

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСТЕТІ  
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОНАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА  
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION



IV ХАЛЫҚАРАЛЫҚ  
ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ҚАЗАҚСТАН-ТОНАЗЫТУ 2014»

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2014»

IV INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE  
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2014»

Конференция баяндамаларының жинағы  
27 ақпан, 2014 ж.

Сборник докладов конференции  
27 февраля 2014 г.

Proceedings of the Conference  
February 27, 2014

Алматы, 2014

УДК 621.56/59  
ББК 31.397  
К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией доктора химических наук,  
академика **Кулажанова К.С.**

**Редакционная коллегия:**

Цой А.П., Кизатова М.Ж., Хмельнюк М.Г., Эглит А.Я.,  
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ. секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2014: Сборник докладов международной научно-  
технической конференции (27 февраля 2014 г.) – Алматы: АТУ, 2014. – 139с.

ISBN 978-601-263-274-3

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ученых и специалистов Казахстана, Германии, России, США, Японии и Украины по направлениям: теплохладоснабжения, кондиционирования и экологии.

Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также гостиничном бизнесе и спортивных комплексах.

УДК 621.56/59  
ББК 31.397

ISBN 978-601-263-274-3

©АТУ, 2014

## ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОДОВООВОЩЕХРАНИЛИЩ

Жихарева Н.В., к.т.н., Хмельнюк М.Г., д.т.н., проф.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г.Одесса, Украина

E-mail: Zhnata@mail.ru; hmel\_m@ukr.net

На эффективность охлаждающей системы плодоовощехранилищ влияют параметры хранения плодоовощной продукции с учетом влияния рас хода воздуха на усушку плодоовощной продукции, а оптимальные режимы работы охлаждающей системы осуществляются на основе законов динамической оптимизации процессов теплообмена в ограждающих конструкциях, в штабеле продукции и в воздухоохладителе, с определением эксергетической показателей и эксергетической потерь, которые обеспечивают минимум приведенных затрат с учетом влияния цены электроэнергии.

Объектом исследования являлась камера для хранения плодоовощной продукции.

Предметом исследования являлись показатели энергетической эффективности охлаждающей системы плодоовощехранилищ, с учетом влияния стоимостных тарифов электроэнергии процессы теплообмена и формирования температурно-влажностных полей в штабеля с плодоовощной продукцией при активной вентиляции.

Методами исследования являлись: метод термoeкономического анализа, математическое моделирование теплообмена, численные методы и методы оптимизации, компьютерные эксперименты.

При этом учитывалось, что энергия в холодильной установке может передаваться как в форме теплоты, так и в форме механической работы. [ 1,2].

Термoeкономический подход оптимизации.

Математическая модель оптимизации охлаждающей системы плодоовощехранилищ была построена на основе термoeкономического подхода с учетом энергетических показателей, которая решается в комплексе: определение оптимальных параметров хранения плодоовощной продукции; определение оптимального воздухоохладителя; оптимизация режимов работы холодильной установки.

При этом нужно также учитывать, что энергия в холодильной установке может передаваться как в форме теплоты, так и в форме механической работы. Проведено исследование оптимальных режимов комплексной оптимизации с применением термoeкономического метода на примере одноступенчатой типовой холодильной установки для плодоовощехранилища. (рис.1) [ 3,4].

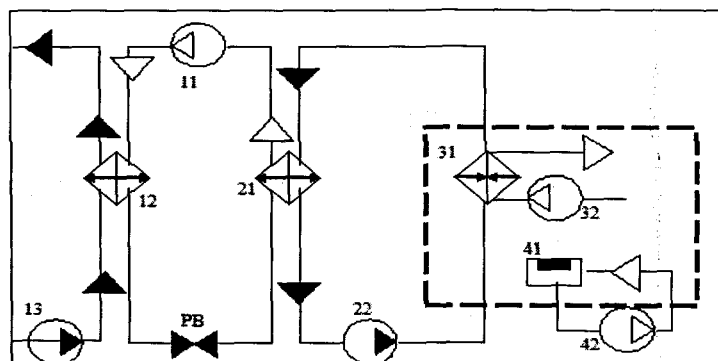


Рисунок 1. Схема одноступенчатой холодильной установки.

Термoeкономическая модель холодильной установки, с учётом сделанных допущений, может быть изображена в виде последовательно соединённых трёх зон (рис.2). От внешнего источника к системе подводится энергия (эксергия) с ценой  $C_{ex}$ , (грн./кВт.час) для привода электродвигателя компрессора  $e_{11}$ , электродвигателя насоса охлаждающей среды  $e_{13}$ , электродвигателя насоса промежуточного холодоносителя  $e_{22}$ , электродвигателя вентилятора воздухоохладителя  $e_{32}$ , электродвигателя насоса увлажнителя  $e_{42}$ . От внешнего источника подводится также охлаждающая среда в количестве  $V_{12}$ , м<sup>3</sup>/час, ценой  $C_w$ , грн/м<sup>3</sup>. Внутри системы передаётся эксергия из зоны 1 в зону 2 -  $e_1$ , из зоны 2 в зону 3 -  $e_3$ . В

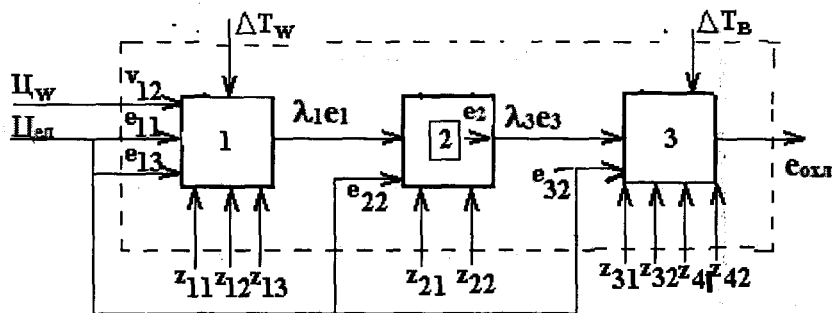


Рисунок 2 - Термоэкономическая модель одноступенчатой холодильной установки.

Критерием оптимизации выбраны приведенные затраты (ПВ), которые для рассмотренного случая могут быть описаны выражением

$$\begin{aligned}
 \text{ПВ} = [ & (\text{Ц}_{эл1} \cdot \tau_1 + \text{Ц}_{эл2} \cdot \tau_2 + \text{Ц}_{эл3} \cdot \tau_3)(e_{11} + e_{13} + e_{32} + e_{22} + e_{42}) + \text{Ц}_w \cdot V_{сва} + (z_{11} + z_{12} + z_{13} + z_{21} + z_{22} + z_{31} + z_{32} + \\
 & + z_{41} + z_{42}) \cdot \tau_p
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\text{Ц}_{эi}$ , грн/кВт·ч - цены на электроэнергию по различным тарифам: ночной, пиковый и полупиковый с соответствующим временем действия;  $\tau_i$ , час  $V_{сва} = 0,1 \cdot V_{12}$  - объемный расход свежей воды м<sup>3</sup> / час;  $e_{11}$  - эксергия электродвигателя компрессора 11;  $e_{13}$  - эксергия электродвигателя водяного насоса 13;  $e_{22}$  - эксергия электродвигателя вентилятора 22;  $e_{32}$  - эксергия электродвигателя вентилятора воздухоохладителя;  $e_{42}$  - эксергия электродвигателя насоса увлажнителя;  $z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{31}, z_{32}, z_{41}, z_{42}$  - нормативные отчисления амортизационных отчислений и затрат на текущий ремонт отдельных элементов компрессора 11, конденсатора 12, водяного насоса 13, воздухоохладителя 31, вентилятора 32, увлажнителя 41, насоса с электродвигателем для пленочного увлажнителя 42 соответственно;  $\tau_p$  - число рабочих часов в году.

При полученном значении  $Q_{охл}$

$$\text{ПВ} = \text{ПВ}(\Delta T_w, \Delta T_b). \quad (2)$$

С ограничениями:  $\Theta_K = f(\Delta T_w)$  та  $\Theta_0 = f(\Delta T_b)$ ,

где  $\Theta_K, \Theta_0$  - температурные напоры в конденсаторе и воздухоохладителе, являются зависимыми переменными от  $\Delta T_w$  та  $\Delta T_b$ ,  $\Delta T_w$  - перепад температур воды в конденсаторе 12;  $\Delta T_b$  - перепад температур воздуха, проходящего через охладитель 31 [5].

Для решения этой задачи разработана математическая модель данной установки, построенная с учётом требований термоэкономики и адекватная реальной технологической схеме холодильной установки с учетом трехзонного тарифа. Рассматривалась оптимизация холодильной установки модуля плодоовощехранилища ёмкостью 100 т г. Одесса.

Решая систему уравнений (3,4) методом последовательных приближений Нелдера – Мидабыли, получены  $\Theta_K, \Delta T_w, \Theta_0, \Delta T_b$ , соответствующих оптимальному режиму работы холодильной установки, который обеспечивает минимум приведенных затрат с учетом различных тарифов электроэнергии.

Оптимизация воздухоохладителей плодоовощехранилищ.

При определении оптимальных режимов холодильной установки учитывался оптимальный воздухоохладитель. Для оптимизации воздухоохладителей был выбран модульный принцип. Принятые диничные модули, вмещающие пучок биметаллических оребренных труб общей длиной 280м и вентилятор В-06-300-6, 3А [6,7].

Алгоритм позволяет проводить оптимизацию по следующи мкритериям, приведенных к общей тепловой загрузки  $Q_0$ : конструктивных,  $Q_0/F$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_0/N$ , Вт/Вт;  $Q_0/M$ , Вт/кг и экономическим: критерий потребителя 1-го типа с учетом влияния стоимости электроэнергии.

$$\frac{(\lambda_m + N \tau_i \cdot C_{эл})}{Q_0}, \text{ грн/Вт} \quad (3)$$

где:  $C_{эл}$  - цены на электроэнергию по различным тарифам: ночной, пиковый и полупиковый с соответствующим временем действия  $\tau_i$ , час;  $\lambda_m$  - цена воздухоохладителя; критерий потребителя 2-го типа:

$$(A\lambda_m + N \tau_i C_{эл} + C_u), \text{ грн} \quad (4)$$

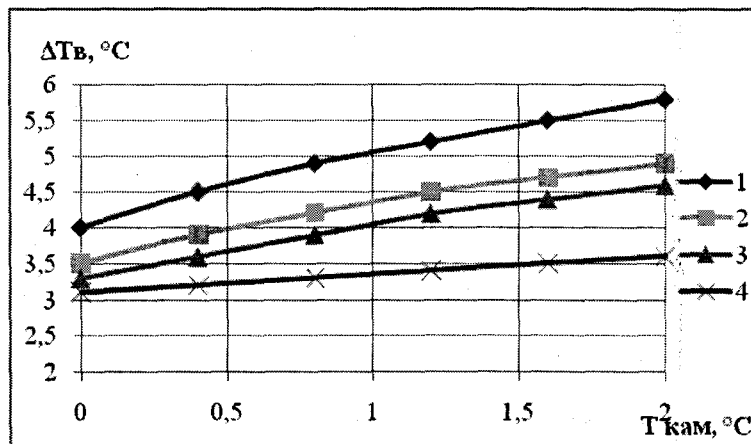
где:  $A$  - доля амортизации за цикл хранения;  $C_u$  - стоимость продукции, потерянной вследствие усушки, грн;. Этот критерий учитывает еще и вид продукции, хранящейся в камере и определяется по результатам наших исследований, учитывающей, что для каждого вида плодов и ягод существует оптимальный расход воздуха через штабель продукции, соответствующий минимальным потерям от усушки.

При численном эксперименте была использована авторская методика, где варьировался следующий набор переменных параметров: шаг оребрения, шаг труб, количество рядов труб с большим шагом ребер; количество рядов труб с меньшим шагом ребер; общее количество рядов труб в направлении движения воздуха; количество рядов труб по фронту. [7].

По результатам оптимизационных расчетов для системы охлаждения камеры разработаны и изготовлены Научно-исследовательским институтом холодильной техники и технологии «Агрохолод» г. Одессы. Воздухоохладители площадью поверхности  $75\text{ м}^2$ , с осевым вентилятором В-06-300-6,3А. Воздушные потоки, поступающие из отверстий воздухоохладителей, подчиняются закономерностям сжатой струи в ограниченном пространстве.

Оптимизация охлаждающей системы воздухоохладителей достигается установлением и поддержанием необходимых перепадов температур между средами в теплообменных аппаратах, учитывая полученные оптимальные параметры хранения плодоовощной продукции с учетом влияния расхода воздуха на усушку плодоовощной продукции и воздухоохладитель, оптимизированный по конструктивным и экономическим критериям с учетом влияния цен на электроэнергию.

Существенное влияние на величину оптимальных значений  $\Theta_k$ ,  $\Theta_0$ ,  $\Delta T_w$ ,  $\Delta T$  оказывает цена электроэнергии. Учитывая ее важность и особенность для Украины, нами проведена оценка влияния цены электроэнергии на значение оптимальных параметров ( $\Theta_k$ ,  $\Theta_0$ ,  $\Delta T_w$ ,  $\Delta T_b$ ). На рис.3, 4 показаны зависимости оптимальных температурных напоров и изменений температур охлаждающей и охлаждаемых сред для рассмотренной одноступенчатой холодильной установки при постоянном значении расчетной температуры окружающей среды в зависимости от цены электроэнергии. Цена электроэнергии принималась по трехзонному тарифу : ночной -  $C_{эл1}=0,2839$  грн/кВт.ч (с 23.00 до 6.00); полупиковый -  $C_{эл2}=0,8273$  грн/кВт.ч (с 6.00 до 8.00; с 10.00 до 17.00; с 21.00 до 23.00); пиковый  $C_{эл3}=1,36$  грн/кВт.ч (с 8:00 до 11:00; с 20:00 до 22:00) и общему тарифу-  $C_{эл}=(0,2839 \cdot \tau_1 + 0,8273 \cdot \tau_2 + 1,36 \cdot \tau_3) / \tau_{сут}$  грн/кВт.ч.



Так при температуре в камере  $T_{\text{кам}} = 2^{\circ}\text{C}$  увеличение цены электроэнергии в 5 раз (кривые 1,4) привело к снижению температурного напора в воздухоохладителе на  $3^{\circ}\text{C}$ , а при  $T_{\text{кам}} = 0^{\circ}\text{C}$  – на  $0,8^{\circ}\text{C}$ . При этом, для всех рассмотренных режимов уменьшение цены электроэнергии вызывало рост значений оптимальных параметров и значительное увеличение ее годового потребления.

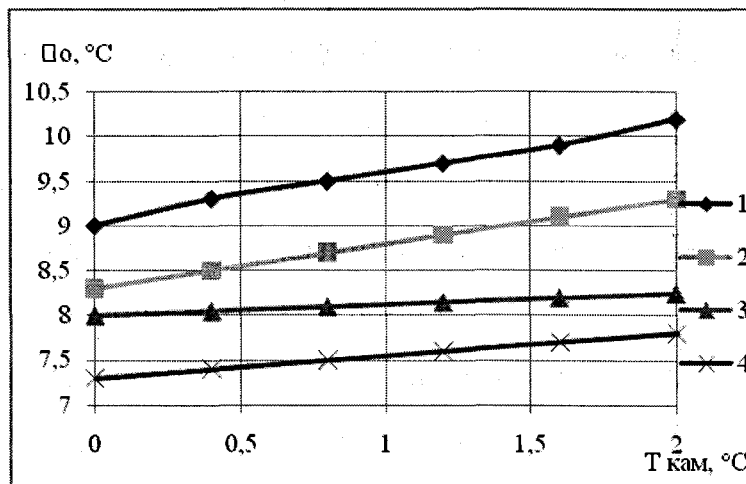


Рисунок 4 - Оптимальные значения перепадов температурных напоров в воздухоохладителе  
 $\Theta_0$  1 - Цэл<sub>1</sub>-0,2839 грн/кВт·ч; 2 – Цэл<sub>2</sub>-0,8273грн/кВт·ч; 3 - Цэл=(0,2839\* $\tau_1$  + 0,8273\* $\tau_2$  + 1,36\* $\tau_3$ )/  $\tau_{\text{сут}}$  грн/кВт·ч 4 – Цэл<sub>3</sub>=1,36 грн/кВт·ч; 4 -  $\Delta T_b$

Приведенные на рисунках результаты показывают, что с уменьшением температуры охлаждаемого объекта степень влияния цены электроэнергии на значение оптимальных параметров.

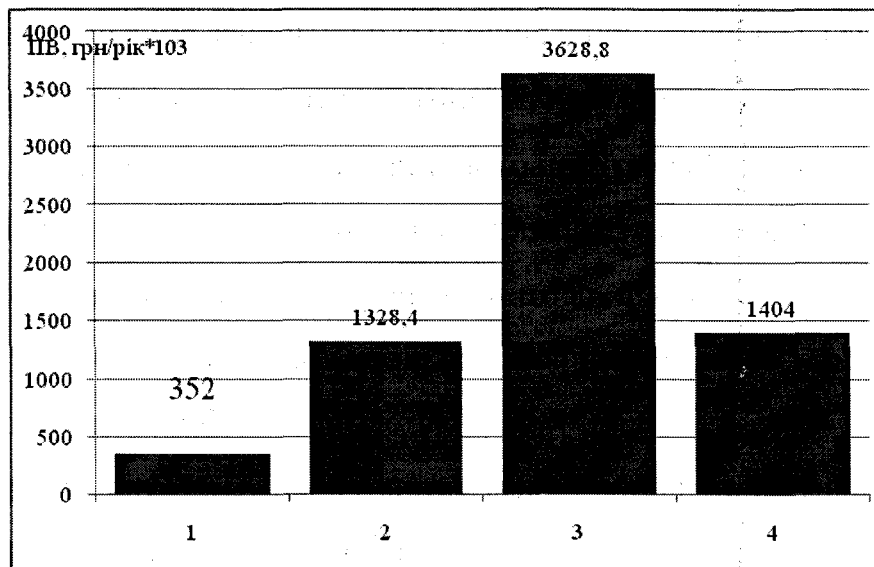


Рисунок 5 - Изменение годовых приведенных затрат в зависимости от цены электроэнергии  
 1 - Цэл<sub>1</sub>-0,2839 грн/кВт·ч; 2 – Цэл<sub>2</sub>-0,8273грн/кВт·ч; 3 - Цэл=(0,2839\* $\tau_1$  + 0,8273\* $\tau_2$  + 1,36\* $\tau_3$ )/  $\tau_{\text{сут}}$  грн/кВт·ч 4 – Цэл<sub>3</sub>=1,36 грн/кВт·ч

На рис.5 приведены показатели изменения годового расхода электроэнергии и годовых приведенных затрат в зависимости от цены электроэнергии. Оплата по трехзонному тарифу меньше в 1,2 раза.

Научной группой НИИХТТ «Агрохолод» проведены промышленные испытания режимов работы холодильной установки холодильника плодовоовощехранилища емкостью 100 тонн г.Одессы. В задачу исследований входило определение температурных режимов эксплуатации холодильной установки, обеспечивающих экономию электроэнергии. Получены конкретные рекомендации для проектирования и изготовлены аппараты охлаждающей системы плодовоовощехранилища.

Термoeкономический подход комплексной оптимизации охлаждающей системы плодoовощехранилищ с учетом влияния цен на электроэнергию содержит принципиально новые тенденции выбора основного оборудования холодильной установки при определении оптимальных режимов ее эксплуатации, повышающие эффективность системы охлаждения плодoовощехранилищ. Рассмотренные методы термoeкономического подхода оптимизации возможно применить при оптимизации как систем охлаждения, так и систем кондиционирования воздуха.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оносовский В.В. Моделирование и оптимизация холодильных установок.–Л.:Издательство Ленинградского университета,1990.– 208с.
2. Тсатсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации энергосберегающей системы.–Одесса:Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.
3. Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г. Оптимізація режиму роботи холодильної установки плодoовощехранилищ. –Холодильна техніка і технологія. – Одесса:ОДАХ. – 2012. – №5(139). - с.16-20.
4. Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г.Термодинамічний аналіз ефективності судових холодильних установок. Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування»: Миколаїв. НУК, - 2012. №2. Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/ua/issue?issueId=17919>
5. Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г. Повышение эффективности системы охлаждения плодoовощехранилищ. – Вестник международной академии холода, 2013. – Вып 4 – С. 16 – 20.
6. Чумак И.Г. Холодильные установки. Проектирование. – Учеб. Пособие.- 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Друк, 2007. – 480 с.
7. Красномовец П.Г., Жихарева Н.В. Результати оптимізації системи охолодження плодoовощехранилищ.– Холодильна техніка і технологія . – 2002. – №3(77) . – С.57-61.
8. Пат. 54564 Україна, 7 F28B1/02 Спосіб роботи випарного конденсатора і випарний конденсатор для його здійснення. /Бакум Е.А., Красномовец П.Г., Гоголь М.І. Жихарева Н.В.; заявитель Науково-дослідний та конструкторсько технологічний інститут холодильної техніки і технології «Агрохолод» заяв. 12.06/2000 Опубл. 17.03.2003 Бюл. № 3.