

УДК 621.565:66.012-52  
Т 45

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫМИ ХОЛОДИЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

О. А. Титлова, канд. техн. наук, доц.

*Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса*

**Аннотация.** Приведены новые системы автоматического управления абсорбционными холодильными приборами. Обоснована концепция управления, предполагающая переход от позиционных к непрерывным (квазинепрерывным) алгоритмам и реализацию новых функций, обеспечивающих во всех режимах работы приборов необходимую степень очистки пара аммиака от воды и минимизацию потерь тепла. Исследованы изменения статических и динамических свойств приборов при изменениях интенсивности отвода тепла от внешней поверхности дефлегматора в окружающую среду и подводимой к генераторному узлу тепловой мощности.

**Ключевые слова:** абсорбционные холодильные приборы, энергетическая эффективность, дефлегматор, метод косвенного контроля качества очистки аммиака.

**Анотація.** Наведено нові системи автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами. Обґрунтовано концепцію керування, що припускає перехід від позиційних до неперервних (квазінеперервних) алгоритмів і реалізацію нових функцій, які забезпечують у всіх режимах роботи приладів необхідний ступінь очищення пари аміаку від води і мінімізацію втрат тепла. Досліджено зміни статичних і динамічних властивостей приладів при змінах інтенсивності відводу тепла від зовнішньої поверхні дефлегматора в навколишнє середовище і теплової потужності, що підводиться до генераторного вузла.

**Ключові слова:** абсорбційні холодильні прилади, енергетична ефективність, дефлегматор, метод непрямого контролю якості очищення аміаку.

**Abstract.** The new automatic control systems of the absorption refrigeration appliances have been given. The control concept is proved. This concept implies a transition from positional to continuous (quasi-continuous) algorithms and implementation of new functions which provide the required degree of the purification of the ammonia vapor from water and also they minimize heat losses in all operation modes of the AHP. The changes of static and dynamic properties of the AHP are studied under the changes of the intensity of the heat removal from the external surface of the reflux condenser into the environment and which is supplied to the generator node output.

**Keywords:** absorption refrigeration appliances, energy efficiency, reflux condenser, an indirect method of quality control of ammonia purification.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Использование искусственного холода является приоритетным способом длительного хранения пищевых продуктов. При стабильных температурных режимах он позволяет сохранить их первоначальные свойства без существенных изменений. Основные источники искусственного холода – 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 [7].

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.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

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. В работе [10] показано, 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 [8, 9]. 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 указанных 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 СТАТЬИ** – повысить энергетическую эффективность процесса производства искусственного холода и улучшить условия хранения пищевых продуктов в АХП за счет совершенствования их систем автоматического управления.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрена концептуальная модель АХП как ОУ (рис. 1) [10]. В соответствии с ней АХП рассматривается как объект с входными параметрами (управляющими воздействиями) – подводимой к генератору тепловой мощностью  $P(u_1)$  и интенсивностью отвода тепла от поверхности дефлегматора ( $u_2$ ); выходными параметрами – температурой на поверхности нагревателя  $\theta_n$  и в ХК  $\theta_{ХК}$ , уровнем ПЖФ на подъемном участке дефлегматора  $h_\phi$ ; контролируемыми возмущениями – температурой воздуха окружающей среды  $\theta_{о.с}$  и напряжением сети переменного тока  $u_{сети}$ ; неконтролируемыми возмущениями – характеристиками продукта и степени загрузки охлаждаемых камер  $W$ , конструкционными  $\psi_k$  и эксплуатационными  $\psi_{экс}$  особенностями.

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  $h_\phi$  на его заданном значении и ограничить температуру на поверхности нагревателя  $\theta_n$  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.

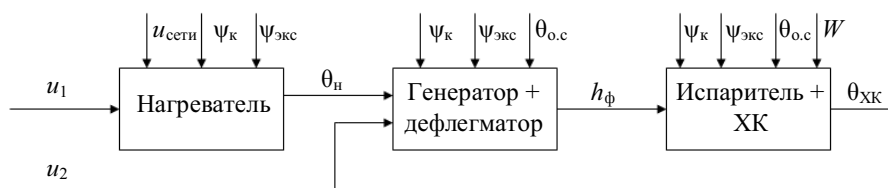
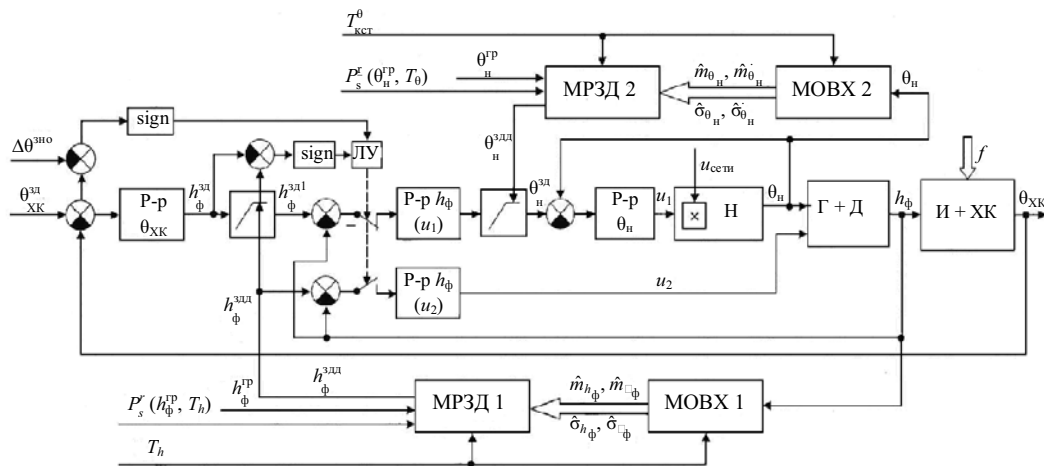


Рис. 1. Структурная схема концептуальной модели АХП как ОУ



**Рис. 2.** Схема САУ АХП с коммутируемой структурой: МОВХ – модуль оценки вероятностных характеристик случайных процессов  $h_{\phi}(t)$  и  $\theta_n(t)$  на скользящем интервале времени  $T$ ; МРЗД – модуль расчета текущих допустимых значений  $h_{\phi}^{зд}(t)$  и  $\theta_n^{зд}(t)$ ; ЛУ – логическое устройство управления коммутатором структуры САУ; P-p – регулятор; Н – нагреватель; Г – генератор; Д – дефлегматор; И – испаритель

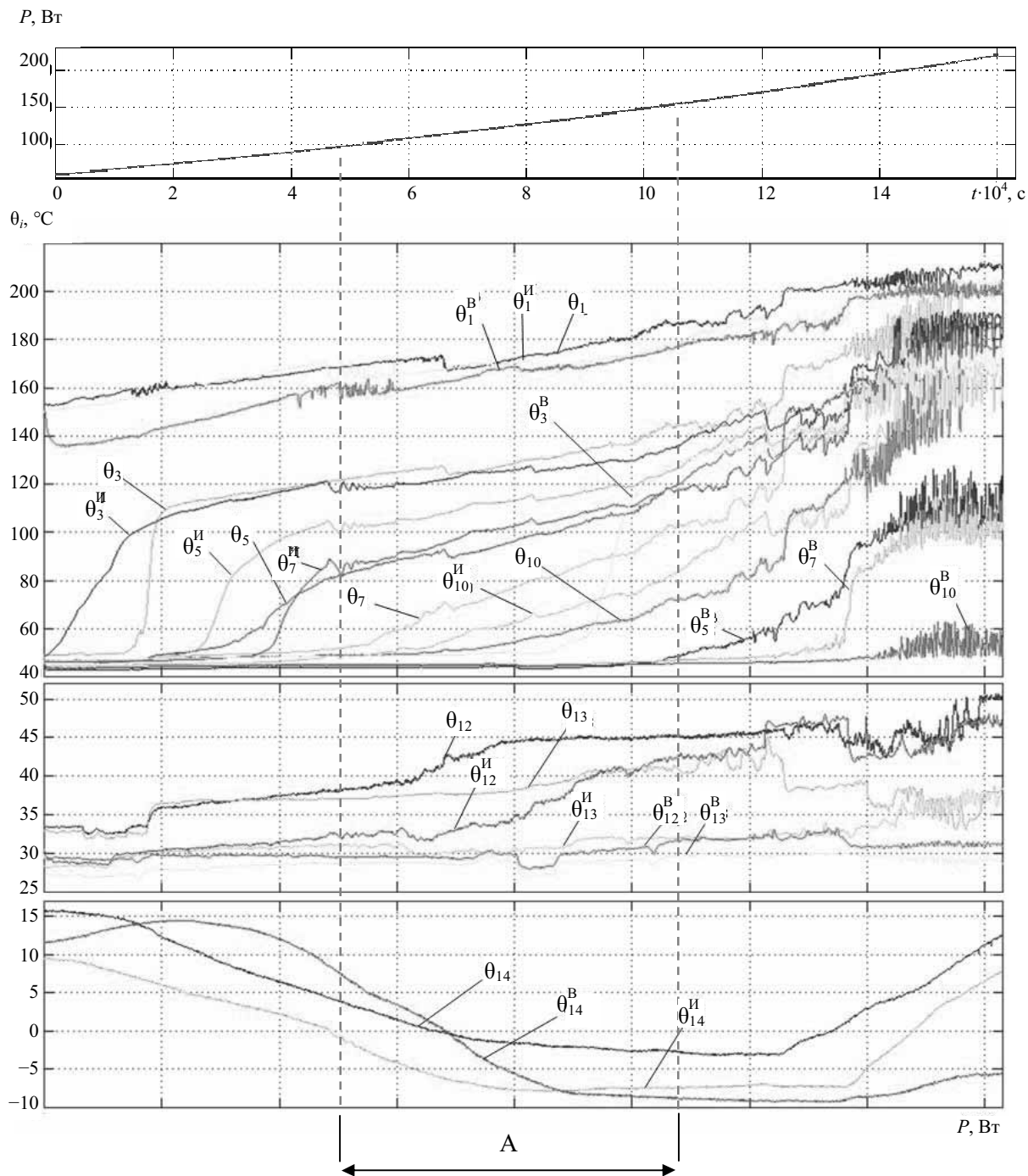
Предварительные исследования [9] показали, что ПЖФ не имеет четкой границы и распределен в дефлегматоре на участке длиной до 50 см. Поэтому в дальнейших исследованиях завершение процесса очистки аммиака контролировалось по верхней границе ПЖФ, т. е. при достижении температурой в контрольной точке на поверхности дефлегматора значения 45...50 °С.

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 до 220 Вт и регистрацией изменения при этом температур в контрольных точках АХП ( $\theta_1$  – на выходе из термосифона;  $\theta_2... \theta_{11}$  – по длине дефлегматора;  $\theta_{12}$  и  $\theta_{13}$  – в середине и на выходе конденсатора, соответственно;  $\theta_{14}$  – на ребре испарителя). Каждый опыт по получению квазистатических характеристик проводился на протяжении 48 часов. В результате 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 – незапуска генератора, неоптимальной и квазиоптимальной (рабочая область) эффективности работы АХА [6, 9].

Проведены экспериментальные исследования переходных тепловых режимов в дефлегматоре АХА при таких условиях: 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: от 70 до 180 Вт; теплоизоляции подъемного участка дефлегматора и значении подводимой к генератору тепловой мощности 70 Вт; принудительном отводе тепла от подъемного участка дефлегматора вентилятором мощностью 6 и 12 Вт и значении подводимой к генератору тепловой мощности 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  $\pm 2$  °С, 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 линеаризацией релейного элемента; 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.

Результаты работы каскадной трехконтурной САУ приведены на рис. 5.



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

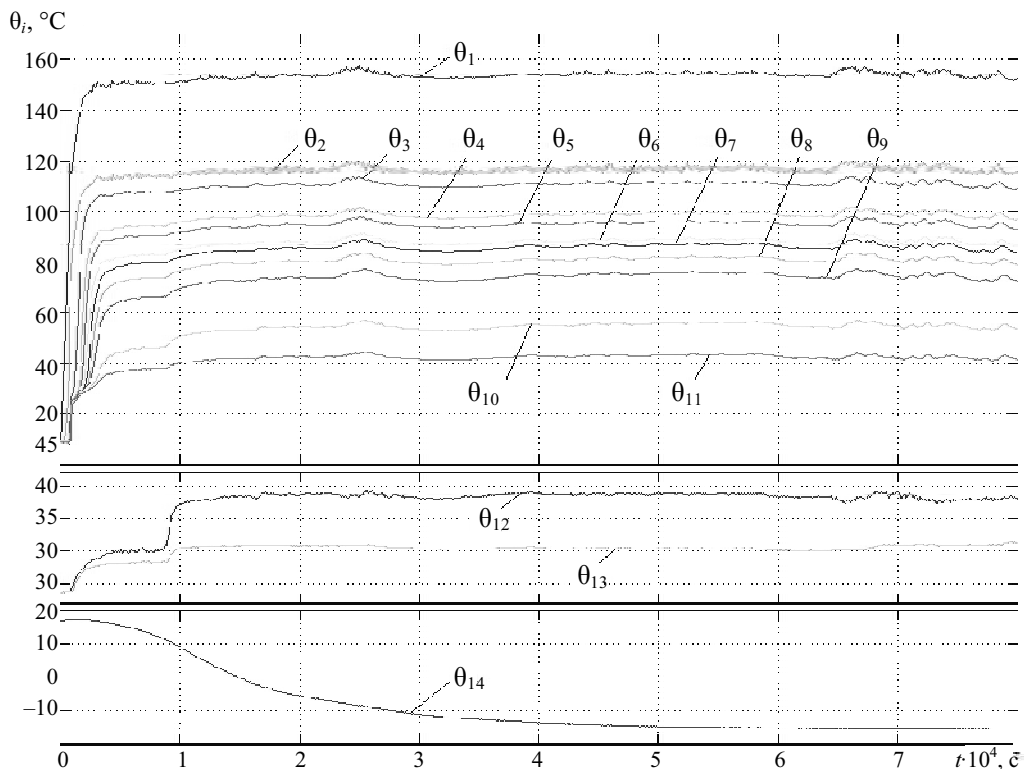


Рис. 4. Динамика изменения температур поверхности элементов АХА в контрольных точках при запуске и установившейся работе АХП на мощности 140 Вт на интервале времени  $0 \dots 8 \cdot 10^4$  с (примерно 22,2 ч)

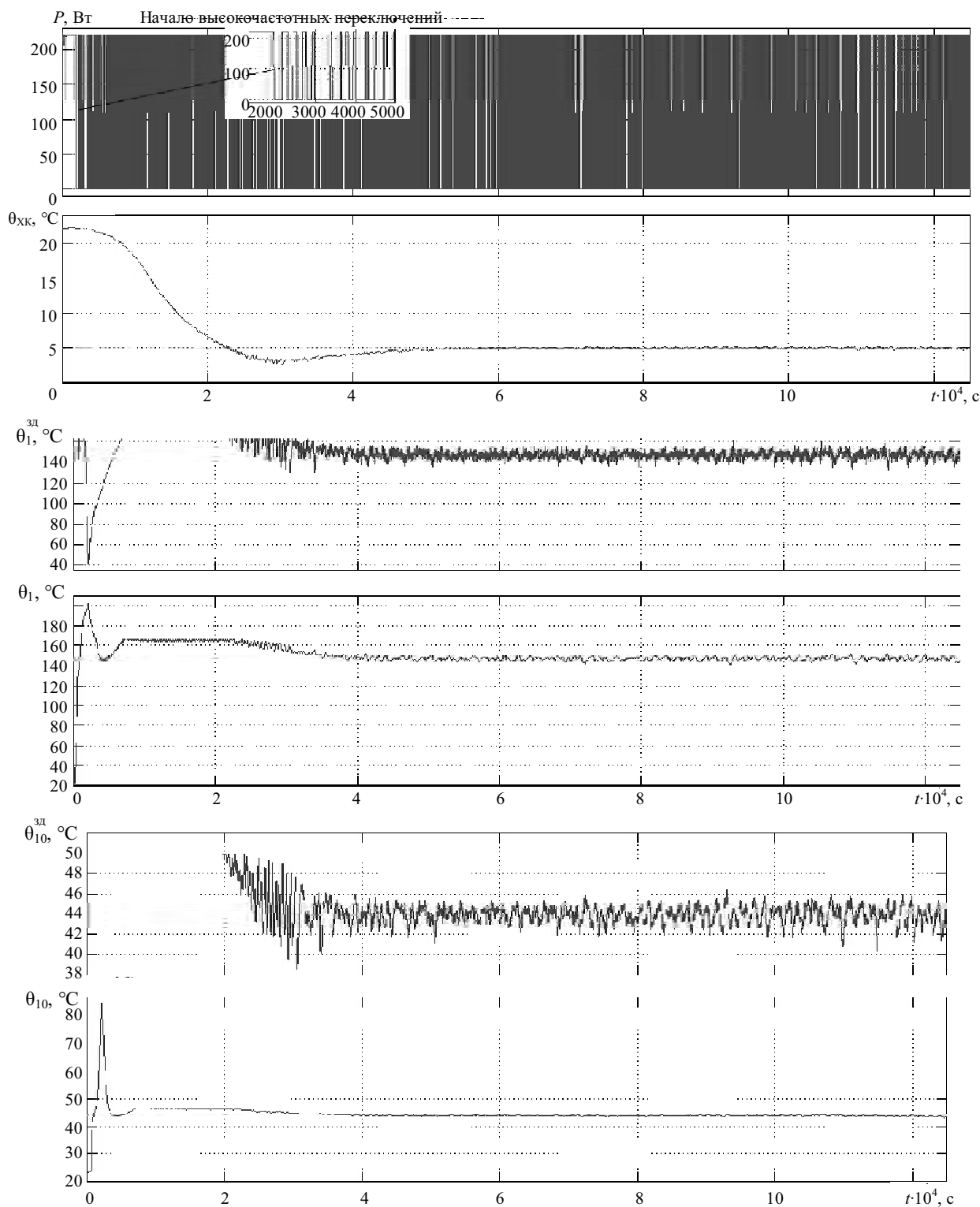
### ВЫВОДЫ

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 потери 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 мощ-

ности. В результате экспериментов выделены три основных диапазона тепловой мощности – незапуск генератора ( $0 \dots 40$  и  $180 \dots 220$  Вт), неоптимальная ( $40 \dots 70$  и  $110 \dots 180$  Вт) и квазиоптимальная ( $70 \dots 110$  Вт) работа 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 температуры в холодильной камере не превышает  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), так и их энергетические характеристики. Так, трехконтурная САУ позволяет, по сравнению с базовым двухпозиционным алгоритмом, уменьшить суточное энергопотребление на  $20 \dots 30 \%$ .



**Рис. 5.** Результаты работы при умеренной температуре воздуха окружающей среды САУ АХП с вспомогательными САУ  $\theta_1$  и САУ  $\theta_{10}$ , ПИД-регуляторами во всех контурах управления и вибрационной линеаризацией релейного элемента с охватом части объекта

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пат. 30771 Україна, МПК F 25 B 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами [Текст] / 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 B 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами [Текст] / 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 B 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами [Текст] / 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 25B 15/00. Спосіб автоматичного керування абсорбційними холодильними приладами [Текст] / 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. Ч. 1 [Текст] / А. С. Титлов // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2011. – № 5, 6. – С. 38–43 (Ч. 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. – О., 2011. – Вип. 39, т. 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. – О., 2011. – Вип. 40, т. 2. – С. 406–412.
- [8] Хобин, В. А. К вопросу измерения парожидкостного фронта в дефлегматоре абсорбционно-диффузионной холодильной машины [Текст] / В. А. Хобин, О. А. Титлова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон, 2007. – № 2(20). – С. 94–102.
- [9] 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.
- [10] 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. – О., 2007. – Вип. 31, т. 1. – С. 149–151.

–

© О. О. Титлова

Надійшла до редколегії 23.09.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко