за счет управления процессом очистки аммиака на подъемном участке дефлегматора и потерь тепла с этого участка в окружающую среду, а также повысить статическую и динамическую точность управления температурными режимами в охлаждаемых камерах АХП.

2. Проведены экспериментальные исследования статических и динамических свойств АХП при различной интенсивности теплоотвода от внешней поверхности дефлегматора в окружающую среду и величине подводимой к генераторному узлу тепловой мощности. В результате экспериментов выделены три основных диапазона тепловой мощности — не запуск генератора (0...40 Вт и 180...220 Вт), неоптимальной (40...70 Вт и 110...180 Вт) и квазиоптимальной (70...110 Вт) работы абсорбционного холодильного цикла.

3. Разработаны, программно реализованы и исследованы семь вариантов структур САУ АХП, начиная с простейшей — двухпозиционной и, заканчивая — каскадной трехконтурной САУ АХП с вспомогательными САУ температуры на выходе из термосифона и температуры на выходе из подъемного участка дефлегматора [1-4]. Сравнительный анализ всех вариантов структур САУ по основным показателям их работы, полученным в ходе экспериментов показал, что применение каскадных структур САУ в составе АХП позволяет значительно улучшить как условия хранения пищевых продуктов за счет стабилизации температурных режимов в их охлаждаемых камерах (максимальное динамическое отклонение темпера-

туры в холодильной камере не превышает 0,5 °С), так и их энергетические характеристики. Так, трехконтурная САУ позволяет, по сравнению с базовым двухпозиционным алгоритмом, уменьшить суточное энергопотребление на 20...30 %.

4. Для реализации энергосберегающих режимов в аппаратах с АХА целесообразно использовать специальную систему автоматического управления, где в качестве регулятора и системы сбора и обработки информации использован микропроцессорный контроллер (микроконтроллер).

Література

1. Пат. 30771 Україна, МПК F 25 В 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами / Хобін В. А., Тітлова О. О.; заявник та патентовласник Одеськ. нац. акад. харч. техн. – № 200712763 ; заявл. 19.11.07 ; опубл. 11.03.08, Бюл. № 5.
2. Пат. 41904 Україна, МПК F 25 В 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами / Хобін В. А., Тітлова О. О.; заявник та патентовласник Одеськ. нац. акад. харч. техн. – № 200901249 ; заявл. 16.02.09 ; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.
3. Пат. 42970 Україна, МПК F 25 В 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами / Хобін В. А., Мазур А. В., Тітлова О. О.; заявник та патентовласник Одеськ. нац. акад. харч. техн. – № 200902378 ; заявл. 17.03.09 ; опубл. 27.07.09, Бюл. № 14.
4. Пат. 53006 Україна, МПК F 25В 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами / Хобін В. А., Тітлова О. О.; заявник та патентовласник Одеськ. нац. акад. харч. техн. – № 201001276 ; заявл. 08.02.10 ; опубл. 27.09.10, Бюл. № 18.
5. Титлов, А.С. Энергосберегающее управление режимами бытовых абсорбционных холодильных приборов (АХП). Часть. 1 [Текст] / А.С. Титлов // Автоматизація технологічних і бізнес процесів. – 2011. – № 5, 6. – С.38-43. (Часть. 2. – С.45-53).
6. Титлова, О. А. Анализ влияния тепловой мощности, подводимой в генераторе абсорбционного холодильного агрегата, на режимы работы и энергетическую эффективность абсорбционного холодильного прибора [Текст] / О. А. Титлова, А. С. Титлов // Наук. праці ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39. – Том 1. – С. 148-154.
7. Титлова О.А. Технологический процесс производства искусственного холода в абсорбционных холодильных приборах и задачи повышения его энергетической эффективности средствами автоматического управления [Текст] / О. А. Титлова // Наук. праці ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 40. – Том 2. – С. 406-412.
8. Хобин В.А. Система автоматического управления с коммутируемой структурой, минимизирующая энергопотребление АДХМ [Текст] / В. А. Хобин, О. А. Титлова, А. В. Мазур // Наук. праці ОНАХТ. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Том 1. – С. 149-151.
9. Хобин В.А. К вопросу измерения парожидкостного фронта в дефлегматоре абсорбционно-диффузионной холодильной машине (АДХМ) [Текст] / В. А. Хобин, О. А. Титлова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон, 2007. – №2(20). – С. 94-102.
10. Хобин В. А. Определение температуры парожидкостной смеси в дефлегматоре АДХМ по результатам измерений температуры его поверхности [Текст] / В. А. Хобин, О. А. Титлова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон, 2009. – №1(23). – С. 70-73.
11. Тітлов О.С. Науково-технічні основи створення енергозберігаючих побутових абсорбційних холодильних приладів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.05.14 / О.С. Тітлов. – Одеса, 2008. – 40 с.
12. Тяхай Д.С. Зниження енергоспоживання в апаратах с абсорбційно-дифузійними холодильними машинами шляхом організації раціональних теплових режимів генераторного вузла : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.14. / Д.С. Тяхай. – Одеса, 2000. – 16 с.