

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПРИ СУШКЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ

Игорь Вячеславович Лакомов
Юрий Михайлович Помогаев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Выполнена аналитическая оценка энергетической эффективности преобразования энергии в пароконпрессионных установках с тепловым насосом. Показано, что применение низкотемпературной сушки в технологии переработки сельскохозяйственного сырья в последнее время получило широкое распространение. Использование в качестве источника кондиционированного воздуха холодильных машин, работающих в режиме теплового насоса, позволяет обезвоживать сельскохозяйственное сырье за счет паровлажностного потенциала сушки при температуре воздуха, равной температуре окружающей среды. Это позволяет сохранить природные качества продукта, которые могут быть утрачены в процессе традиционного обезвоживания, при этом продолжительность сушки существенно возрастает. Представлены результаты исследования некоторых аспектов энергетической эффективности процесса сушки сельскохозяйственного сырья с применением тепловых насосов, в ходе проведения которого изучено воздействие на энергетическую эффективность работы теплонасосной установки следующих параметров: теплоемкости, расхода и коэффициентов теплоотдачи источника тепла, в качестве которого применяется отработанный в сушильной камере воздух, а также температуры кипения и конденсации хладагента. Обоснована взаимосвязь технических параметров компрессора, в частности коэффициента преобразования тепла с индикаторными потерями для реальных условий работы теплового насоса в низкотемпературной сушилке. Рассмотрены диаграммы потоков энергии в различных конструкциях и схемах теплонасосных сушильных установок, подтверждающие эффективность применения тепловых насосов. Приведены аналитические и полуэмпирические зависимости коэффициента преобразования идеального и реального тепловых насосов. Сделан вывод, что оптимальное значение теплового коэффициента протяжении всего процесса сушки достигается путем изменения режима работы теплового насоса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сушка, энергетическая эффективность, тепловой насос, кипение, конденсация, холодопроизводительность, коэффициент преобразования.

ENERGY EFFICIENCY OF HEAT PUMPS IN THE DRYING OF AGRICULTURAL RAW MATERIALS

Igor V. Lakomov
Yuriy M. Pomogaev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The authors have performed an analytical evaluation of efficiency of energy conversion in vapor compression systems with a heat pump. It is shown that low-temperature drying in the technology of processing of agricultural raw materials has recently become widespread. The use of refrigerating machines operating in the heat pump mode as a source of conditioned air allows dehydrating the agricultural raw materials due to the wet-steam potential of drying at ambient temperature. This helps to preserve the natural qualities of the product that could be lost in the process of conventional dehydration, but the drying time increases significantly. The authors present the results of studying some aspects of energy efficiency of drying the agricultural raw materials using heat pumps. In the course of this research the authors have studied the energy efficiency of heat pump operation under the influence of such parameters as heat capacity, heat consumption and heat transmission coefficient of the heat source (which is represented by exhaust air from the drying chamber), and boiling point and condensing temperature of the refrigerant. The authors have proved the relationship between the technical parameters of the compressor, particularly the heat conversion coefficient and indicative losses in real conditions of heat pump operation in a low-temperature dryer. The authors have also considered the energy flow diagrams in heat-pump dryers with different designs and schemes confirming the efficiency of using heat pumps. Analytical and semiempirical dependences of the heat conversion coefficient for an ideal and real heat pumps have been reported. It is concluded that the optimal value of heat coefficient within the whole process of drying can be achieved by changing the mode of operation of the heat pump.

KEY WORDS: drying, energy efficiency, heat pump, boiling, condensation, refrigeration capacity, conversion coefficient.

Для теплового насоса, который является источником тепла низкого температурного потенциала в низкотемпературной сушилке, обычно применяют атмосферный или отработанный (подогретый) в сушилке воздух, сбрасываемую (теплую) технологическую воду или дымовые газы котлов и печей [2].

Наиболее важными характеристиками источника тепла низкотемпературных теплонасосных сушилок являются теплоемкость, разница температур, расход источника тепла, значения коэффициентов теплопередачи.

Величина температуры кипения хладагента $T_{0,i}$ в цикле теплового насоса влияет на применение того или иного рабочего тела в качестве источника тепла низкотемпературного потенциала. Величина температуры конденсации хладагента $T_{к,i}$ зависит от требуемых значений температуры рабочего тела высокотемпературного потенциала T_2 . Наиболее эффективными циклами парокомпрессионного теплового насоса являются циклы с сильно выраженным снижением температуры жидкого холодильного агента после конденсации T_u , что позволяет существенно уменьшить разницу между температурой конденсации и температурой окружающей среды $T_{o.c.}$. Благодаря этому возрастет интенсивность теплоотдачи в охладителе, массовая холодопроизводительность q_0 и значительно снижаются потери от дросселирования $\lambda_{др}$.

Некоторые дополнительные затраты мощности $N_{км}$ возникают в цикле из-за необратимости потерь, с другой стороны, при этом увеличивается Q_k (рис. 1), что требует определения величины взаимосвязи преобразования энергии [1, 4].

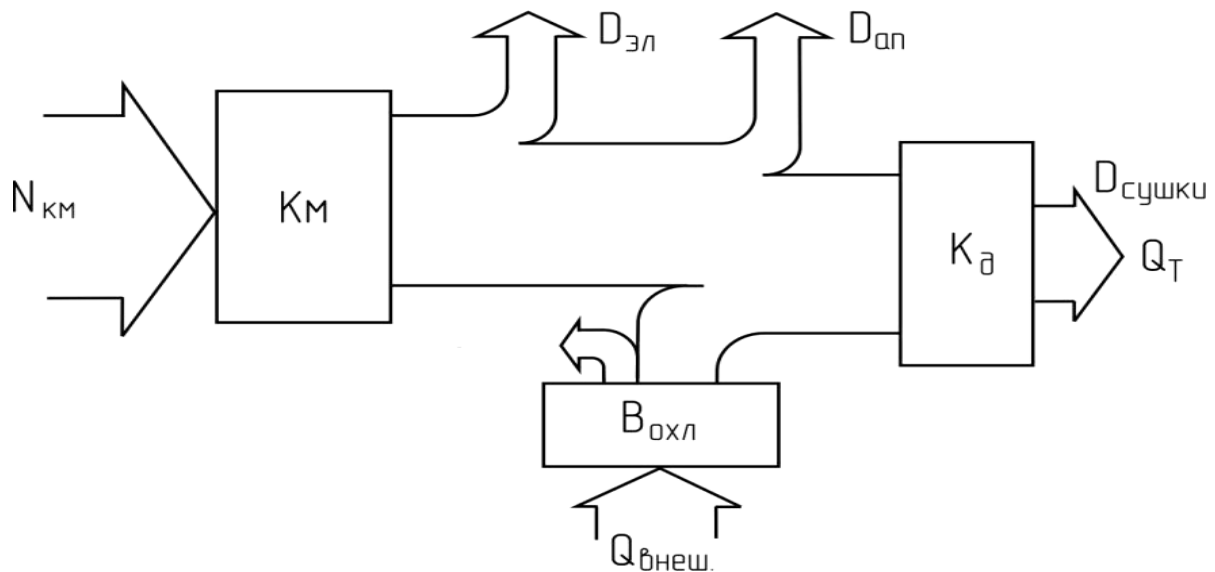


Рис. 1. Диаграмма потоков энергии для теплонасосной установки

При условии перехода индикаторных потерь в компрессоре в тепло и получении их холодильным агентом влияние на энергетическую эффективность данных потерь учитывается коэффициентом преобразования μ_∂ [9]

$$\mu_\partial = \left[\mu + \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) \right] \eta_u \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{эл}, \quad (1)$$

где η_u – индикаторный коэффициент полезного действия;

$\eta_{мех}$ – механический коэффициент полезного действия;

$\eta_{эл}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Для реальной эксплуатации тепловых насосов выражение (1) можно представить как полуэмпирическую зависимость

$$\mu_{\partial} = \frac{0,74T_0}{(T_k - T_0)} - \left(0,0032T_0 + 0,765 \frac{T_0}{T_k} \right) + 0,9. \quad (2)$$

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента преобразования $\mu_{\partial} = f(T_k, T_0)$ для реальных условий работы теплового насоса в низкотемпературной сушилке.

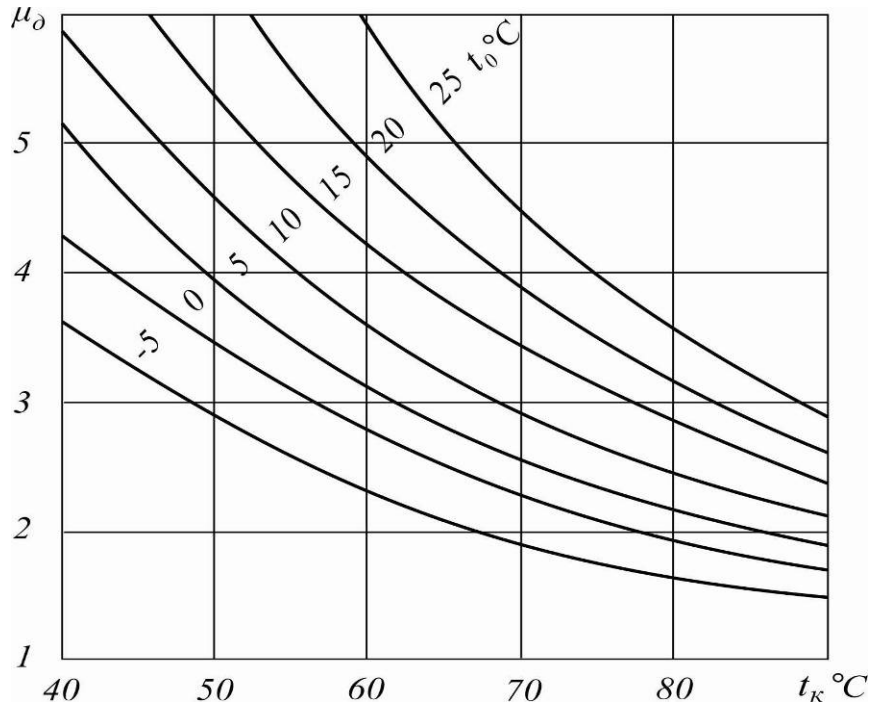


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования реального теплового насоса μ_{∂} от различных температур кипения t_0 и конденсации t_k источника тепла

Если схема сушилки предусматривает замкнутый контур рециркуляции отработанного рабочего тела и применение для сушки продукта подготовленного (кондиционированного) осушенного воздуха, в воздухоохладителе утилизируется теплота конденсации водяного пара и происходит охлаждение воздуха (рис. 3) [8].

Данные мероприятия приводят к росту эффективности теплового насоса и снижению потребления энергии на килограмм испаренной влаги [6].

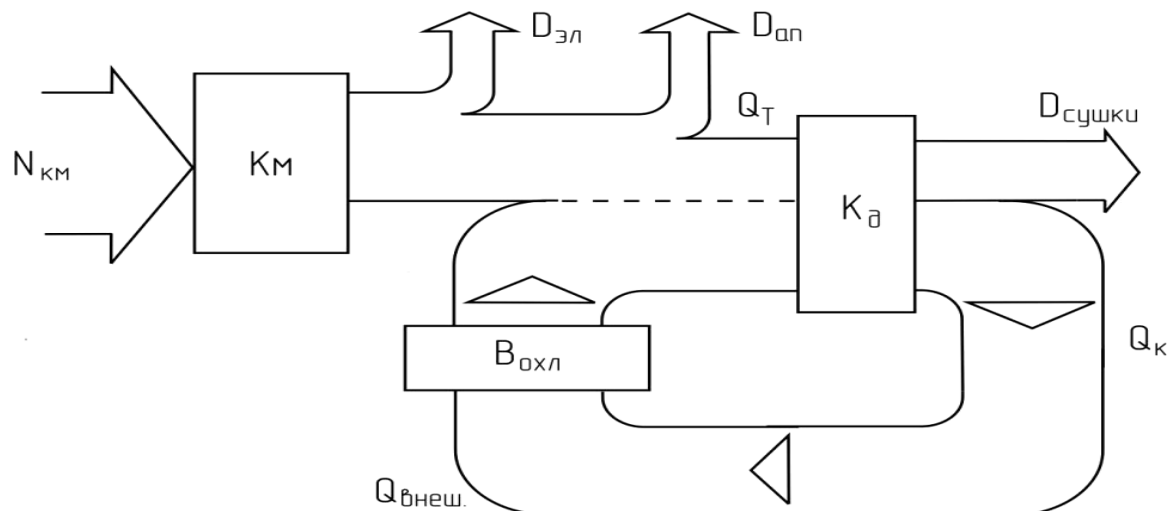


Рис. 3. Диаграмма потоков энергии для схемы теплового насоса с замкнутым контуром рециркуляции отработанного рабочего тела

Зависимости, приведенные на рисунке 4, позволяют сделать вывод, что замена прямоточной схемы (рис. 1) на схему с рециркуляцией воздуха через воздухоохладитель теплового насоса при температуре воздуха $t_{\text{воз.}} = 0^\circ\text{C}$, его относительной влажности $\varphi_{\text{воз.2}} = 100\%$ и температуре воздуха на выходе из сушилки $t_{\text{н2}} = 50^\circ\text{C}$ позволяет снизить энергопотребление в 3,5-5,0 раза [7, 10].

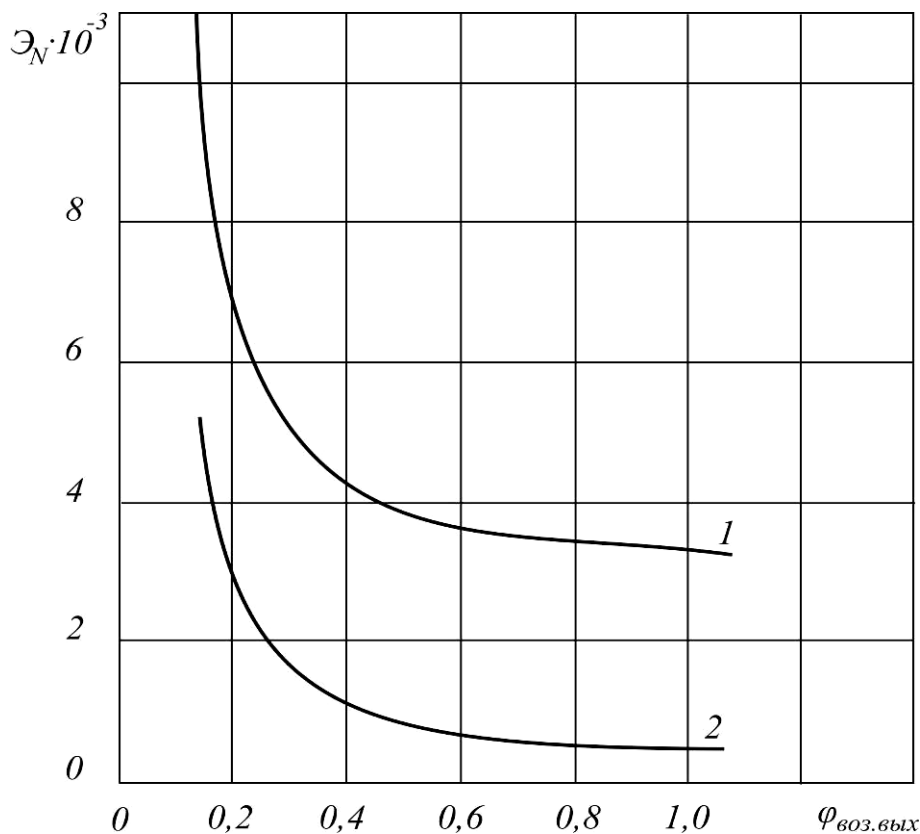


Рис. 4. Зависимость потребления энергии теплового насоса от относительной влажности воздуха на выходе из сушилки: 1 – схема без рециркуляции воздуха; 2 – схема с рециркуляцией воздуха

Уменьшая температуру конденсации T_k (за счет переменных режимов сушки, как правило, второго периода сушки) и увеличивая температуру кипения T_0 (за счет отвода основного количества влаги из сырья, что присуще первому периоду сушки), можно одновременно увеличить тепловой коэффициент μ_0 и уменьшить разность температур кипения и конденсации ($T_k - T_0$) [3, 5].

Вывод: изменяя режимы работы теплового насоса, можно достичь оптимальное значение теплового коэффициента μ_0 на протяжении всего процесса сушки,.

Библиографический список

1. Везиришвили О.Ш. Выбор оптимальных мощностей ТНУ и область их эффективного применения / О.Ш. Везиришвили // Теплоэнергетика. – 1982. – № 4. – С. 47–50.
2. Везиришвили О.Ш. Тепловые насосы и экономия топливно-энергетических ресурсов / О.Ш. Везиришвили // Изв. вузов. Энергетика. – 1984. – № 7. – С. 61–65.
3. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов : учебник для вузов / А.С. Гинзбург. – Москва : Энергия, 1973. – 528 с.
4. Гоголин А.А. Осушение воздуха холодильными машинами : учебник для вузов / А.А. Гоголин. – Москва : Госторгиздат, 1966. – 104 с.
5. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов : монография / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 215 с.
6. Ионов А.Г. Теплонасосная установка для вяления рыбы / А.Г. Ионов, А.Э. Суслов // Холодильная техника. – 1986. – № 9. – С. 24–27.
7. Кретов И.Т. Программно-логические функции системы управления теплонасосной сушильной установкой / И.Т. Кретов, А.А. Шевцов, И.В. Лакомов // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1998. – № 4. – С. 69–72.
8. Лакомов И.В. Применение теплового насоса в различных схемах сушильных установок / И.В. Лакомов, Ю.М. Помогаев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – Вып. 2 (49). – С. 130–135.
9. Шаззо Р.И. Низкотемпературная сушка пищевых продуктов в кондиционированном воздухе : монография / Р.И. Шаззо, В.М. Шляховецкий. – Москва : Колос, 1994. – 119 с.
10. Янтовский Е.И. Парокомпрессионные теплонасосные установки : монография / Е.И. Янтовский, Ю.В. Пустовалов. – Москва : Госэнергоиздат, 1982. – 144 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Игорь Вячеславович Лакомов – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматизации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Юрий Михайлович Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматизации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 12.12.2016

Дата принятия к печати 26.01.2017

AUTHORCREDENTIALS Affiliations

Igor V. Lakomov – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 224-39-39, E-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Yuriy M. Pomogaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 224-39-39, E-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Date of receipt 12.12.2016

Date of admittance 26.01.2017