

УДК 621.1.016:621.565.048:536.24:664.002

Клименко В.В.¹, Скрипник А.В.², Корниенко В.Н.³

¹ Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Украина

² Кировоградский национальный технический университет, Украина

³ Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности Россельхозакадемии, Россия

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОГИДРАТНОГО АККУМУЛЯТОРА ЕСТЕСТВЕННОГО ХОЛОДА В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ПЛОДОВООВОЩЕХРАНИЛИЩ

Проведений термодинамічний аналіз ефективності застосування газогідратного акумулятора природного холоду в системах активного вентилявання плодовоовочесховищ. Показано, що ексергетичний к.к.д. систем активного вентилявання плодовоовочесховища з газогідратним холодоакумулятором і динамічною теплоізоляцією вищий у порівнянні із традиційним плодовоовочесховищем без холодоакумулятора в 1,2...1,8 рази.

Проведен термодинамический анализ эффективности применения газогидратного аккумулятора естественного холода в системах активного вентилирования плодовоовощехранилищ. Показано, что эксергетический к.п.д. систем активного вентилирования плодовоовощехранилища с газогидратным холодоакумулятором и динамической теплоизоляцией выше по сравнению с традиционным плодовоовощехранилищем без холодоакумулятора в 1,2...1,8 раза.

The thermodynamic analysis efficiency of application gas hydrate accumulator a natural cold in systems of active aeration storehouses of fruits and vegetables is lead. It is shown, that energy efficiency systems of active aeration storehouse of fruit and vegetables with gas hydrate accumulator and dynamic heat-insulation is higher in comparison with traditional storehouse fruit and vegetables without gas hydrate accumulator in 1,2 ... 1,8 times.

В плодовоовощехранилищах, оснащенных системами активного вентилирования, достаточно успешно решается задача обеспечения оптимальных тепловлажностных режимов хранения плодов и овощей, что позволяет минимизировать потери хранимой продукции и изменение ее качества [1, 2]. В этих хранилищах технически несложно применять естественный холод, термодинамическая ценность которого определяется суточной термической неравновесностью наружного воздуха [3, 4].

С целью сокращения теплопритоков, которые в ряде случаев значительно (до 2 раз) превосходят тепловыделения от дыхания продукции [2], в типовых сборных или стационарных секционных комплексах хранения картофеля и овощей, использующих искусственный холод, рекомендуется подача холодного воздуха в пространство между стенками секций и наружными ограждениями [1, 5]. Но в плодовоовощехранилищах, использующих в

системах активного вентилирования только естественный холод, реализовать такую схему работы практически невозможно, поскольку в дневной период, когда теплопритоки максимальны, температура наружного воздуха также высокая.

Нами предложена усовершенствованная конструкция хранилища растительной продукции, оснащенная системой активного вентилирования с автоматическим регулированием режимов подачи наружного воздуха, динамической теплоизоляцией и газогидратным аккумулятором естественного холода, что позволяет использовать в таких хранилищах эксергию холодного воздуха для локализации теплопритоков в теплый период суток [6 - 9].

На рис. 1 приведена схема такого плодовоовощехранилища, а на рис. 2 – схема газогидратного аккумулятора естественного холода.

В холодоакумуляторе (рис. 2) устройством, обеспечивающим отвод и подвод теплоты в процессах зарядки и разрядки, служит по-

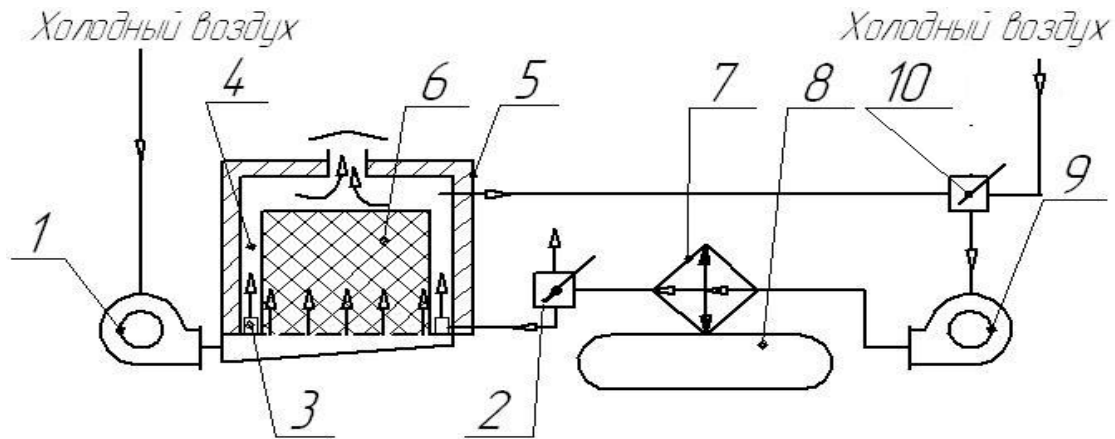


Рис. 1. Схема плодовоовощехранилища с активным вентилированием и газогидратным хладоаккумулятором: 1, 9 – вентиляторы; 2, 10 – трехходовые клапаны; 3 – напольный воздуховод; 4 – воздушная прослойка; 5 – овощехранилище; 6 – продукт; 7 – воздухоохладитель; 8 – аккумулятор холода.

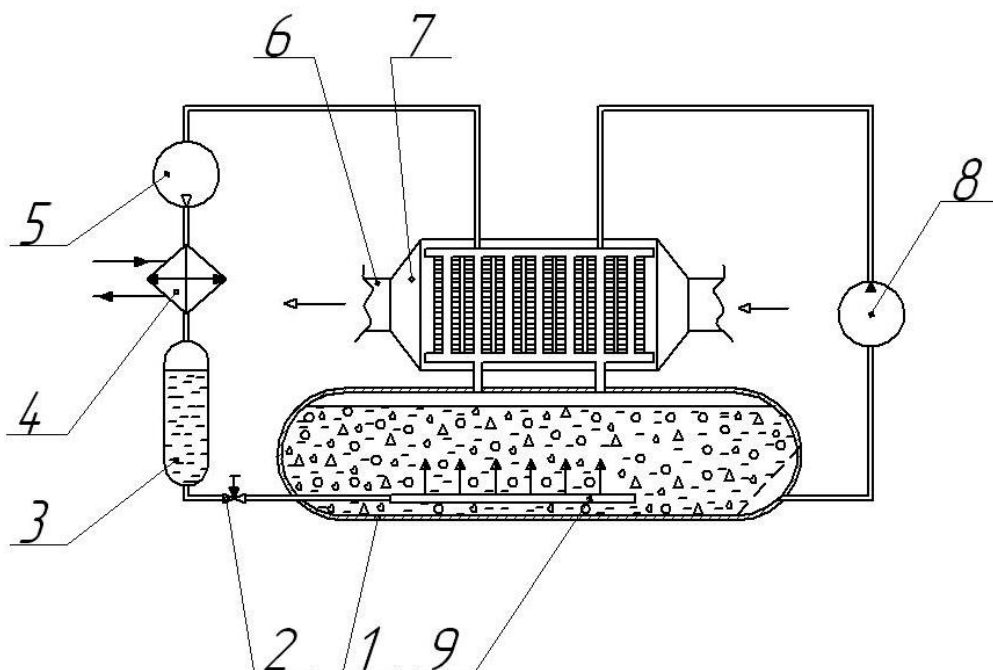


Рис. 2. Схема газогидратного аккумулятора естественного холода: 1 – емкость; 2 – регулирующий вентиль; 3 – ресивер жидкого гидратообразователя; 4 – конденсатор; 5 – компрессор; 6 – воздуховод; 7 – воздухоохладитель; 8 – насос; 9 – распределитель гидратообразователя.

верхностный воздухоохладитель 7, в трубки которого через верхний коллектор из емкости 1 насосом 8 подается вода. Она охлаждается или подогревается в межтрубном пространстве наружным или рециркулирующим

воздухом. В конструкцию аккумулятора включен контур циркуляции гидратообразователя, состоящий из компрессора 5, конденсатора 4, ресивера 3 и регулирующего вентиля 2. С его помощью поддерживают необходимые тем-

пературы образования и плавления гидратов, что способствует расширению температурного диапазона работы аккумулятора.

В режиме зарядки гидратообразователь подается в емкость 1 из ресивера 3 через регулирующий вентиль 2 в виде парожидкостной смеси. Часть жидкого гидратообразователя при контакте с водой образует газогидраты непосредственно в емкости 1, а часть, переходящая в газообразное состояние – в воздухоохладителе 7 при контакте с охлажденной водой, стекающей в виде пленки во внутренней поверхности его трубок. Рабочее давление в системе поддерживается с помощью электроконтактного регулирующего манометра.

Термодинамическую ценность холодного наружного воздуха целесообразно, согласно второму закону термодинамики, устанавливать по значению его эксергии [10]. Эксергию, определяемую суточными колебаниями температуры воздуха, с достаточной степенью точности можно вычислить, принимая в качестве температуры окружающей среды и источника холода соответственно среднеинтегральные температуры в холодный и теплый периоды суток. Границей между этими периодами может служить среднесуточная температура воздуха для данной местности. Тогда удельная эксергия воздуха, используемая для охлаждения, согласно [11], равна:

$$e_{x.B} = i'_1 - i_0 - T_0 (s_1 - s_2) \approx c_p \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right), \quad (1)$$

где $i_1, i_0, s_1, s_0, T_1, T_0$ – энтальпия, энтропия и среднеинтегральная температура наружного воздуха соответственно в холодный и теплый периоды суток;

c_p – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К).

Термодинамическую эффективность хранилища с газогидратным аккумулятором естественного холода и без него сравнивали по значению эксергетического КПД [11]:

$$\eta_{Bx} = E_{\text{пол}} / E_{\text{зат}} \quad (2)$$

где $E_{\text{пол}}, E_{\text{зат}}$ – полезно используемая и затраченная эксергия, кДж.

В режиме охлаждения под $E_{\text{пол}}$ будем понимать эксергию охлаждаемой продукции:

$$E_{\text{П1}} = M_{\text{пр}} [i'_1 - i'_2 - T_0 (s'_1 - s'_2)], \quad (3)$$

где $M_{\text{пр}}$ – масса продукции, кг;

i'_1, i'_2, s'_1, s'_2 – соответственно энтальпия, кДж/кг, и энтропия, кДж/(кг·К), продукции при начальных и конечных параметрах.

Полезная эксергия в случае охлаждения овощей ночью и локализации внешних теплопритоков днем:

$$E_{\text{П2}} = E_{\text{П1}} + E_{\text{л}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{л}}$ – эксергия холодного наружного воздуха, необходимая для локализации теплопритоков, кДж,

$$E_{\text{л}} = Q_{\text{вн}} / (c_p \Delta T_{\text{П}}) c_p [T_{\text{П1}} - T_{\text{П2}} - T_0 \ln(T_{\text{П1}} / T_{\text{П2}})], \quad (5)$$

где $Q_{\text{вн}}$ – внешние теплопритоки через ограждающие конструкции, кДж;

$$Q_{\text{вн}} = \varepsilon_{\text{вн}} \cdot Q_{\text{дых}}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{вн}}$ – коэффициент внешних теплопритоков,

$$\varepsilon_{\text{вн}} = Q_{\text{вн}} / Q_{\text{дых}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{дых}}$ – теплота дыхания продукции, кДж; $\Delta T_{\text{П}}$ – подогрев воздуха в воздушной прослойке; $T_{\text{П1}}, T_{\text{П2}}$ – температура воздуха на входе и выходе воздушной прослойки, К.

Эксергия, затраченная на активное вентилирование, $E_{\text{З1}}$ численно равна сумме работы вентилятора и эксергии холодного воздуха, рассчитанной с учетом формулы (1):

$$E_{\text{З1}} = L_{\text{а.в}} + E_{\text{х.в}} = \frac{[M_{\text{пр}} (i'_2 - i'_1) + Q_{\text{дых}} + Q_{\text{вн}}]}{c_p \Delta T_{\text{П}}} \times \left[\frac{\Delta p_{\text{а.в}} \cdot 10^{-3}}{\rho_{\text{в}} \eta_{\text{а.в}}} + c_p \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) \right], \quad (8)$$

где $L_{a.v}$ – работа вентилятора при активном вентилировании продукции в режиме охлаждения, кДж;

$E_{x.v}$ – эксергия холодного наружного воздуха, кДж;

ΔT_{Π} – подогрев воздуха в насыпи продукции;

$\Delta p_{a.v}$ – расчетное давление, создаваемое вентилятором в системе активного вентилирования, Па;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³;

$\eta_{a.v}$ – КПД вентилятора при активном вентилировании.

При использовании аккумулятора затраченная эксергия:

$$E_{32} = E''_{31} + E_{зар} + E_{раз}, \quad (9)$$

где E''_{31} – затраченная эксергия при активном вентилировании без учета $Q_{вн}$, кДж;

$E_{зар}$, $E_{раз}$ – затраченная эксергия при зарядке и разрядке аккумулятора, кДж.

С учетом (8) выражение (9) примет вид:

$$E_{32} = \frac{[M_{пр} (i'_2 - i'_1) + Q_{дых}] \left[\frac{\Delta p_{a.v} \cdot 10^{-3}}{\rho_v \eta_{a.v}} + c_p \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) \right] + \frac{Q_{вн}}{c_p} \left[\frac{\Delta p_{a.v} \cdot 10^{-3}}{\Delta T_{ак} \rho_v \eta_{зар}} + \frac{c_p}{\Delta T_{ак}} \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) + \frac{\Delta p_{раз} \cdot 10^{-3}}{\Delta T_{\Pi} \rho_v \eta_{раз}} \right], \quad (10)$$

где $\Delta p_{зар}$, $\Delta p_{раз}$ – расчетные давления, создаваемые вентилятором при зарядке и разрядке аккумулятора, Па;

$\Delta T_{ак}$ – подогрев наружного воздуха в аккумуляторе в процессе зарядки;

$\eta_{зар}$, $\eta_{раз}$ – КПД вентилятора при зарядке и разрядке аккумулятора.

Сравнительные расчеты по формулам (2) – (10) проводили для предложенной конструкции хранилища (рис. 1) и традиционного секционного картофелехранилища [5]. Эффективность теплозащитных свойств ограждающих конструкций определяли коэффициентом внеш-

них теплопритоков $\epsilon_{вн}$, который в реальных условиях может колебаться в пределах от 0,1 до 2 [5]. Теплофизические свойства картофеля взяты из [5], темп охлаждения принимали равным 1 °С/сут, массу картофеля для упрощения проведения сопоставительного анализа принимали в расчетах $M_{пр} = 1000$ кг.

Исходные данные для системы воздухораспределения: $\Delta p_{a.v} = 400$ Па, $\Delta p_{зар} = 100$ Па, $\Delta p_{раз} = 300$ Па; $\eta_{a.v} = \eta_{зар} = \eta_{раз} = 0,85$; $T_0 = T_{пр} + 5$; $T_1 = T_{пр} - 5$; $\Delta T_{\Pi} = 2$ К; $\Delta T_{н} = 2$ К; $\Delta T_{ак} = 4$ К.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Как видно (рис. 3, а) величина $E_{пол}$ практически неизменна для традиционных систем активного вентилирования, использующих наружный воздух только для охлаждения продукции в холодный период суток. В то же время применение в системе аккумулятора естественного холода позволяет использовать эксергию холодного воздуха и в теплое время суток. При этом значение $E_{пол}$ для систем с аккумулятором с ростом температуры продукции $t_{пр}$ и коэффициента $\epsilon_{вн}$ увеличиваются, превышая значение $E_{пол}$ для обычных систем в 1,1...1,5 раза.

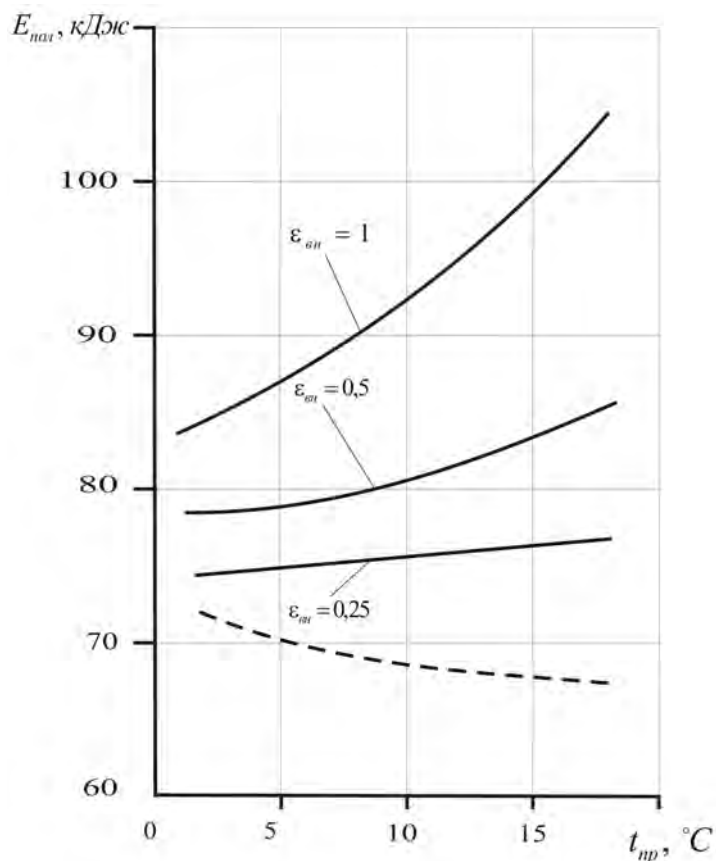
Локализация теплопритоков с помощью аккумулятора и динамической теплоизоляции позволяет снизить затраты эксергии $E_{зат}$ на охлаждение продукции в системе активного вентилирования на 10...30 % (рис. 3, б).

Результаты расчетов показали (рис. 3, в), что η_{ex} системы активного вентилирования с газогидратным хладоаккумулятором больше в 1,2...1,8 раза η_{ex} системы без аккумулятора.

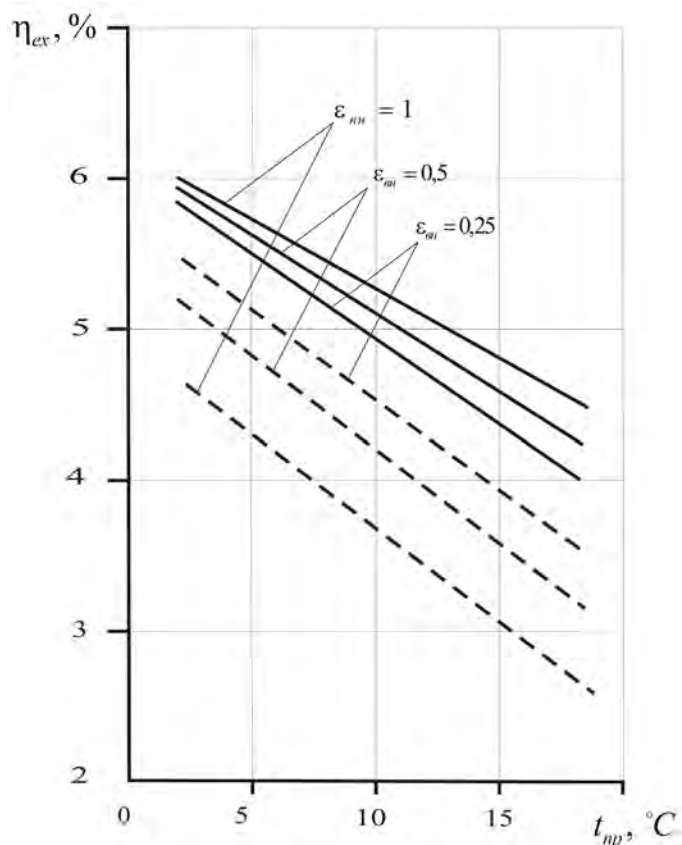
Выводы

Предложена методика термодинамического анализа плодоовощехранилища с системой активного вентилирования и газогидратным аккумулятором естественного холода.

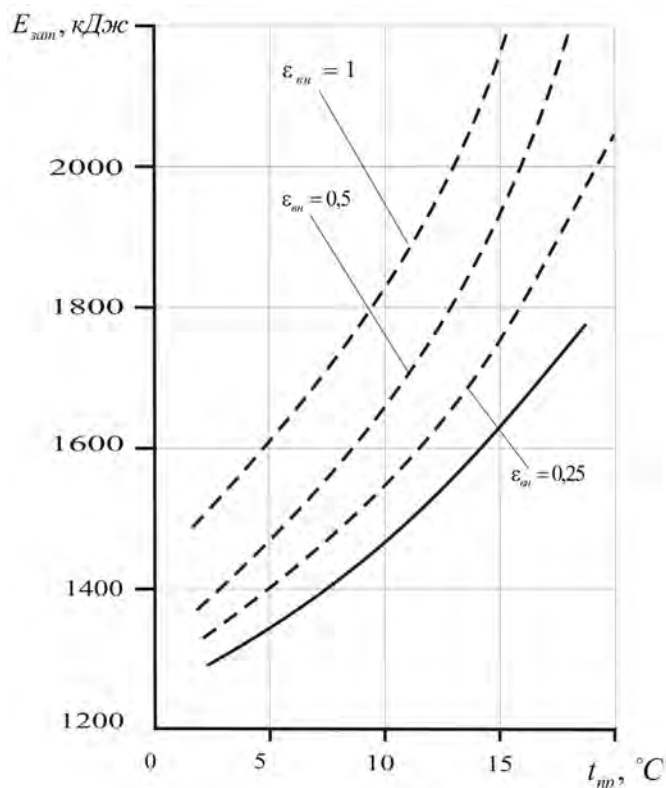
Выполненный сравнительный термодинамический анализ на основе эксергетического метода показал, что использование газогидратного аккумулятора естественного холода для локализации теплопритоков позволяет снизить энергозатраты на охлаждение продукции в си-



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость полезно используемой эксергии $E_{пол}$ (а), эксергии $E_{зат}$ (б), затраченной на активное вентилирование 1 т картофеля в течение суток и эксергетического КПД η_{ex} (в) системы охлаждения хранилища от внешних теплопритоков $\varepsilon_{вн}$ и температуры картофеля $t_{пр}$: — система охлаждения с аккумулятором, - - - система охлаждения без аккумулятора.

стеме активного вентилирования на 10...30 % и повысить эксергетический к.п.д. в 1,2...1,8 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жадан В.З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях / В.З. Жадан. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 238 с.
2. Жадан В.З. Влагообмен в плодоовощехранилищах / В.З. Жадан. – М.: Агропромиздат, 1985. – 197 с.

3. *Клименко В.В.* Рациональное использование термической неравновесности наружного воздуха / В.В. Клименко, В.Н. Корниенко // Холодильная техника – 1989.– № 6. – С. 24-27.

4. *Жадан В.З.* Критерий климатического районирования страны в целях использования естественного холода в картофеле- и овощехранилищах / В.З. Жадан, Н.Н. Рослов, Л.В. Мартынова, С.И. Кулаков // Холодильная техника. – 1986.– № 6. – С. 16-21.

5. *Рослов Н.Н.* Комплексы для хранения картофеля и овощей / Н.Н. Рослов. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 207 с.

6. *А. с. 1227132 СССР*, МКИЗ С27 J 25/00. Устройство для хранения растительной продукции / В.В. Клименко, В.И. Ивахнов, В.Н. Корниенко. (СССР). – № 36309721/27-03; заявл. 10. 07. 84; опубл. 01.06. 86, Бюл. № 13.

7. *Клименко В.В.* Газгидратные аккумуляторы холода / В.В. Клименко, В.Н. Корниенко // Холодильная техника. – 1989. – № 1. – С. 14-17.

8. *А. с. 1784807 СССР*, МКИЗ В26 J 25/00. Аккумулятор холода / В.В. Клименко, Ю.И. Демьяненко. (СССР). – № 36390959/25-06; заявл. 25. 12. 91; опубл. 16.03.92, Бюл. № 48.

9. *Клименко В.В.* Газогидратные аккумуляторы природного холода в системах активного вентилирования плодоовощехранилищ / В.В. Клименко, А.В. Скрипник, В.Н. Корниенко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 2. – С. 16-19.

10. *Мартыновский В.С.* Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / Под редакцией В.М. Бродянского. – М.: Энергия, 1979. – 288 с.

11. *Бродянский В.М.* Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Микален. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 275 с.

Получено 14.02.2012 г.