

УДК 621.575(088.8)

*А.С. Титлов, Г.М. Редунов, Д.П. Гожелов, Н.Е. Озолін*

Одесская национальная академия пищевых технологий, Дворянская, 1/3, Одесса, 65082, Украина

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫМИ АБСОРБЦИОННЫМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ КАМЕРАМИ**

*Обсуждаются вопросы снижения энергопотребления в универсальных абсорбционных низкотемпературных камерах за счет совершенствования традиционного режима позиционного управления. Представлена математическая модель и коэффициенты переходных процессов низкотемпературной камеры с двумя абсорбционными холодильными агрегатами на торцевых стенках, работающей в жестких условиях эксплуатации при температуре окружающей среды 31 °С и в диапазоне температур охлаждения от минус 18 °С до плюс 12 °С.*

**Ключевые слова:** низкотемпературная камера; абсорбционный холодильный агрегат; режимы управления; энергосбережение.

*О.С. Тітлов, Г.М.Редунов, Д.П. Гожелов, Н.Є. Озолін*

Одеська національна академія харчових технологій, Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ УПРАВЛІННЯМ УНІВЕРСАЛЬНИМИ АБСОРБЦІЙНИМИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМИ КАМЕРАМИ**

*Обговорюються питання зниження енергоспоживання в універсальних абсорбційних низькотемпературних камерах за рахунок вдосконалення традиційного режиму позиційного управління. Представлено математичну модель і коефіцієнти перехідних процесів низькотемпературної камери з двома абсорбційними холодильними агрегатами на торцевих стінках, що працює в жорстких умовах експлуатації при температурі навколишнього середовища 31 °С і в діапазоні температур охолодження від мінус 18 °С до плюс 12 °С.*

**Ключові слова:** низькотемпературна камера; абсорбційний холодильний агрегат; режими управління; енергозбереження.

DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.39286



*This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>*

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Проблемы перехода на экологически безопасные хладагенты (поиск новых синтетических масел; низкая энергетическая эффективность новых экологически безопасных хладагентов; недостаточный профессиональный уровень разработчиков и обслуживающего персонала) заставляют разработчиков бытовой и торговой холодильной техники обращать внимание на охлаждающие приборы с абсорбционными холодильными агрегатами (АХА).

Рабочее тело АХА – водоаммиачный раствор с добавкой инертного газа – водорода, гелия либо их смеси абсолютно экологически безопасно – имеет нулевые значения озоноразрушающего потенциала и потенциала «парникового» эффекта [1].

Вместе с тем производство абсорбционных холодильных аппаратов в различных странах мира составляет 5-10 % от общего объема выпуска холодильных приборов, что связано с их повышенным (на 40-60 %) , по сравнению с аналогичными компрессионными моделями, энергопотреблением [2].

Анализ различных способов повышения энергетической эффективности холодильных аппаратов с АХА [3], показывает, что при современном уровне развития техники и технологий максимальный эффект энергосбережения может быть достигнут при оптимизации их режимов работы при помощи систем автоматического управления [4].

Основными задачами автоматического управления бытовых холодильных аппаратов с АХА является повышение их энергетической эффективности, путем поддержания оптимального режима работы. Для рассматриваемых аппаратов

критерий оптимальности должен учитывать возможность обеспечения требуемых эксплуатационных режимов при холодильном хранении и обработке продуктов.

Современный уровень развития электронной техники позволяет создавать всевозможные системы управления без каких-либо ограничений по сложности их алгоритмов. В настоящее время в бытовой холодильной технике получают развитие системы «разумного» управления, получившие название «Fuzzy Logic». Такие системы позволяют поддерживать заранее заданную температуру хранения с минимальным отклонением и, одновременно, снизить величину энергопотребления. Так, например, фирма «Electrolux» в новых моделях минибаров (RH340LD, RH341LD, RH355LD) с системами «Fuzzy Logic» добилась снижения энергопотребления, по сравнению с аналогами, до 40 %.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ

В последнее время значительный интерес у пользователей, особенно в сельской местности, вызывают низкотемпературные камеры (НТК) абсорбционного типа (на базе АХА) с высоким термическим сопротивлением ограждающих конструкций - «суперизоляция» (пенополиуретан толщиной 100 мм). В отличие от двухкамерных моделей, в которых жестко регламентировано соотношение температур в камерах, НТК потенциально имеют большие функциональные возможности, т.к. могут применяться практически во всем диапазоне температур хранения ( $t_k$ ), используемом в быту – от минус 18 °С до плюс 12 °С, т.е. стать универсальным холодильным прибором.

Реализация таких режимов в НТК с АХА не связана какими-либо принципиальными проблемами и может быть достигнута с помощью известных способов управления.

При выборе оптимального способа управления универсальной НТК с АХА необходимо учитывать следующие моменты.

Как и все холодильные аппараты универсальная НТК должна обеспечивать весь спектр температурных режимов хранения в «жестких» условиях окружающей среды ( $t_{окр} = 32$  °С). Очевидно, что наибольшие проблемы для АХА возникнут при реализации режима (не выше минус 18 °С). Теплоизоляционные покрытия камеры в этом случае должны быть спроектированы с учетом возможностей работы АХА в «жестком» режиме эксплуатации. Очевидно, что в «благоприятных» условиях эксплуатации универсальная НТК будет обладать некоторым «запасом» холодопроизводительности. Это связано со снижением теплопритоков из окружающей среды и улучшением условий реализации холодильного

цикла, причем ниже будет  $t_{окр}$  и выше температура в охлаждаемой камере ( $t_k$ ), тем больше станет величина «запаса» возможностей АХА. В этом случае имеет место тенденция к снижению коэффициента рабочего времени и увеличению длительности нерабочего периода. Это приводит к дополнительному охлаждению транспортных элементов генераторного узла и, соответственно, к увеличению времени запуска, и к дополнительным энергозатратам, причем целесообразность прогрева элементов генераторного узла в нерабочем периоде здесь неочевидна из-за его длительности.

Одним из способов оптимального управления универсальной НТК может стать традиционный режим позиционного регулирования (отключение тепловой нагрузки на генераторном узле АХА в нерабочий период).

Разработка математической модели (ММ) универсальной НТК с АХА, работающих в режиме позиционного управления, включает структурную и параметрическую идентификацию переходных процессов (разгонных кривых). Структурная идентификация состоит в выборе ММ из набора моделей  $\{S_k\}$ ,  $S_k$  – ММ заданной структуры вида:

$$W_{an_1}(p) = \frac{K_o e^{-p\tau_o}}{T_o p + 1} \quad (1)$$

$$W_{an_2}(p) = \frac{K_o e^{-p\tau_o}}{T_o^2 p^2 + 2T_o p + 1}, \quad (2)$$

где  $K_o$  – коэффициент усиления объекта, К/Вт;  $T_o$  и  $\tau_o$  – соответственно, постоянные времени и запаздывания, с;

$p = \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа;

$W(p)$  – передаточная функция типового звена ТАУ описывающего динамику объекта управления.

Экспериментальные кривые разгона обрабатывались по методу наименьших квадратов при помощи системы автоматизации инженерных расчётов «Эврика»[3].

На этапе параметрической идентификации выполнялась оценка параметров  $K_o$ ,  $T_o$  и  $\tau_o$ , характеризующих динамические и статические свойства процессов в АХА.

Точность идентификации оценивалась величиной  $\sigma$  – среднеквадратическим отклонением ошибки

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i^{\Delta} - y_i^T}{y_i^{\Delta}} \right)^2 \quad (3)$$

где  $n$  – число экспериментальных точек переходной функции (кривой разгона);  $y_i^{\Delta}$ ,  $y_i^T$  – значения экспериментальных и полученных по моделям (1) и (2) данных.

Точность идентификации экспериментальных данных передаточными функциями, приведенными в таблицах 1-4, составила 0,015...0,06 (т. е. 1,5...6 %).

**Таблиця 1** – Коэффициенты передаточных функций переходных процессов НТК с АХА  $t_k =$  минус 18 °С,  $W = 70$  Вт,  $t_{окр.} = 31$  °С

Номер датчика согласно рис.1	ММ переходного процесса	$K_o$ , К/Вт	$t$ , °С		Вкл. нагревателя		Выкл. нагревателя	
			min	max	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин
2	an 2	0,81	105	162	10	0	5	0
5	an 2	0,56	93	132	8	0	6	2
7	an 1	0,69	83	131	14		7	5
3	an 2	1,07	50	125	10	5	6	5
11	an 2	1	45	115	10	5	6	20
8	an 2	0,79	45	100	13	20	3	
10	an 2		46	60	12		12	0
9	an 1	0,17	37	49	10		8	
22	an 2	0,03	-25	-16,5	15	15	10	15
12	an 1	0,114	-26	-18	18	10	13	10
13	an 1	0,086	-23	-18	23	17	18	15
14	an 1	0,086	-21	-15	24	20	20	20
15	an 1	0,21	-7	8	30	30	22	20

**Таблиця 2** – Коэффициенты передаточных функций переходных процессов НТК с АХА  $t_k =$  минус 12 °С,  $W = 70$  Вт,  $t_{окр.} = 31$  °С

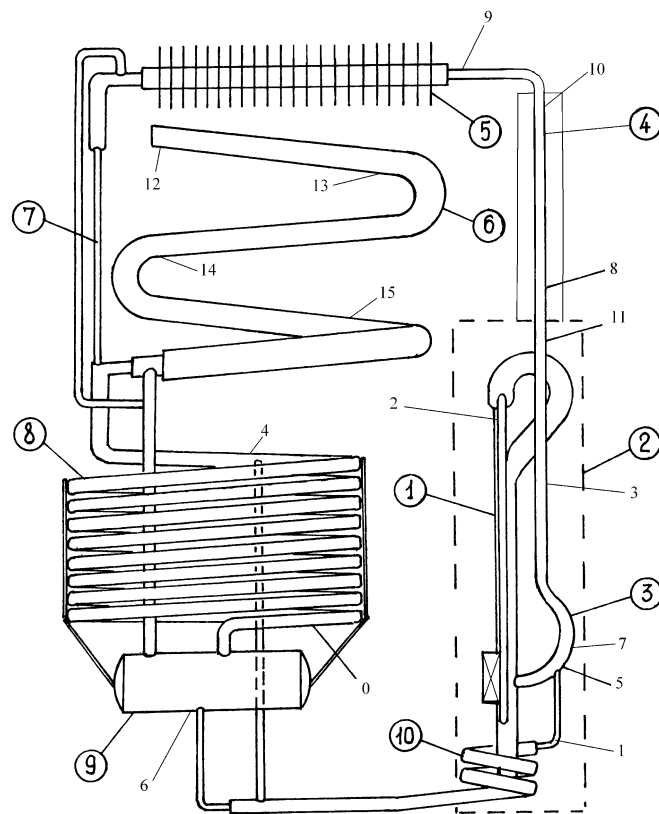
Номер датчика согласно рис.1	ММ переходного процесса	$K_o$ , К/Вт	$t$ , °С		Вкл. нагревателя		Выкл. нагревателя	
			min	max	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин
2	an 2	0,89	100	162	7		7	5
5	an 2	0,71	80	130	9		8	7
7	an 2	1	60	130	9		9	10
3	an 2	1,1	45	122	10		8	10
11	an 2	0,96	45	112	12	5	7	5
8	an 2	0,71	45	95	12	30	2	5
10	an 1	0,20	46	52	20	20	13	5
9	an 2	0,17	36	48	4	5	10	5
22	an 2	0,029	-12,5	-10,5	10	12	13	10
12	an 1	0,157	-22	-11	30	10	17	10
13	an 1	0,086	-16	-10	27	20	20	12
14	an 1	0,065	-13	-8,5	30	25	22	15
15	an 1	0,09	10	16	35	40	10	20

**Таблиця 3** – Коэффициенты передаточных функций переходных процессов НТК с АХА  $t_k =$  минус 6 °С,  $W = 70$  Вт,  $t_{окр.} = 31$  °С

Номер датчика согласно рис.1	ММ переходного процесса	$K_o$ , К/Вт	$t$ , °С		Вкл. нагревателя		Выкл. нагревателя	
			min	max	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин
2	an 2	0,86	100	160	4		8	
5	an 2	0,79	80	135	6		8	
7	an 2	0,86	70	130	6		8	
3	an 2	1,07	50	125	8		6	
11	an 2	0,93	50	115	12	10	3	
8	an 2	0,64	50	95	6	30	2	
10	an 2	0,086	47	53	12	10	10	
9	an 2	0,25	32	50	4		12	
22	an 2	0,03	-7	-5	6	20	6	15
12	an 1	0,17	-17	-5	16	5	16	5
13	an 2	0,071	-10	-5	8	15	12	5
14	an 2	0,043	-7	-4	10	16	12	5
15	an 2	0,03	16,5	18,5	4		7	

**Таблиця 4** – Коэффициенты передаточных функций переходных процессов НТК с АХА  $t_k = \text{плюс}$   $12^\circ\text{C}$ ,  $W = 70 \text{ Вт}$ ,  $t_{\text{окр.}} = 31^\circ\text{C}$

Номер датчика согласно рис.1	ММ переходного процесса	$K_o$ , К/Вт	$t$ , $^\circ\text{C}$		Вкл. нагревателя		Выкл. нагревателя	
			min	max	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин	$T_o$ , мин	$\tau_o$ , мин
2	an 2	1,43	60	160	10		20	
5	an 1	1,14	50	130	17		16	
7	an 2	1,14	50	130	10		14	
3	an 2	1	50	120	4	20	2	2
11	an 2	0,79	50	105	6		2	
8	an 2	0,25	35	52,5	5		10	
10	an 2	0,29	30	50	3	15	10	
9	an 2	0,32	27,5	50	4	12	14	
22	an 2	0,0286	11	13	8	20	16	15
12	an 1	0,214	-2,5	12,5	8	15	12	
13	an 2	0,071	8	13	9	15	18	5
14	an 2	0,057	10	14	15	15	20	10
15	an 2	0,057	21	25	17	15	20	10



**Рисунок 1** – Схема установки термопар на элементах АХА универсальной НТК

1 – термосифон; 2 – теплоизоляционный кожух генераторного узла; 3 – ректификатор; 4 – дефлегматор; 5 – конденсатор; 6 – испаритель; 7 – канал подачи жидкого аммиака на испаритель; 8 – абсорбер; 9 – бачок абсорбера; 10 – жидкостный теплообменник.

### III. ВЫВОДЫ

1. Задача минимизации энергозатрат при эксплуатации универсальной НТК с АХА решается с помощью электронных систем управления (ЭСУ), адекватно и эффективно реагирующих на изменение эксплуатационных

параметров (температуры окружающей среды и поступающих продуктов, степени загрузки холодильной камеры, условий охлаждения теплорассеивающих элементов).

2. Расчетное снижение энергозатрат при использовании ЭСУ в НТК с АХА составит от 12

до 36 % (в залежності від режиму низкотемпературного зберігання та умов експлуатації).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Титлов А. С. Сравнение характеристик абсорбционной и компрессионной бытовой холодильной техники / А. С. Титлов // Холодильная техника и технология. – 1997. – № 57. – С. 39-41.
2. Титлов А. С. Современный уровень разработок и производства бытовых абсорбционных холодильных приборов. / А.С. Титлов // Холодильный бизнес. – 2007. – № 8. – С. 12-17; № 9. – С. 28-30; № 10. – С. 47-49; № 11. – С. 46-47.
3. Захаров Н. Д. Проблемы энергосбережения в бытовой абсорбционной холодильной технике / Н.Д. Захаров, Д.С. Тюхай, А.С. Титлов, О.Б.

Васильев, В.Н. Халайджи // Холодильная техника и технология. – 1999. – № 62. – С. 108-119.

4. Титлова О. А. Технологический процесс производства искусственного холода в абсорбционных холодильных приборах и задачи повышения его энергетической эффективности средствами автоматического управления / О. А. Титлова // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Том 2. – Вип. 40 – С. 406-412.
5. Декларативний патент № 59674А МПК<sup>7</sup> F 25 В 15/10. Морозильник / О.С. Титлов, О.Б. Васильев, М.Д. Захаров, С.М. Кудашев (Україна). – №2002119067; заявл. 14.11.02; опубл. 15.09.03, Бюл. № 9.
6. Дьяконов В. П. Справочник по применению системы EUREKA. – М.: Физмат, 1993. – 96 с.

Отримана в редакції 31.03.2015, прийнята до друку 03.07.2015

**A.S. Titlov, G.M. Redunov, D.P. Gozhelov, N.E. Ozolin**

Odessa National Academy of Food Technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082, Ukraine

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THE ENERGY EFFICIENT CONTROL MODES BY UNIVERSAL ABSORPTION COLD CHAMBER

*The issues of reducing energy consumption in universal low-temperature absorption cells by improving the traditional mode of position control are considered. The mathematical model and the coefficients of transient low-temperature chamber with two absorption cooling units on the end walls, running under severe operating conditions at ambient temperature 31° C and cooling in the temperature range from minus 18 °C to plus 12 °C are given.*

**Keywords:** low-temperature chamber; absorption cooling units; control modes; energy saving.

## REFERENCES

1. **Titlov, A. S.** 1997. Sravneniye kharakteristik absorbtionnoy i kompressionnoy bytovoy kholodil'noy tekhniki. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya* [Refrigeration engineering and technology], No.57, 39-41 .
2. **Titlov, A. S.** 2007. Sovremennyy uroven' razrabotok i proizvodstva bytovykh absorbtionnykh kholodil'nykh priborov. *Kholodil'nyi biznes*, No.8, 12-17; No.9, 28-30; No.10, 47-49; No.11, 46-47.
3. **Zakharov, N. D., Tyukhay, D. S., Titlov, A. S., Vasyliv, O. B., Khalaydzhi, V. N.** 1999. Problemy energosberezheniya v bytovoy absorbtionnoy kholodil'noy tekhnike // *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya* [Refrigeration engineering and

*technology*], No.62, 108-119.

4. **Titlova, O. A.** 2011. Tekhnologicheskiy protsess proizvodstva iskusstvennogo kholoda v absorbtionnykh kholodil'nykh priborakh i zadachi povysheniya yego energeticheskoy effektivnosti sredstvami avtomaticheskogo upravleniya. *Naukovі pratsі ONAKHT* [Collection "Research works"]. 2 (40), 406-412. Deklaratsiyniy patent № 59674А МПК<sup>7</sup> F 25 В 15/10. Morozil'nik / O.S. Titlov, O.B. Vasiliv, M.D. Zakharov, C.M. Kudashev (Ukraine). – №2002119067; zayavl. 14.11.02; opubl. 15.09.03, Byul. № 9.
6. **D'yakonov, V. P.** 1993. Spravochnik po primeneniyu sistemy EUREKA. М.: Fizmat, 96 p.

Received 31 March 2015

Approved 03 July 2015

Available in Internet 30.08.2015