

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСА ОТДЕЛИТЕЛЬ ЖИДКОГО ХЛАДАГЕНТА–НАСОС–МОРОЗИЛЬНЫЙ АППАРАТ СУДОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

С. Н. Ефремов, канд. техн. наук, доц.;  
Е. В. Хромов, канд. техн. наук, доц.;  
А. В. Королев, ст. преп.

*Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь*

**Аннотация.** Рассмотрена модель комплекса отделитель жидкого хладагента–насос–морозильный аппарат, является важной составляющей системы замораживания продукции. На основании физической модели комплекса рассмотрены параметры, влияющие на его работу.

**Ключевые слова:** комплекс, эксергия, физическая модель, термоэкономическая модель.

**Анотація.** Розглянуто модель комплексу віддільник рідкого хладагенту–насос–морозильний апарат, яка є важливою складовою системи заморожування продукції. На основі фізичної моделі комплексу розглянуто параметри, що впливають на його роботу.

**Ключові слова:** комплекс, ексергія, фізична модель, термoeкономічна модель.

**Abstract.** The model of the separator of the liquid coolant–pump–freezing unit complex which is an important part of the production freezing system has been considered. The parameters which influence its operation are considered on the basis of the physical model of the complex.

**Keywords:** complex, exergy, physical model, thermal economic model.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Холодильные установки производственного назначения на рыбодобывающих судах типа РКТС, БАТ и рыбообрабатывающих базах являются особенно сложными в эксплуатации. Как показали исследования, мощность электродвигателей производственных холодильных установок судов типа БАТ распределяется следующим образом: предварительное охлаждение рыбы – 120 кВт, замораживание – 410 кВт и хранение – 117 кВт. Основная энергетическая нагрузка приходится на работу комплекса, включающего в себя насос и морозильные аппараты. Если учесть, что морозильный аппарат (например, LBH-31,5) работает круглосуточно и с периодом времени до 20–25 сут, то очевидно, что эксплуатационные затраты превышают в данном случае остальные.

Проблема эффективности эксплуатации морозильного аппарата может быть решена как оптимизированная задача с использованием оператора Лагранжа. Для этого рассматривается физическая и термоэкономическая модели комплекса [2, 4].

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

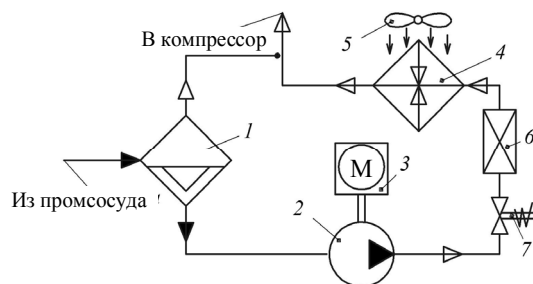
Исследования в области термоэкономики успешно развиваются в США. Известная монография [3] Дж. Татсарониса переведена на русский язык и издана в Украине. Из отечественных ученых исследованиями в данной области занимаются Т.В. Морозюк и В.Р. Никульшин.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** – рассмотреть модель комплекса отделитель жидкого хладагента–насос–морозильный аппарат и на ее основе построить термоэкономическую модель для режима замораживания рыбной продукции.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Комплекс отделитель жидкого хладагента–насос–морозильный аппарат (ОЖ–Н–МА) является частью судовой производственной холодильной установки двухступенчатого сжатия. Принципиальная схема комплекса показана на рис. 1.

Рассматривая энергетическую взаимосвязь элементов комплекса, необходимо проанализировать взаимодополняющие аналитические методы на основании технологического процесса функционирования данного комплекса. На рис. 2 представлен эквивалентный граф взаимодействия элементов комплекса по технологической схеме.



**Рис. 1.** Схема комплекса ОЖ–Н–МА насосно-циркуляционной системы подачи хладагента: 1 – отделитель жидкости; 2 – насос хладагента; 3 – электродвигатель насоса; 4 – испаритель морозильного аппарата; 5 – вентилятор морозильного аппарата; 6 – дроссельный клапан; 7 – электромагнитный клапан

Взаимодействие осуществляется при помощи энергетических связей. На рис. 2  $y_1$  – поступление энергии от промежуточного сосуда к отделителю жидкости;  $y_2$  и  $x_1$  – подведенная энергия к насосу хладагента;  $y_3$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – энергия, подведенная к морозильному аппарату;  $y_4$  – энергия, отведенная с паром хладагента из отделителя жидкости;  $y_5$  – энергия, отведенная от морозильного аппарата. Эти связи в совокупности следует рассматривать как подвод и отвод эксергии, учитывающей электрические и температурные характеристики комплекса.

Физическая модель комплекса с учетом установленных закономерностей взаимного влияния элементов в процессе совместного функционирования, а также степени влияния переменных эксплуатационных управляющих параметров каждого элемента на работу комплекса имеет вид

$$E_{OЖ} = E_{OЖ}(G_a, T_a, T_{o.c}); \quad E_H = E_H(G_a, T_a, \omega_H);$$

$$E_{MA} = E_{MA}(G_a, G_b, T_o, T_k, T_{o.c}, T_p, \omega_b, E_b, E_{mex}),$$

где  $E_{OЖ}$ ,  $E_H$ ,  $E_{MA}$ ,  $E_b$ ,  $E_{mex}$  – эксергия, подведенная к комплексу ОЖ–Н–МА, потоком жидкого хладагента

та к отделителю жидкости насосом, морозильным аппаратом, вентилятором, механизмом перемещения блоков мороженной продукции;  $G_a$  – количество циркулируемого хладагента в комплексе;  $T_a$  – температура хладагента;  $T_{o.c}$  – температура окружающей среды;  $\omega_H$ ,  $\omega_b$  – частота вращения насоса и вентилятора;  $G_b$  – производительность вентилятора;  $T_o$ ,  $T_k$ ,  $T_p$  – температуры кипения, конденсации хладагента и блока продукции.

На основе физической модели, представленной в эксергетическом виде, для эксплуатационных режимов работы комплекса можно проводить расчеты потоков эксергии, энергетических потерь и энергетического КПД.

Установленные функциональные зависимости модели могут быть положены в основу разработки термоэкономической модели, которая учитывает закономерности взаимного влияния элементов комплекса в процессе совместного функционирования, степень влияния эксплуатационных и управляющих переменных каждого элемента на работу комплекса в энергоэффективных режимах. Термоэкономическая модель комплекса ОЖ–Н–МА представлена на рис. 3.

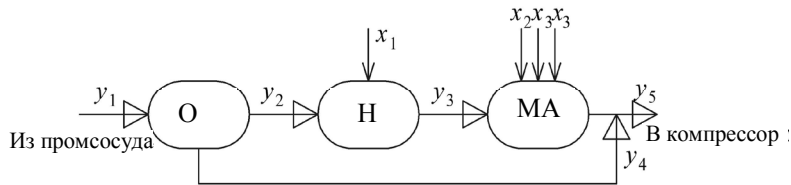


Рис. 2. Эквивалентный граф схемы комплекса ОЖ–Н–МА

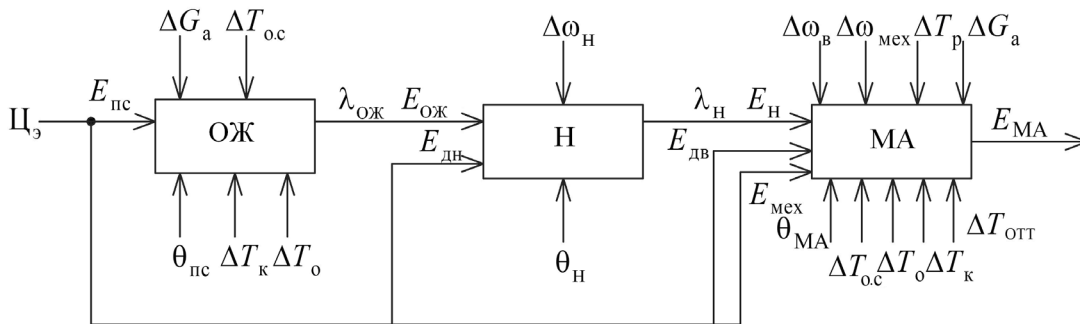


Рис. 3. Термоэкономическая модель комплекса ОЖ–Н–МА в режиме замораживания рыбной продукции

На рис. 3  $\Psi_3$  – цена подведенной электроэнергии;  $E_{пс}$ ,  $E_{OЖ}$ ,  $E_H$ ,  $E_{MA}$ ,  $E_{дн}$ ,  $E_{дв}$ ,  $E_{mex}$  – соответственно эксергия хладагента, подведенная к отделителю жидкости после промежуточного сосуда, отделителя жидкости, морозильного аппарата, от насоса хладагента и эксергия, подведенная к насосу и вентилятору;  $\Delta G_a$  – вектор изменения расхода хладагента;  $\Delta T_{o.c}$ ,  $\Delta T_o$ ,  $\Delta T_k$ ,  $\Delta T_p$ ,  $\Delta T_{отт}$  – соответственно вектор изменения температуры окружающей среды, кипения, конденсации хладагента, замораживания рыбной продукции и температура оттайки;  $\theta_{пс}$ ,  $\theta_{на}$ ,  $\theta_{MA}$  – температурные напоры

промысосуда, насоса и морозильного аппарата;  $\Delta \omega_H$ ,  $\omega_b$  – изменение векторов управляющих переменных насоса и вентилятора;  $\lambda_{OЖ}$ ,  $\lambda_H$  – неопределенные множители Лагранжа.

Эффективность эксплуатации комплекса ОЖ–Н–МА оценивается решением оптимизированной задачи вида «минимизация приведенных затрат + ограничения». Эксергетическая стоимость комплекса дополняется совокупностью балансов стоимости каждого компонента ОЖ–Н–МА. Баланс стоимости компонентов показывает, что сумма стоимостей, связанных

с прохождением эксергии, равна сумме стоимостей всех входов эксергии плюс соответствующая стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание.

В рассматриваемой работе наиболее весомая часть балансовой стоимости приходится на морозильный аппарат, она зависит от конструкции аппарата и температурного перепада  $\Delta T$  в различных районах промысла. Оптимальный перепад  $\Delta T$  для воздухоохладителя МА конструктивно находится в пределах 5...12 °С, что определяет его производительность. За оптимальный период температуры  $\Delta T$  принят тот, при котором сумма приведенных затрат в течении года будет минимальная:

$$Z = C + EK,$$

где  $C$  – годовая себестоимость продукции, грн/год;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K$  – капитальные затраты, грн.

Капитальные затраты составляют стоимость и монтаж МА в зависимости от характеристик аппарата, определенных перепадов температуры.

Район промысла определяет стоимость топлива, расходуемого на работу МА, и стоимость его доставки. В исследованиях [1] рассмотрена зависимость стоимости топлива от перепада температуры для судна типа ВМРТ в трех районах промысла: в северо-западной, юго-восточной и центрально-восточной Атлантике.

Баланс стоимости отделителя жидкости и насоса определяется в соответствии с принятой методикой.

Целевая функция – переменная часть приведенных затрат

$$\Pi = [\Pi_3 (E_{nc} + E_{OЖ} + E_H + E_{МА} + E_B + E_{мех})] \cdot \tau_{МА},$$

где  $\tau_{МА}$  – время работы морозильного аппарата.

Взаимосвязь минимизированных переменных в процессе оптимизации приведет к необходимости нахождения условного экстремума, а задача оптимизации режимов работы комплекса решается путем приведения ее к задаче безусловной оптимизации с использованием оператора Лагранжа

$$L_d = [\Pi_3 (E_{nc} + E_{дн} + E_{дв} + E_{мех}) + \lambda_{OЖ} \cdot (I_{OЖ} - E_{OЖ}) + \lambda_H \cdot (I_H - E_H) + \lambda_{МА} \cdot (I_{МА} - E_{МА})] \cdot \tau_{МА}.$$

Здесь  $E$  означает количество энергии, а  $I$  – функцию, описывающую ее изменение.

### ВЫВОД

1. Разработана физическая модель комплекса ОЖ–Н–МА и его взаимного влияния в процессе функционирования. Предложена термоэкономическая модель, определяющая эффективность эксплуатации.

2. В данной работе использован эксергетический метод работоспособности комплекса.

3. Выполненный анализ необходим для установления зависимости энергетических и экономических затрат от изменения температурного режима в морозильном аппарате.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Ионов, А. Г.** Выбор оптимального перепада температур для воздухоохладителей судовых морозильных аппаратов [Текст] / А. Г. Ионов, В. Н. Эрлихман. – Холодильная техника, 1973. – № 11. – С. 24–28.
- [2] **Оносовский, В. В.** Моделирование и оптимизация холодильных установок [Текст] : учеб. пособие / В. В. Оносовский. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1990. – 208 с.
- [3] **Тсатсаронис, Дж.** Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергообразующей системы [Текст] / Дж. Тсатсаронис. – О. : ООО Студия «Негоциант», 2002. – 87 с.
- [4] **Эксергетические расчеты технических систем [Текст] : справ. пособие / В. М. Бродянский, Г. П. Верховкер, Я. Я. Карчев [и др.] ; под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. – К. : Наук. думка. 1991. – 360 с.**

© С. М. Єфремов, Є. В. Хромов, А. В. Корольов  
Надійшла до редколегії 12.04.13  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко