

**РОЗДІЛ 1****ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА**

УДК 621.0.16.7:621.574+621.475.65

*Л. И. Морозюк, Б. Г. Грудка*

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, г. Одесса, 65039, Украина

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АБСОРБЦИОННО-РЕЗОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ В СИСТЕМЕ ТРИГЕНЕРАЦИИ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*Современная система тригенерации состоит из энергетической установки, оборудования регенерации тепла и холодильной машины. В малой энергетике она решает проблемы удаленных от центральных систем энергоснабжения населенных пунктов и независимых малых производств, повышая эффективность использования первичной энергии. На примере фермерского хозяйства показано формирование малой системы тригенерации. Обоснован выбор водоаммиачной абсорбционно-резорбционной холодильной машины (АРХМ) для производства холода. Оценена энергетическая эффективность холодильной машины, работающей в температурном режиме системы тригенерации малой энергетике.*

**Ключевые слова:** Малая энергетика; Тригенерация; Абсорбционно-резорбционная холодильная машина; Энергетическая эффективность.

*Л. І. Морозюк, Б. Г. Грудка*

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039, Україна

**ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ АБСОРБЦІЙНО-РЕЗОРБЦІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ В СИСТЕМІ ТРИГЕНЕРАЦІЇ МАЛОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

*Сучасна система тригенерації складається з енергетичної установки, устаткування регенерації тепла та холодильної машини. У малій енергетиці вона вирішує проблеми віддалених від центральних систем енергопостачання населених пунктів та незалежних малих виробництв, підвищуючи ефективність використання первинної енергії. На прикладі фермерського господарства показано формування малої системи тригенерації. Обґрунтовано вибір водоаміачної абсорбційно-резорбційної машини для виробництва холоду. Проведено оцінювання енергетичної ефективності холодильної машини, що працює за температурним режимом системи тригенерації малої енергетики.*

**Ключові слова:** Мала енергетика; Тригенерація; Абсорбційно-резорбційна холодильна машина; Енергетична ефективність



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**I. ВВЕДЕНИЕ**

Развитие систем тригенерации в энергетических установках с утилизацией тепла отработавших газов связано с ростом цен на энергоносители и электроэнергию для эксплуатации крупных строительных объектов различного назначения и обеспечения технологических процессов промышленных предприятий с разным температурным уровнем производства. Кроме того, существует дефицит электрических коммуникаций в большом количестве населенных пунктов, отдаленных от централизованных поставщиков электроэнергии.

Решение о целесообразности применения систем тригенерации для конкретных потребителей с выбором рабочих параметров блоков системы требует детального анализа и сбора данных относительно реальных величин термодинамического совершенства каждого блока. Эти данные могут быть получены из мониторинга действительных установок и развития современного производства.

Совместное производство электроэнергии и тепла (системы когенерации) давно и широко используют при утилизации сбросного тепла энергетических установок различной мощности [1]. Совместное производство механической работы и

холода в одной машине, называемой теплоиспользующей, давно признано способом уменьшения потребления материальных и природных ресурсов и источником экономии энергетических ресурсов [2].

Таким образом, объединение в единый комплекс системы когенерации и теплоиспользующей холодильной машины с производством трех полезных эффектов способно дать максимальный эффект экономии природных ресурсов [3].

Из существующих систем тригенерации энергетических установок выделяются в особую группу системы малой энергетики. Они наиболее востребованы, но имеют самую малую техническую информацию относительно развития.

Малая энергетика решает проблемы удаленных от централизованных энергетических систем населенных пунктов и независимых малых производств, в частности, сельскохозяйственных. Примерно 60-70 % территорий многих государств не охвачены централизованным энергоснабжением [4]. Реализованная в таких условиях система тригенерации малой энергетики способна повысить эффективность использования первичной энергии и отношение суммарной производимой мощности к массе используемого оборудования.

Рассмотрим возможность реализации системы тригенерации малой энергетической установки на частном примере фермерского сельскохозяйственного производства [5].

## II. СИСТЕМА ТРИГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Тепло, утилизируемое в малой энергетической установке фермерского хозяйства  $Q_{ут}$  (рисунок 1), согласно энергетическому балансу

$$Q_{ут} = Q_{от} + Q_{мк} + Q_{тв} + Q_{пт} + Q_{хол} + Q_{сб}, \quad (1)$$

может распределяться следующим образом:

- отопление жилых, производственных и подсобных помещений в холодное время года –  $Q_{от}$ ;
- кондиционирование или поддержание микроклимата в жилых и производственных помещениях в теплое время года –  $Q_{мк}$ ;
- круглогодичное получение теплой воды для бытовых и производственных нужд –  $Q_{тв}$ ;
- сезонное отопление теплицы –  $Q_{пт}$ ;
- сезонное охлаждение и низкотемпературное хранение скоропортящихся продуктов растительного и животного происхождения –  $Q_{хол}$ ;
- обязательные тепловые сбросы в окружающую среду –  $Q_{сб}$ .

Соотношение производительностей полезных эффектов и температурных режимов производства тепла и холода полностью зависят от потребностей конкретного производителя, напрямую определяются колебаниями температуры наружного воздуха и энергетической эффективностью установок, производящих каждый эффект (рисунок 1).

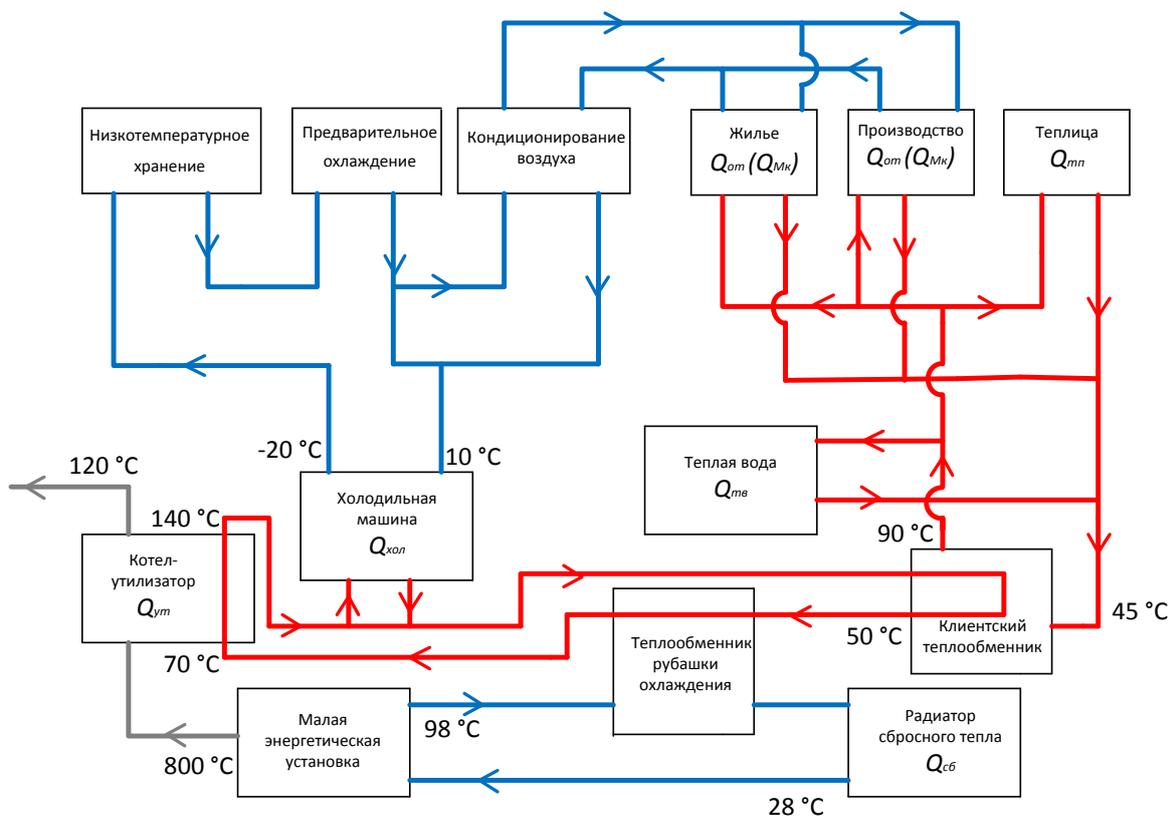


Рисунок 1 – Схема системы тригенерации малой энергетической установки для фермерского хозяйства

Здесь следует отметить, что производство холода является очень важным фактором для фермерского хозяйства, поскольку позволяет производителю самостоятельно перерабатывать сырье и сохранять произведенный продукт, обеспечивая его поступление на рынок с высоким качеством в течение круглого года.

Производство холода в системах тригенерации обеспечивают абсорбционные холодильные машины с рабочими веществами: водным раствором бромистого лития и водоаммиачным раствором. Термодинамические свойства указанных веществ ограничивают температурные режимы производства холода, поэтому для рассматриваемой системы тригенерации можно рекомендовать только водоаммиачные машины.

Условиями для работы абсорбционной машины в составе системы тригенерации, изображенной в виде схемы на рисунке 1, могут быть:

– широкий интервал температур греющего источника, которым является промежуточный теплоноситель котла-утилизатора;

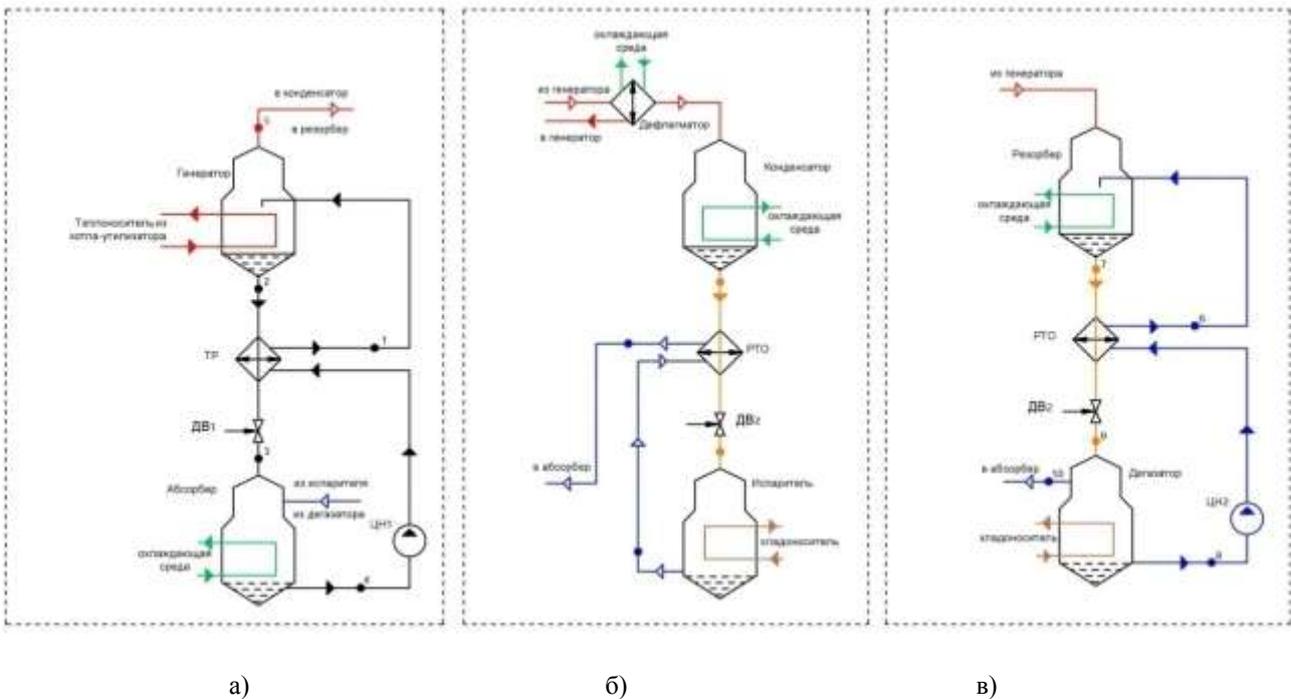
– широкий интервал температур производства холода;

– возможное различное сочетание температурных режимов работы потребителей тепла и холода в системе;

– возможность значительного подогрева охлаждающей среды в процессах отвода тепла в элементах холодильной машины.

### III. ВЫБОР СХЕМЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Выбор машины базируется на сравнительном анализе двух схем и циклов водоаммиачных холодильных машин: одноступенчатой абсорбционной и одноступенчатой абсорбционно-резорбционной (рисунок 2). В обеих схемах присутствует термохимический компрессор (рисунок 2а), в котором осуществляется прямой термодинамический цикл. Процессы в обратных циклах абсорбционной (рисунок 2б) и резорбционной (рисунок 2в) ступенях происходят в теплообменных аппаратах: конденсаторе и испарителе, резорбере и дегазаторе.



**Рисунок 2** – Принципиальные схемы одноступенчатых водоаммиачных машин, абсорбционной (АХМ) и абсорбционно-резорбционной (АРХМ):

а) термохимический компрессор, б) абсорбционная ступень, в) резорбционная ступень

Принципиальное отличие резорбционной от обычной абсорбционной машины состоит в том, что все четыре процесса фазовых превращений рабочего вещества происходят при переменных температурах: производство холода в дегазаторе и отдача тепла охлаждающей среде в резорбере резорбционной ступени, а также в генераторе и абсорбере термохимического компрессора. Эта особенность решающим образом влияет на термодинамическое совершенство машины и определяет область рационального примене-

ния, которой, в частности, является рассматриваемая система [6].

Еще одним важным фактором, влияющим на выбор резорбционной машины, являются рабочие давления в аппаратах. Низкое давление в машине определено температурой кипения в дегазаторе, а высокое давление в генераторе и резорбере является независимой переменной. Его выбор определяет все характеристики машины: тепловые нагрузки на аппараты, энергетическую эффективность и эксплуатационную надежность.

#### IV. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АРХМ

В соответствии со схемой, изображенной на рисунке 2в, цикл в резорбционной ступени осуществляется следующим образом. Циркуляция осуществляется водоаммиачным насосом, нагнетающим слабый раствор из дегазатора обратно в резорбер. Возвращается крепкий раствор из резорбера в дегазатор через дроссельное устройство. Потоки крепкого и слабого растворов между резорбером и дегазатором проходят через регенеративный теплообменник.

Связь термохимического компрессора (рисунок 2а) с резорбционной ступенью осуществляется по линиям: генератор-резорбер и абсорбер-дегазатор.

Цикл одноступенчатой абсорбционно-резорбционной холодильной машины изображен на рисунке 3 в диаграмме  $h-\xi$  (энтальпия-концентрация).

Энергетическая эффективность машины определяется величиной коэффициента преобразования энергии в цикле  $SOP$ . Для его определения построена математическая модель цикла резорбционной машины в соответствии со следующим алгоритмом.

##### Входные параметры цикла:

- температура греющего источника  $T_{гор}$ ;
- температура охлаждающей среды  $T_{сп}$ ;
- температура потребителя холода  $T_{хол}$ ;
- рабочее давление в генераторе и резорбере  $P_r$ .

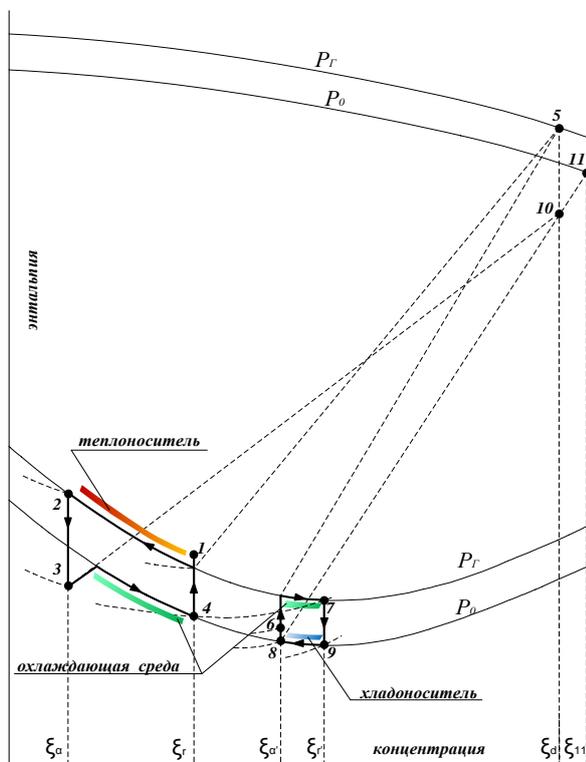


Рисунок 3 – Цикл АРХМ в диаграмме  $h-\xi$

Температуры в узловых точках 2, 3, 4, 6, 8 цикла задают с учетом разности температур на теплопередачу в соответствующих аппаратах машины [7].

#### Удельные характеристики цикла [7]

1. Кратность циркуляции раствора в термохимическом компрессоре:

$$f = (\xi_d - \xi_a) / (\xi_r - \xi_a), \text{ кг/кг} \quad (2)$$

2. Удельная тепловая нагрузка на теплообменник растворов термохимического компрессора:

$$q_T = (f - 1)(h_2 - h_3), \text{ кДж/кг} \quad (3)$$

3. Энтальпия крепкого раствора на входе в генератор:

$$h_1 = h_4 + q_T / f, \text{ кДж/кг} \quad (4)$$

4. Удельная тепловая нагрузка на генератор:

$$q_G = (h_5 - h_2) + f(h_2 - h_1), \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

5. Удельная тепловая нагрузка на абсорбер:

$$q_A = (h_{10} - h_7) + f(h_7 - h_4), \text{ кДж/кг} \quad (6)$$

6. Энтальпия влажного пара на входе в абсорбер:

$$h_{10} = h_{11} - (\xi_{11} - \xi_{10}) \cdot (h_{11} - h_2 / \xi_{11} - \xi_2) \quad (7)$$

7. Удельная тепловая нагрузка на регенеративный теплообменник резорбционного цикла:

$$q'_T = (f' - 1)(h_6 - h_8), \text{ кДж/кг} \quad (8)$$

8. Кратность циркуляции в резорбционном цикле:

$$f' = (\xi_d - \xi_a') / (\xi_r' - \xi_a') \quad (9)$$

9. Удельная тепловая нагрузка на резорбер:

$$q_P = h_5 - (h_6 - f'(h_6 - h_7)), \text{ кДж/кг} \quad (10)$$

10. Удельная холодопроизводительность:

$$q_D = h_{10} - (h_6 - f'(h_6 - h_7)), \text{ кДж/кг} \quad (11)$$

11. Тепловой баланс машины:

$$q_D + q_T = q_P + q_A, \text{ кДж/кг} \quad (12)$$

12. Коэффициент преобразования (энергетическая эффективность цикла):

$$SOP = q_D / q_T \quad (13)$$

Реальные условия работы системы тригенерации устанавливают различные сочетания входных параметров для холодильной машины и определяют ее энергетическую эффективность. Задача выбора входных параметров состоит в обеспечении реализации технического задания потребителя с максимальной эффективностью термодинамического цикла теплоиспользующей холодильной машины.

#### V. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Оценка энергетической эффективности абсорбционно-резорбционной холодильной машины решает такие задачи:

- установление возможности практической реализации условий технического задания потребителя на создание системы тригенерации;

– выбор входных рабочих параметров холодильной машины для обеспечения максимальной эффективности термодинамического цикла.

Рассмотрим частные задачи термодинамического анализа с последующим их объединением.

Для расчета выбраны входные параметры, соответствующие действительным температурным режимам систем тригенерации для фермерского хозяйства, приведенные на рисунке 1:

– температура промежуточного теплоносителя в котле-утилизаторе (источник высокопотенциального тепла для холодильной машины)

$$T_{\text{сop}} = 70 \dots 140^\circ\text{C};$$

– температура охлаждающей среды (источник

среднетемпературного тепла для холодильной машины)  $T_{\text{ср}} = 20 \dots 40^\circ\text{C};$

– рабочее давление в генераторе и резорбере  $p_r = 5 \dots 10 \text{ бар};$

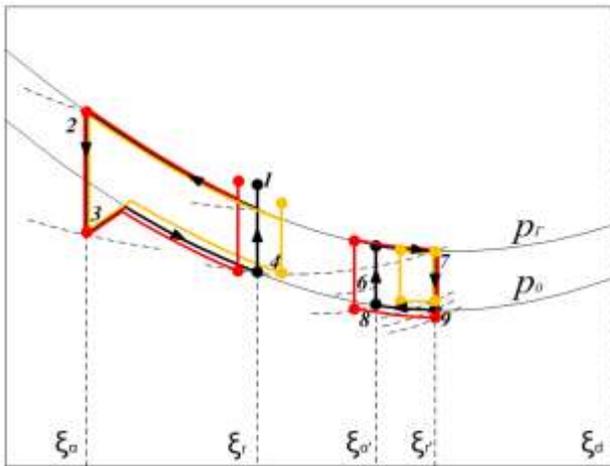
– температура промежуточного хладоносителя в дегазаторе (источник низкотемпературного тепла для холодильной машины)  $T_{\text{хол}} = 0 \dots 15^\circ\text{C}.$

Рассмотрим четыре задачи.

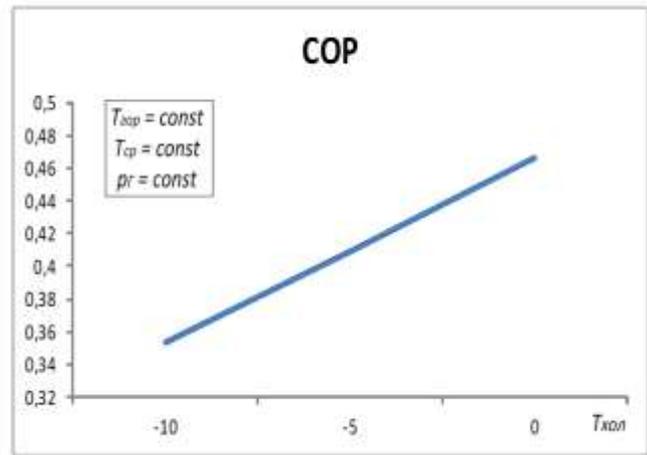
Задачи решены с использованием уравнений (2-13). Результаты приведены в графической форме на рисунках 4-7.

**Задача 1.** Определить COP АРХМ при:

$$T_{\text{сop}} = \text{const}; T_{\text{ср}} = \text{const}; p_r = \text{const}; T_{\text{хол}} = \text{var}.$$



а)



б)

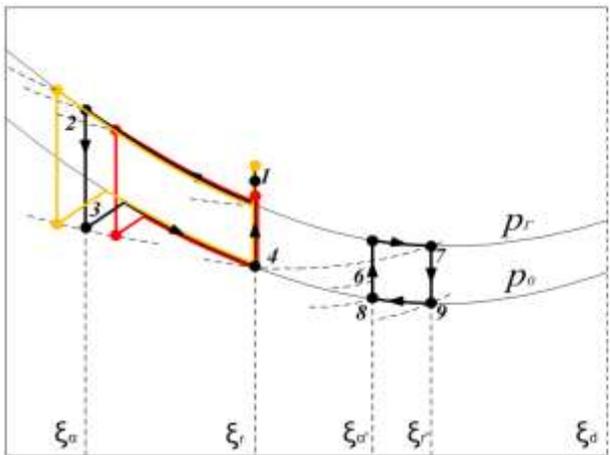
**Рисунок 4** – Решение задачи 1: а) цикл в диаграмме h-ξ; б) COP = f(T<sub>хол</sub>)

С понижением T<sub>хол</sub> уменьшается давление p<sub>0</sub> и уменьшается концентрация крепкого раствора в термохимическом компрессоре ξ<sub>г</sub> (рисунок 4а), как следствие, уменьшается COP (рисунок 4б). При минимальной зоне дегазации ((ξ<sub>г</sub> - ξ<sub>а</sub>)<sub>min</sub> = 6% в действительных водоаммиачных машинах [8] мини-

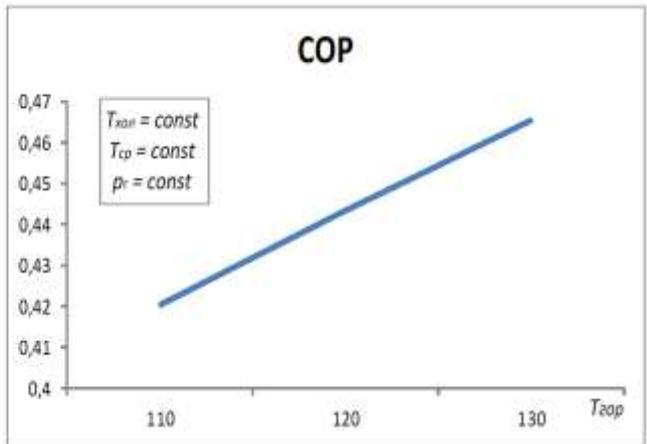
мальная температура кипения в рассматриваемых условиях может достигать T<sub>хол</sub> = -20 °С. Энергетическая эффективность при этом снижается до ≈ 0,25.

**Задача 2.** Определить COP АРХМ при:

$$T_{\text{хол}} = \text{const}; T_{\text{ср}} = \text{const}; p_r = \text{const}; T_{\text{сop}} = \text{var}.$$



а)



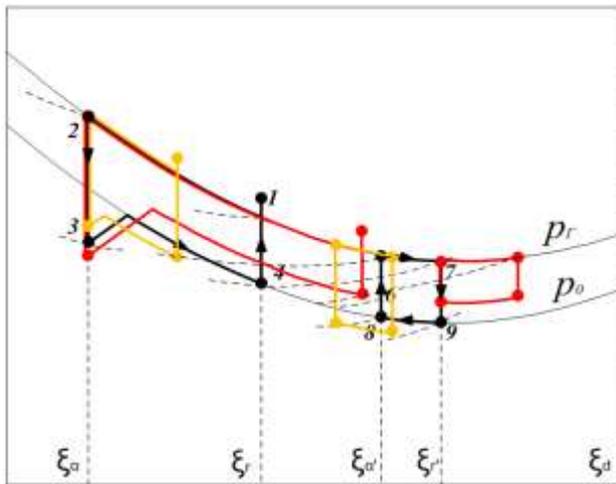
б)

**Рисунок 5** – Решение задачи 2: а) цикл в диаграмме h-ξ; б) COP = f(T<sub>сop</sub>)

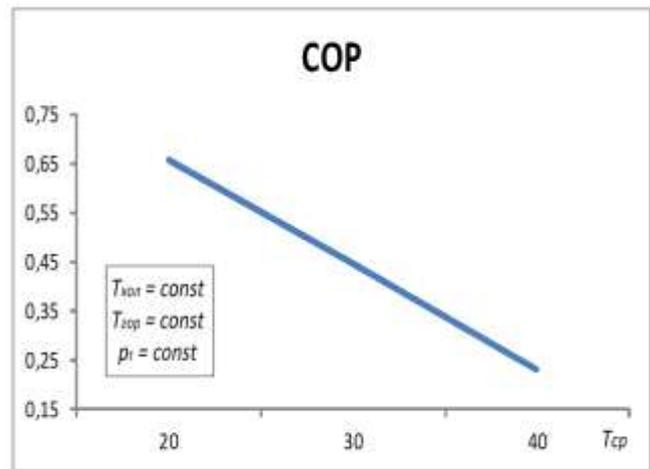
Наивысшая температура кипения раствора в генераторе полностью зависит от температурного интервала теплоносителя котла-утилизатора. Для

рассматриваемых условий с учетом разности температур на теплопередачу (T<sub>2</sub>)<sub>max</sub> ≈ 130 °С. Нижний предел (T<sub>2</sub>)<sub>min</sub> ≈ 90 °С определен зоной

дегазации в действительных машинах не менее  $(\xi_r - \xi_a)_{min} = 6\%$ . Энергетическая эффективность характеризуется величинами 0,4...0,5.



а)

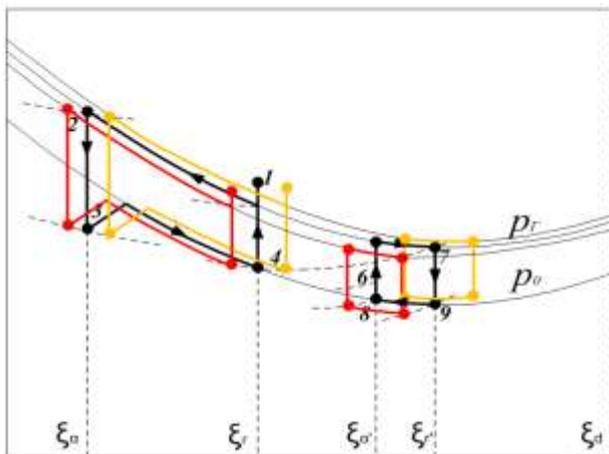


б)

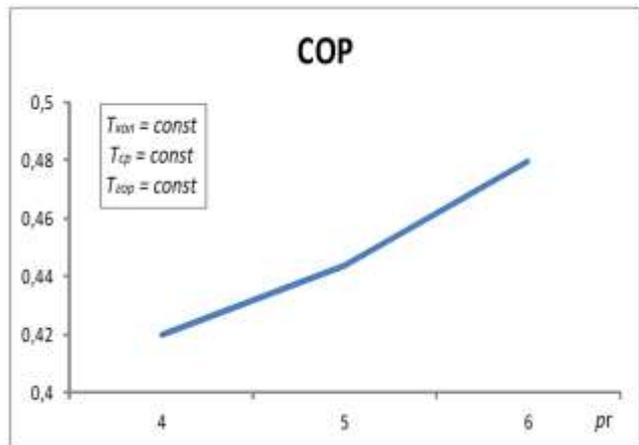
Рисунок 6 – Решение задачи 3: а) цикл в диаграмме h-ξ; б)  $COP = f(T_{cp})$

Интервал температур охлаждающей среды определяется климатическими условиями, в которых работает система. При понижении  $T_{cp}$  и постоянном давлении  $p_r = const$  в генераторе и резорбере увеличивается зона дегазации  $(\xi_r - \xi_a)$  в резорбционной ступени. При постоянной температуре

$T_{хол} = const$  увеличивается холодопроизводительность и растет энергетическая эффективность, величина которой в задаче составляет  $\approx 0,65$ .



а)



б)

Рисунок 7 – Решение задачи 4: а) цикл в диаграмме h-ξ; б)  $COP = f(p_r)$

В абсорбционно-резорбционных холодильных машинах отсутствует однозначная связь между соответствующими температурами и давлениями, поэтому выбор одного из давлений в допустимых пределах произволен. При повышении  $p_r$  увеличиваются массогабаритные характеристики машины, при его снижении уменьшается  $COP$ . В задаче использованы значения давлений  $p_r$ , исходя из опыта эксплуатации действительных установок [9]. В системе тригенерации энергетическая эффективность АРХМ как функция давления  $p_r$  представлена значениями 0,4...0,5.

системы тригенерации малой энергетики, составляет 0,25...0,65.

Общий диапазон значений энергетической эффективности абсорбционно-резорбционной холодильной машины, работающей в температурном режиме

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положительными качествами одноступенчатых абсорбционно-резорбционных холодильных машин в составе систем тригенерации малых энергетических установок являются возможность использования более низких температур греющего источника, более низких рабочих давлений в генераторе и резорбере и возможность большего подогрева охлаждающей среды в резорбере, по сравнению с обычными абсорбционными машинами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Амерханов Р. А.** Теплотехника: Учебн. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Р. А. Амерханов, Б. Х. Драганов. – М.: 2006. – 432 с.
2. **Морозюк Л. И.** Теплоиспользующие холодильные машины – пути развития и совершенствования [Текст] / Л.И. Морозюк // Холодильная техника и технология. – 2014. – №5 (151). – с. 23-29.
3. **Angrisani G.** Performance assessment of cogeneration and trigeneration systems for small scale applications [Text] / Angrisani G., Akisawa A., Marrasso E., Roselli K., Sasso M. // Elsevier. – 2016.
4. **Малая энергетика [Электронный ресурс] /** Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/35/04.php>. – Дата обращения 12.06.2016
5. **Амерханов Р. А.** Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства: учебник для студентов вузов по агроинженерным специальностям

- [Текст] / Р. А. Амерханов, Б. Х. Драганов. – Краснодар: 2006. – 200 с.
6. **Блиер Б. М.** Теоретические основы проектирования абсорбционных термотрансформаторов [Текст] / Б. М. Блиер, А. В. Вургафт. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 203 с.
7. **Кошкин Н. Н.** Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин [Текст] / Н. Н. Кошкин, А.К. Стукаленко и др. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 464 с.
8. **Сакун И. А.** Холодильные машины: Учебн. для вузов по специальности «Холодильные машины и установки» [Текст] / И.А. Сакун, Н. Н. Кошкин, Е.М. Бамбушек и др. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1985. – 510 с.
9. **Бадилькес И. С.** Абсорбционные холодильные машины [Текст]/ И. С. Бадилькес, Р. Л. Данилов. – М.: Пищепромиздат, 1966. – 356 с.

Отримана в редакції 10.06.2016, прийнята до друку 01.07.2016

*L. I. Morosuk, B. G. Grudka*

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65039, Ukraine

## ENERGY EFFICIENCY OF AN ABSORPTION-RESORPTION REFRIGERATION MACHINES INCLUDED TO THE TRIGENERATION SYSTEM OF SMALL ENERGY

*A modern trigeneration system consists of a power generation unit, a system of heat regeneration, and an absorption refrigeration machine. In small energy, the trigeneration systems are used to supply energy for small villages and small industries (without connection to net). The trigeneration concept leads to an increase in the energy effectiveness of utilization of primary fuel as well as economic effectiveness of the industrial process where heat and cold are required. In the paper, the schematics of the small trigeneration system is developed for the farm industry (living accommodation, production structures, green houses, block of heat water supply, refrigeration rooms for chilling and storage of raw and finished agriculture products). The refrigeration capacity is generated using one-stage absorption-resorption water-ammonia refrigeration machine. The reasons to select this type of absorption machine are the following: (a) relative low pressure within components, and (b) low irreversibilities within heat exchange processes because of heat supply/reject at variable temperature. In the paper, the method for evaluation of energetic effectiveness of the absorption-resorption refrigeration machine has been developed and applied for the application of this machine to the trigeneration system.*

**Keywords:** Small energy; Trigeneration; Absorption-resorption refrigeration machine; Energetic effectiveness.

## REFERENCES

1. **Amerhanov, R. A.** (2006). Teplotekhnika: uchebnik dlia vuzov. – 2-iye izd., pererab. i dop. – M., 432 p.
2. **Morozyuk, L. I.** (2014). Teploispolzuyuschiye kholodilnyie mashiny – puti razvitiya i sovshehstvovaniya. *Refrigeration Engineering and Technology*, 5(151), 23-29 (in Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.5/2014.28695>.
3. **Angrisani, G., Akisawa, A., Marrasso, E., Roselli, C., Sasso M.** (2016). Performance assessment of cogeneration and trigeneration systems for small scale applications. *Energy Conversion and Management*, vol. 125, 194-208. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.092>
4. **Малая энергетика.** (2016). [Electronic source] Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/35/04.php>. Date of access: 12 June 2016 (in Russian)
5. **Amerhanov, R. A.** (2006). Proektirovaniye sistem teplosnabzheniya selskogo khoziaistva: uchebnik dlya studentov vuzov po agroinzhenernym spetsialnostiam. Krasnodar, 200 p. (in Russian)
6. **Blier, B. M.** (1971). Teoreticheskie osnovy proektirovaniya absorbtionnyh termotransformatorov. M.: Pischevaya promyshlennost, 203 p. (in Russian)
7. **Koshkin, N. N.** (1976). Teplovyie i konstruktivnyie raschety kholodilnykh mashin. L.: Mashinostroenie (Leningr. otd-nie), 464 p. (in Russian)
8. **Sakun, I. A.** (1985). Kholodilnyie mashiny: uchebnik dlia vuzov po spetsialnosti «Kholodilnyie mashiny i ustanovki». L.: Mashinostroenie, 510 p. (in Russian)
9. **Badyilkes, I. S.** (1966). Absorbtsionnyie kholodilnyie mashiny. M.: Pischepromizdat, 356 p. (in Russian)

Received 10 June 2016

Approved 01 July 2016

Available in Internet 31 August 2016