

В.М. Арсеньев, канд. техн. наук,  
М.И. Проценко,  
М.Г. Прокопов  
Сумский государственный университет

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНО-ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА В СОСТАВЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

*Розглянуто можливість застосування струменево-парового ежектора у складі холодильної машини. Наведено результати порівняння показника енергоефективності повного циклу перетворення енергії термотрансформатора на базі струменево-термокомпресорного модуля і холодильних машин відомих вітчизняних і зарубіжних виробників.*

*In the article the capability of application of stream-steam ejector is considered in composition a refrigeration machine (converter of thermal energy – thermo-transformers). Data of comparison of coefficient of efficiency of energy are presented on the complete circuit of change of energy of thermo-transformers a base jet thermo-compression module and refrigeration machines of the known domestic and foreign producers.*

### Введение

На сегодняшний день еще не сложилась общепризнанная точка зрения, касающаяся механизма истечения двухфазных потоков вскипающей жидкости как рабочего тела в различных струйных нагнетателях, таких как термонасосы (пароводяные инжекторы) и термокомпрессоры.

Так как данная тема является перспективной в области энергетики на кафедре технической теплофизики Сумского государственного университета был создан образец установки струйного термокомпрессора (СТК) [1].

Принцип струйной термокомпрессии предполагает использование в качестве активной среды вскипающую при истечении недогретую до насыщения жидкость (рис.1): в выходном срезе сопла формируется сверхзвуковая рабочая струя мелкодисперсной парокapпельной структуры с высоким объемным паросодержанием. Сжатый в струйном компрессоре (эжекторе Э) пар отделяется в сепараторе С, из которого насыщенная жидкость отбирается насосом Н в циркуляционный контур и после подогрева в теплообменнике Т подается в активное сопло эжектора. Перепроизводство сжатого сухого пара ( $m_z \geq m_x$ ) компенсируется подводом жидкости ( $m_o$ ) в циркуляционный контур [2].

Привлекательность реализации струйной термокомпрессии в энергосберегающих системах теплоэнергетики и промышленной тепло- и хладотехники связана с достаточно высокой (для струйных аппаратов) эффективностью, обусловленной незначительными потерями «на удар», малыми затратами энергии на подачу малосжимаемой жидкости и возможностью утилизации (или регенерации) низкопотенциального тепла вместо механической энергии привода.

Холодильное оборудование играет большую роль в жизни человека на сегодняшний день. Круглогодичное использование холодильных машин для целей отопления и вентиляции зданий является технически возможным и

практически целесообразным, т.к. каждая холодильная установка может работать как для выработки холода, так и для выработки тепла.

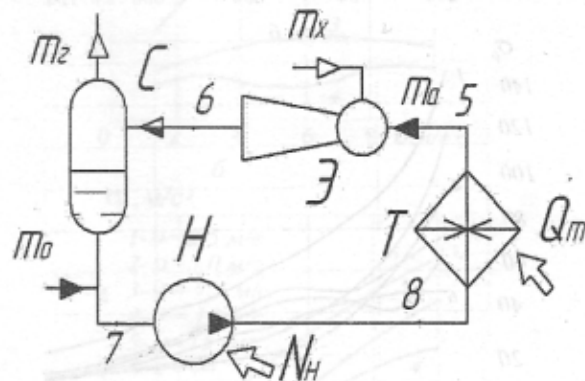


Рис. 1. Принципиальная схема струйного термокомпрессора.

Понижающий термотрансформатор на базе струйной термокомпрессии является малоизученной темой, но расчеты показали, что на рабочих веществах HFC-типа достигаются показатели энергоэффективности в режиме теплового насоса, гораздо лучшие, чем у обычных понижающих термотрансформаторов [3]. На основании полученных результатов было принято решение произвести расчеты в режиме холодильной машины.

В статье представлены и проанализированы результаты расчетов показателя энергоэффективности понижающего термотрансформатора на базе СТК в режиме холодильной машины и холодильных машин парокapпельного типа современных производителей.

**Схема термотрансформатора на базе СТК в режиме холодильной машины**

Схема термотрансформатора на базе струйного термокомпрессора (рис. 2) представляет собой аналог парокомпрессионной холодильной машины, в которой компрессор заменен струйным термокомпрессорным модулем. Прямой цикл термотрансформатора реализуется в СТК.

Сжатый в струйном компрессоре пар холодильного агента разделяется в сепараторе, и сухой насыщенный пар подается на конденсатор КД. После конденсации и переохлаждения жидкость через дроссельное устройство ДВ подается на испаритель И, в котором кипит холодильный агент, при этом происходит охлаждение в камере. Обратный цикл термотрансформатора сочетается с прямым в процессе сжатия пара в эжекторе.

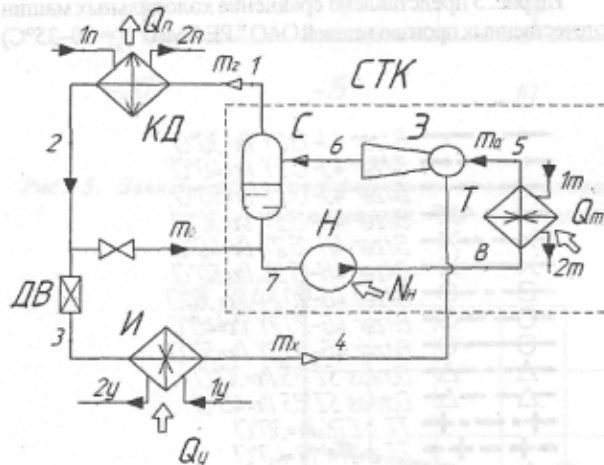


Рис. 2. Схема термотрансформатора на базе СТК:

КД – конденсатор; ДВ – дроссельный вентиль; И – испаритель; Н – насос; Э – эжектор; С – сепаратор; Т – теплообменник.

Таким образом, замена механического компрессора струйным термокомпрессорным модулем реализует новый комбинированный цикл термотрансформатора струйно-компрессорного типа. Такая замена позволяет отказаться от применения ценной электроэнергии на привод компрессора, а использовать низкопотенциальную теплоту [3].

**Показатели энергоэффективности**

Для определения показателей энергоэффективности термотрансформатора необходимы сведения об эффективных показателях термодинамического цикла и влияния на них различных определяющих факторов. Данная задача решается при помощи программного продукта с использованием группы уравнений, описывающих законы термодинамики, а также результатов экспериментальных исследований опытного образца СТК [1]. На основе этих

данных, а также на базе программного продукта для расчета СТК была разработана методика расчета термотрансформатора на базе СТК с применением веществ HFC – типа. Данный продукт позволяет определять параметры в характерных точках, а также степень эффективности струйно-термокомпрессорного модуля и самого термотрансформатора [3].

Энергоэффективность термотрансформаторов характеризует коэффициент преобразования, называемый так же коэффициентом трансформации по полной цепи энергетического преобразования,  $\psi$ , представляющий сопоставление полезного эффекта и энергетических затрат на его реализацию.

Коэффициент преобразования термотрансформатора по полной цепи имеет вид:

$$COP_{\Sigma} = COP_{ТЭС} \cdot COP_{ЛЭП} \cdot COP_{ХМ}, \quad (1)$$

где  $COP_{ТЭС}$  — коэффициент трансформации теплоэлектростанции;  $COP_{ЛЭП}$  — коэффициент трансформации линии электропередач;  $COP_{ХМ}$  — коэффициент трансформации холодильной машины.

Для обычной парокомпрессионной холодильной машины известных производителей формулу (1) можно упростить до следующего вида:

$$COP_{\Sigma(ХМ)} = (K_1) \cdot (K_2) \cdot COP_{ХМ},$$

где  $K_1 = 0,3-0,4$ ;  $K_2 = 0,97-0,98$ .

В среднем в таком случае коэффициент преобразования по полной цепи имеет значение, равное 1 [4].

В ходе проведенных исследований выражение (1) для термотрансформатора на базе СТК в режиме холодильной машины было преобразовано к виду

$$COP_{\Sigma(ТТ)} = u \cdot \frac{q_{ХМ}}{q_a / \eta_{nm} + l_{in} / \eta_{sm}},$$

где  $u$  — коэффициент инжекции СТК;  $q_{ХМ}$  — удельная нагрузка на испаритель И;  $q_a$  — удельная нагрузка на теплообменник Т;  $l_{in}$  — удельная работа насоса струйно-компрессорного модуля;  $\eta_{nm}, \eta_{sm}$  — коэффициент теплоиспользования подогревателя рабочей жидкости и механический к.п.д. циркуляционного насоса.

Для термотрансформатора на базе СТК коэффициент преобразования по полной цепи получается в среднем равным 1,5.

**Результаты исследования**

В качестве исследуемых веществ были выбраны холодильные агенты R134a и R22. Выбор данных хладагентов обусловлен тем, что на сегодняшний день они являются наиболее используемыми в холодильной технике как отечественных производителей (ОАО “РЕФМА”) так и зарубежных (Danfos, Copeland, Bitzer).

Для определения режимных параметров при расчете в качестве исходных были приняты следующие характеристики оборудования:  $\eta_m = 0,9$  — механический к.п.д. насоса;  $\eta_n = 0,8$  — внутренний к.п.д. насоса;  $\eta_q = 0,95$  — коэффициент теплоиспользования подогревателя рабочей

жидкости;  $\phi_s = 0,9-0,98$  — коэффициент скорости струйного компрессора (по экспериментальным данным на водяном паре [1]);  $\phi_k = 0,95$  — скоростной коэффициент камеры смешения;  $\phi_n = 0,95$  — скоростной коэффициент пассивного потока сопла.

Диапазон определяющих параметров цикла термотрансформатора:  $t_1 = 30-50^\circ\text{C}$  — температура пара в сепараторе (конденсаторе,  $t_1$ );  $\Delta t_0 = 2^\circ\text{C}$  — перегрев циркуляционной жидкости в теплообменнике-подогревателе;  $p_{0a} = 15-20 \text{ бар}$  — давление нагнетания насоса;  $t_4 = -20$  —  $-10^\circ\text{C}$  — температура кипения в испарителе. Холодильные машины выбирались с холодопроизводительностью в интервале  $15-30 \text{ кВт}$  и  $50-100 \text{ кВт}$ .

Результаты расчета зависимостей коэффициента преобразования по полной цепи холодильных машин известных производителей и термотрансформатора на базе СТК (ТТ с СТК) в зависимости от температуры в испарителе представлены в виде графиков (рис. 3-6).

На рисунке 3 представлено сравнение холодильных машин производителей *Bitzer* и *Danfoss* с холодопроизводительностью  $Q_0 = 15-30 \text{ кВт}$  и термотрансформатора на базе СТК на веществе R134a. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК в определенном интервале температур лучше выбранных ХМ: при температуре конденсации  $t_k = 40-50^\circ\text{C}$  это явно видно, а при  $t_k = 30^\circ\text{C}$  лучшие показатели до температуры в испарителе  $t_4 = -14^\circ\text{C}$ .

На рис. 4 представлено сравнение холодильных машин производителя *Bitzer* с холодопроизводительностью  $Q_0 = 50-100 \text{ кВт}$  и термотрансформатора на базе СТК на веществе R134a. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК также лучше выбранных ХМ: при температуре конденсации  $t_k = 40-50^\circ\text{C}$  это явно видно, а при  $t_k = 30^\circ\text{C}$  лучшие показатели до температуры в испарителе  $t_4 = -13^\circ\text{C}$ .

На рис. 5 представлено сравнение холодильных машин отечественных производителей ОАО "РЕФМА" ( $t_k = 30-35^\circ\text{C}$ )

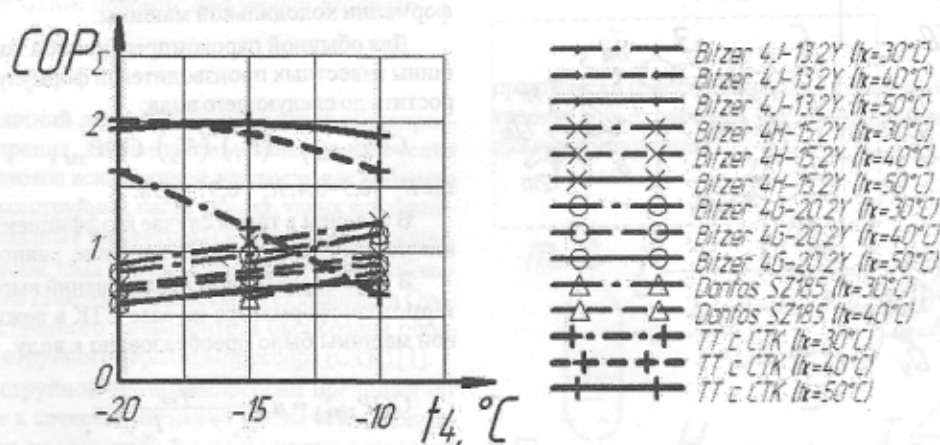


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве  $2^\circ\text{C}$ , на веществе R134a и холодопроизводительности  $Q_0 = 15-30 \text{ кВт}$ .

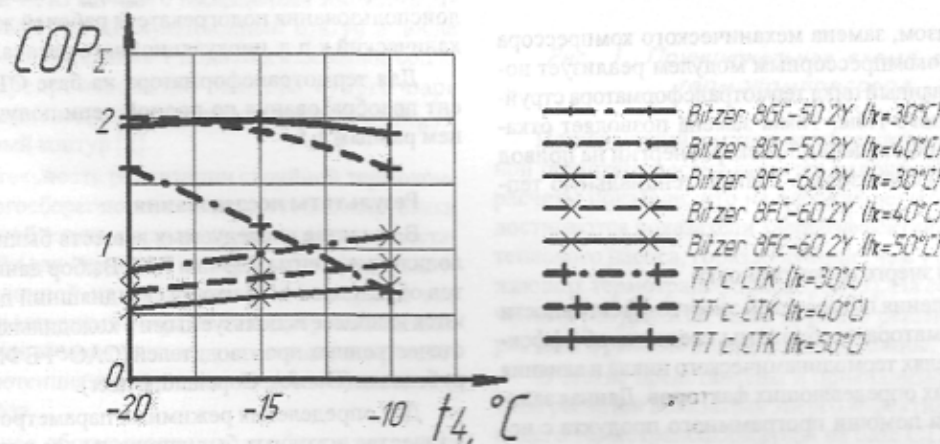


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве  $2^\circ\text{C}$ , на веществе R134a и холодопроизводительности  $Q_0 = 50-100 \text{ кВт}$ .

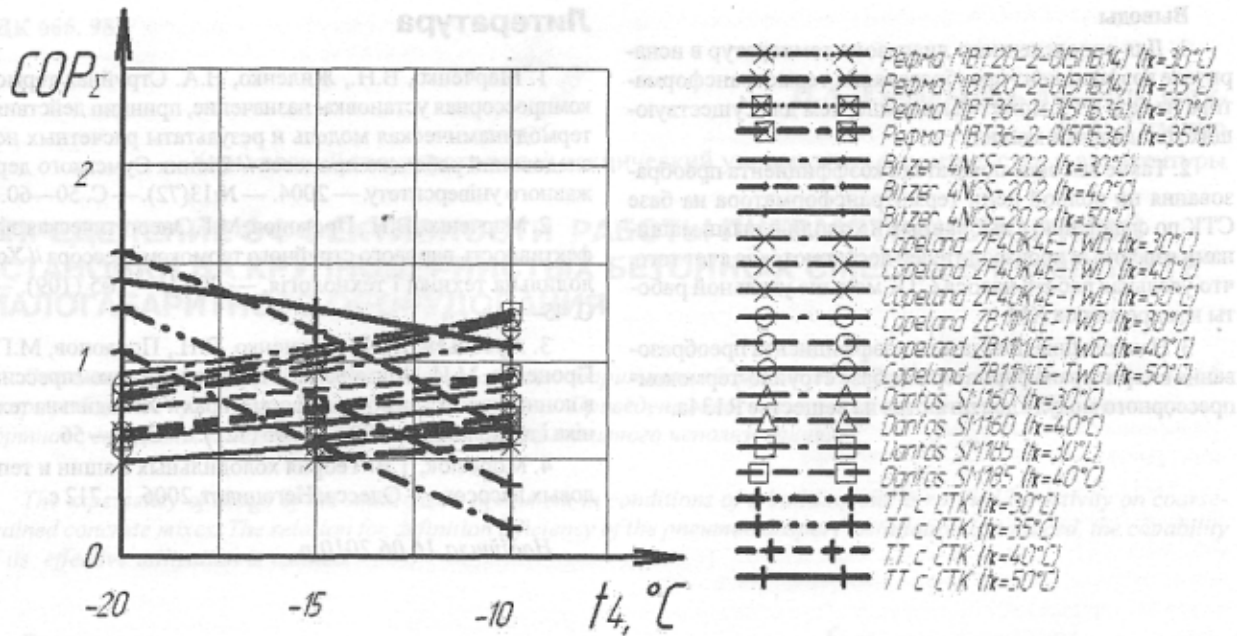


Рис. 5. Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве 2°C, на веществе R22 и холодопроизводительности  $Q_0=15-30$  кВт.

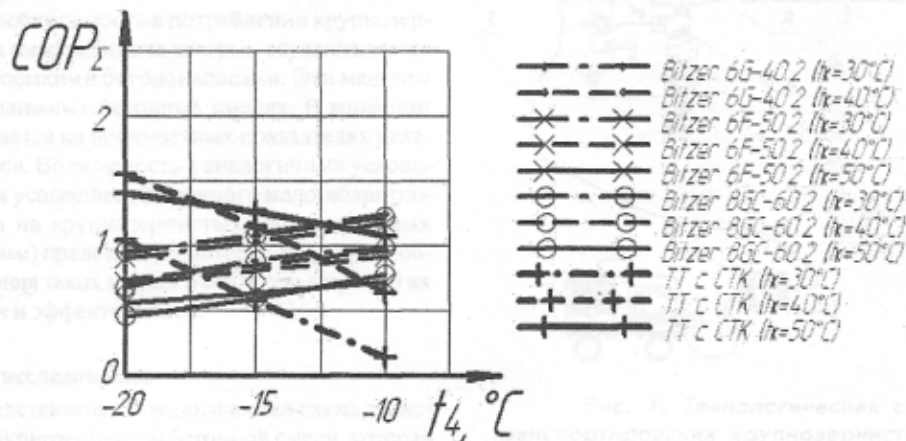


Рис. 6. Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве 2°C, на веществе R22 и холодопроизводительности  $Q_0=50-100$  кВт.

и зарубежных производителей Bitzer, Copeland и Danfos с холодопроизводительностью  $Q_0=15-30$  кВт и термотрансформатора на базе СТК на веществе R22. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК по сравнению с ХМ ОАО «РЕФМА» при температуре конденсации  $t_k=30^\circ\text{C}$  хуже, но при  $t_k=35^\circ\text{C}$  показатели лучше до температуры в испарителе  $t_4=-13^\circ\text{C}$ . Такая же ситуация просматривается и для остальных ХМ при температуре конденсации  $t_k=30^\circ\text{C}$ , а при температуре конденсации  $t_k=40-50^\circ\text{C}$  у ТТ с СТК показатели гораздо лучше до температуры в испарителе  $t_4=-14^\circ\text{C}$  (при  $t_k=40^\circ\text{C}$ ) и полностью лучше в заданном интервале температур ( $t_4=-20-10^\circ\text{C}$ ) при  $t_k=50^\circ\text{C}$ .

На рис. 6 представлено сравнение холодильных машин производителя Bitzer с холодопроизводительностью  $Q_0=50-100$  кВт и термотрансформатора на базе СТК на веществе R22. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК также лучше выбранных ХМ: при  $t_k=30^\circ\text{C}$  лучшие показатели в интервале температур в испарителе  $t_4=-20-19^\circ\text{C}$ , а при температуре конденсации  $t_k=40-50^\circ\text{C}$  у ТТ с СТК показатели выше до температуры в испарителе  $t_4=-13^\circ\text{C}$  (при  $t_k=40^\circ\text{C}$ ) и полностью лучше в заданном интервале температур ( $t_4=-20-10^\circ\text{C}$ ) при  $t_k=50^\circ\text{C}$ .

**Выводы**

1. Для определенного диапазона температур в испарителе коэффициент преобразования термотрансформатора на базе СТК может быть выше, чем для существующих холодильных машин.

2. Такие высокие показатели коэффициента преобразования по полной цепи термотрансформатора на базе СТК по сравнению с выбранными холодильными машинами известных производителей достигаются за счет того, что удельная работа насоса СТК меньше удельной работы компрессоров ХМ.

3. Наибольшие показатели коэффициента преобразования в термотрансформаторе на базе струйно-термокомпрессорного модуля достигаются на веществе R134a.

**Литература**

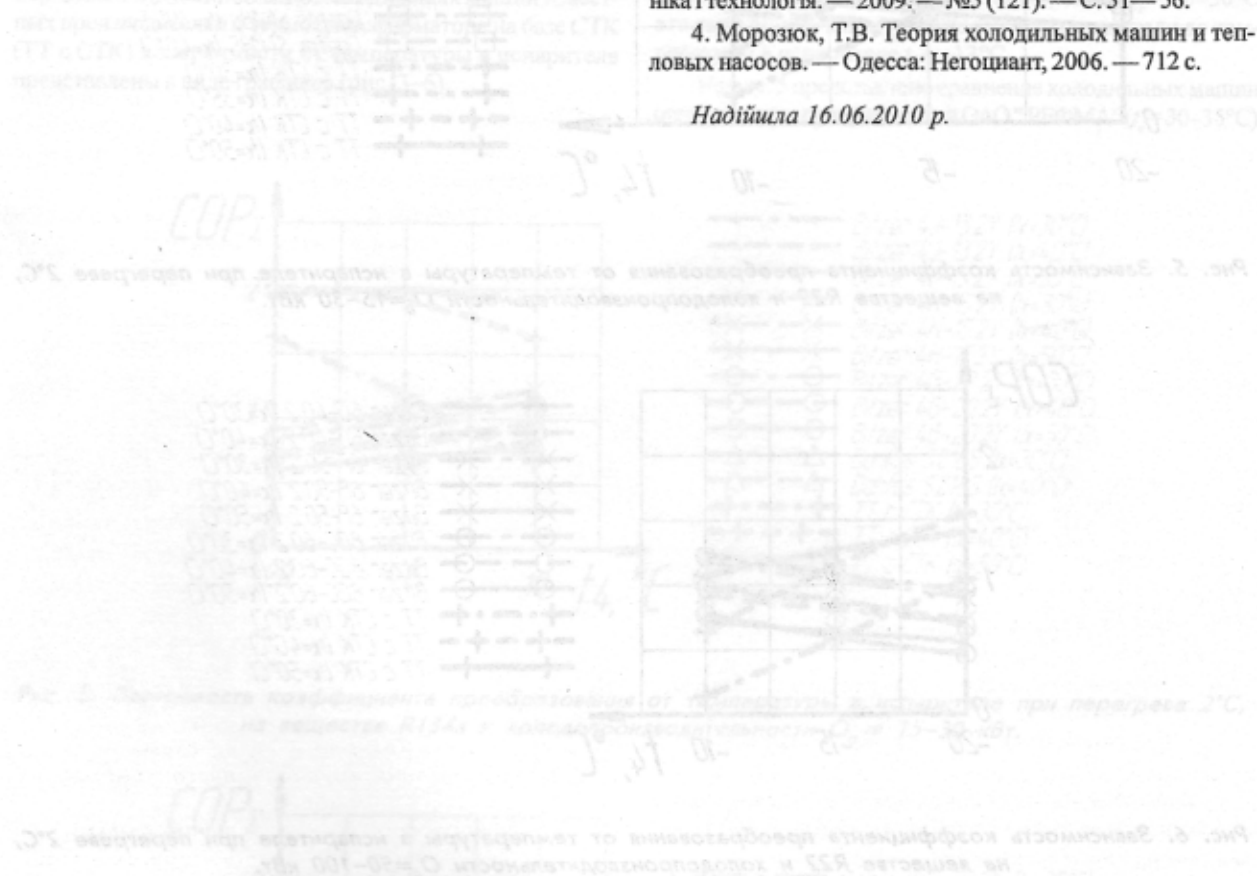
1. Марченко, В.Н., Жиленко, Н.А. Струйная термокомпрессорная установка: назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований рабочего процесса // Вісник Сумського державного університету. — 2004. — №13(72). — С. 50—60.

2. Марченко, В.Н., Прокопов, М.Г. Энергетическая эффективность парового струйного термокомпрессора // Холодильна техніка і технологія. — 2007. — №5 (109). — С. 45—51.

3. Арсеньев, В.М., Марченко, В.Н., Прокопов, М.Г., Проценко, М.И. Применение струйной термокомпрессии в понижающих термотрансформаторах // Холодильна техніка і технологія. — 2009. — №5 (121). — С. 51—56.

4. Морозюк, Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. — Одесса: Негоциант, 2006. — 712 с.

Надійшла 16.06.2010 р.



Нижче в порівняльному сенсі порівняно коефіцієнти преобразования в парових холодильних машинах з коефіцієнтами преобразования в термотрансформаторах на базі СТК на основі R22 та R134a. Як видно з графіків, коефіцієнти преобразования в термотрансформаторах на базі СТК в більшості випадків вищі за коефіцієнти преобразования в парових холодильних машинах. Це пов'язано з тим, що в термотрансформаторі на базі СТК удельна робота насоса менше за удельну роботу компресора в паровій холодильній машині.

Висновки. Для певного діапазону температур в випарнику коефіцієнт перетворення термотрансформатора на базі СТК може бути вище, ніж для існуючих холодильних машин. Такі високі показники коефіцієнта перетворення по повній ланці термотрансформатора на базі СТК порівняно з вибраними холодильними машинами відомих виробників досягаються завдяки тому, що удільна робота насоса СТК менше за удільну роботу компресора ХМ. Найкращі показники коефіцієнта перетворення в термотрансформаторі на базі струйно-термокомпресорного модуля досягаються на речовині R134a.