

---

## **ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ**

---

**Игорь Вячеславович Лакомов**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры электрификации сельского хозяйства  
**Юрий Михайлович Помогаев**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры электрификации сельского хозяйства

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.70

Целью исследования является анализ различных способов утилизации и рекуперации теплоты отработанного сушильного агента или тепла готового продукта для процесса удаления влаги. Объект исследования – теплонасосная сушильная установка. В данной работе ставится задача изучения вопросов экономии энергоресурсов в области переработки пищевого сырья, в частности сушки различных продуктов. Отмечаются важность утилизации и вторичного использования теплоносителя, а также возникающие при этом трудности. На основании термодинамического анализа показано увеличение термического КПД в процессе утилизации сушильного агента. Рассматриваются различные способы повышения эффективности сушки путем применения различных аппаратных решений, имеющих свои недостатки и достоинства. Наибольший эффект от использования схемы рециркуляции тепла с применением промежуточного теплоносителя можно получить при сушке материалов с высокой влажностью и при наличии отработанного сушильного агента с высокой температурой. Сушку материалов с низким содержанием влаги эффективней применять, используя физическую теплоту высушенного продукта в рекуперативных теплообменных аппаратах. Большие возможности рекуперации тепла имеют сушилки с полностью замкнутым циклом сушильного агента. Показывается важность применения рекуперации низкопотенциального тепла агента в сушилках. Рассматривается способ сушки с применением тепловых насосов, позволяющих использовать тепло низкотемпературных источников, существенно повысить термический коэффициент сушки и, кроме того, перерабатывать термолабильные продукты. Описаны схема сушильной установки с тепловым насосом и рекуперацией тепла, а также происходящие в ней термодинамические процессы. Рассчитан коэффициент энергетической эффективности сушильной установки с тепловым насосом. Представлены основные направления сушки с эффективным использованием тепловой энергии и сделаны выводы об экономической эффективности применения предложенных способов энергосбережения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сушка, тепловая эффективность, переработка, восстановление, тепловой насос, энергоэффективность, энергосбережение.

The objective of this study was to analyze the different ways of utilization and recuperation of heat of a used drying agent or heat of a finished product for the process of moisture elimination. The object of the study was a heat pump dryer. In this work the task was to examine the issues of saving energy in the sphere of food raw material processing, particularly when drying different products. The authors stress the importance of recycling and reuse of heat transfer medium as well as the difficulties connected with it. Using the data of thermodynamic analysis the authors illustrated an increase in thermal efficiency during recycling of the drying agent; considered different ways of improving the efficiency of drying by the use of various hardware solutions with their advantages and disadvantages. The greatest effect of a heat recirculation scheme with an intermediate heat carrier can be achieved in the process of drying the materials with high humidity and at the presence of a spent drying agent with high temperature. Drying of materials with low moisture contents is more effective with the use of physical heat of the dried product in recuperative heat exchangers. Dryers with a fully closed cycle of the drying agent have great possibilities of heat recovery. The authors have shown the importance of using low-grade heat recovery agents in dryers; considered the way of drying using heat pumps that allow the use of low-temperature heat sources and significantly increase the thermal coefficient of drying in addition to processing of thermolabile products; described a scheme of a dryer with a heat pump and heat recovery as well as thermodynamic processes inside it; determined energy efficiency coefficient of a heat pump dryer was provided, and also presented the main ways of drying with the effective use of thermal energy with the conclusions about the economic efficiency of utilizing the proposed energy-saving methods.

**KEY WORDS:** drying, thermal efficiency, recycling, recovery, heat pump, energy efficiency, energy saving.

## Введение

В настоящее время в мировой экономике возрастает потребление энергии, с одной стороны, и уменьшаются мировые запасы топливных ресурсов, с другой стороны. В этой связи вполне обоснованно возникают задачи эффективного применения энергии, ее повторного использования в основных процессах переработки сельскохозяйственного сырья, в том числе сушке [9].

Потенциал теплоносителя при конвективной сушке используется не полностью, при этом повторное использование тепла отработанного агента сушки имеет определенные трудности, так как потенциал теплоносителя на выходе из сушилки достаточно мал. В связи с этим представляется перспективным исследование различных вариантов утилизации и рекуперации тепла отработанного сушильного агента, скрытой теплоты высушенного продукта, используемых в процессе сушки [2, 9].

Целью исследования является анализ различных способов утилизации и рекуперации теплоты отработанного сушильного агента и высушенного продукта, используемых в процессе сушки.

Объект исследования – теплонасосная сушильная установка.

При конвективной сушке дисперсионных материалов наиболее известны следующие способы рекуперации: утилизацией физического тепла отработанного сушильного агента за счет их частичной рециркуляции; утилизацией физического тепла отработанного сушильного агента, используя промежуточный теплоноситель; утилизацией физического тепла высушенного продукта при непосредственном контакте с ним исходного сушильного агента [1, 3].

Степень использования тепла сушильного агента характеризуется термическим коэффициентом полезного действия и выражается отношением тепла  $Q_d$ , отданного сушильным агентом высушиваемому материалу (тепло десорбции), к теплу  $Q_{кл}$ , затраченному в теплообменнике на нагрев сушильного агента (тепло калорифера) [4]. Тогда, применяя термодинамический анализ для предложенных способов сушки с рекуперацией тепла, термический КПД процесса можно представить приближенным равенством

$$\eta_i = (t_0 - t_k) / (t_0 - t_{пр}), \quad (1)$$

где  $t_0, t_k, t_{пр}$  – температура газа соответственно перед сушилкой, после сушилки и перед калорифером, достигаемая в результате рекуперации тепла.

Из уравнения очевидно, что чем выше достигается  $t_{пр}$  по сравнению с температурой газа на входе, тем выше термический КПД процесса.

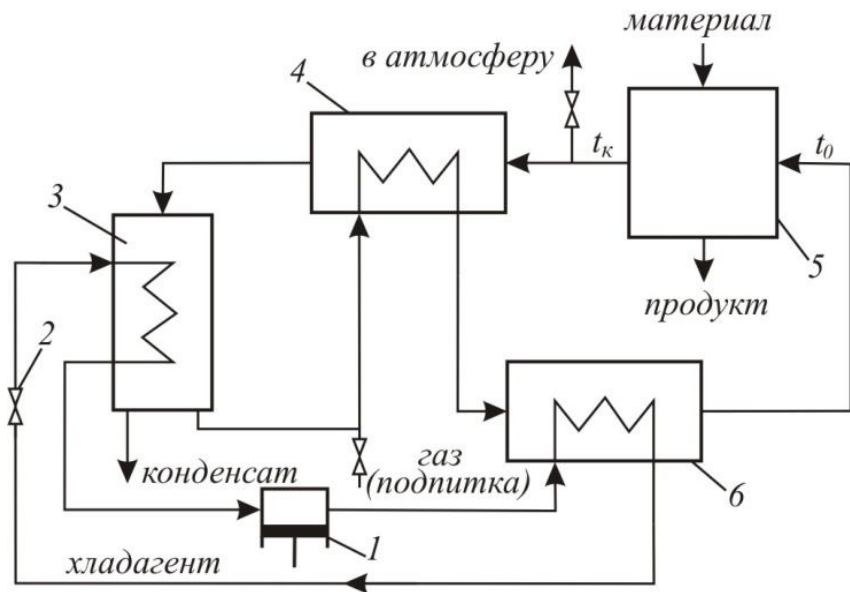
При рекуперации тепла частичной рециркуляцией сушильного агента не требуется больших материальных затрат, при этом получаются хорошие результаты при сушке термолabileльных материалов.

Повторное использование тепла с применением промежуточного теплоносителя дает наибольший эффект при сушке продуктов с высоким содержанием влаги и высокой температуре сушильного агента на выходе [5].

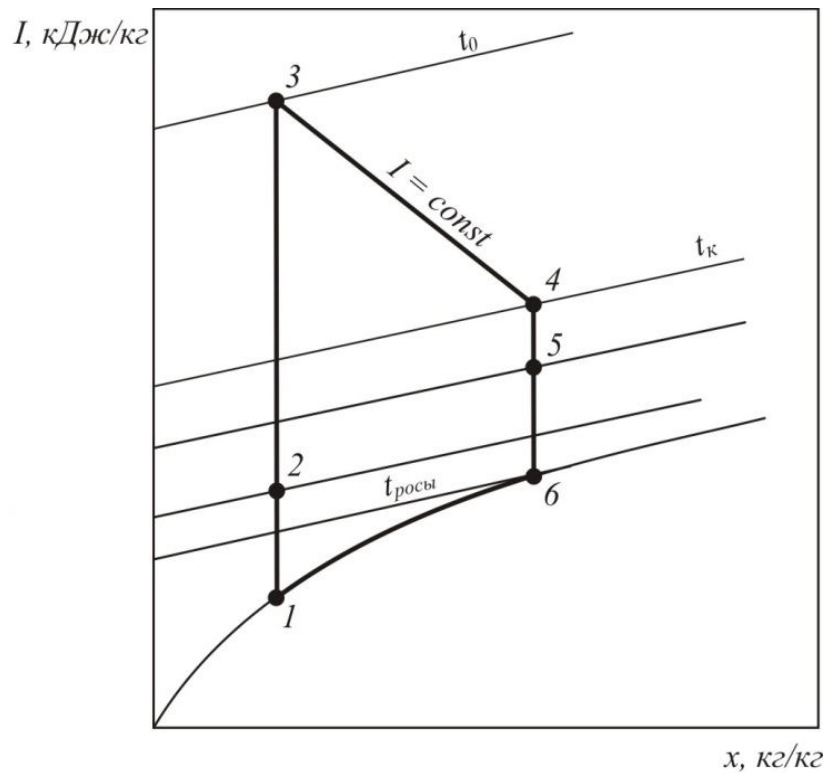
Способ сушки с использованием физического тепла высушенного продукта, как правило, применяют для обезвоживания продуктов с низким содержанием влаги, в этом случае основная часть подводимого тепла расходуется на нагрев высушиваемого сырья.

Хорошие результаты в плане рекуперации тепла позволяют получить сушилки с полностью замкнутым циклом сушильного агента.

Повысить энергетическую эффективность сушильных установок позволяет применение тепловых труб для утилизации теплоты отработанного теплоносителя [7]. Этот способ аналогичен способу с промежуточным жидким теплоносителем, но при этом имеет более высокий КПД, меньшие размеры и применяется в большем диапазоне температур сушильного агента за счет применения низкокипящих и высококипящих теплоносителей.



а)



б)

**Сушильная установка с тепловым насосом:**

- а) – принципиальная схема: 1 – компрессор; 2 – регулирующий вентиль; 3 – испаритель холодильного агента; 4 – теплообменник-рекуператор; 5 – сушилка; 6 – конденсатор хладагента;

- б) – термодинамическое изображение процессов на диаграмме I-x:  
 1-2 – предварительный нагрев воздуха в теплообменнике-рекуператоре;  
 2-3 – основной нагрев воздуха в конденсаторе;  
 3-4 – процесс сушки в сушилке;  
 4-5 – охлаждение воздуха в теплообменнике;  
 5-6-1 – охлаждение и осушение воздуха в испарителе

Применение в качестве сушильного агента перегретого пара позволяет проводить сушильные процессы с применением рекуперации на еще более высоком уровне.

Одним из перспективных направлений в процессе обезвоживания сельскохозяйственного сырья является использование тепловых насосных установок, применение которых дает возможность поднять технологию сушки на более высокий энергетический уровень в вопросах рекуперации тепла [8].

Принципиальная схема теплонасосной сушильной установки с воздушным теплообменником-рекуператором и изображение на диаграмме влажного воздуха происходящих в ней термодинамических процессов представлены на рисунке [6].

Установки с тепловым насосом могут работать как в режиме полностью замкнутого цикла по сушильному агенту, так и с выбросом части отработанного воздуха [7]. Если в испаритель насоса поступает только наружный воздух, энергетическая эффективность теплонасосной установки немного снижается, кроме того, возникает вероятность обмораживания испарителя [3, 4].

Коэффициент энергетической эффективности теплонасосной установки больше единицы, так как обратен энергетическому КПД теплового двигателя

$$\varphi_i = Q_0/L > 1, \quad (2)$$

где  $Q_0$  – тепло сушильного агента при поступлении в сушильную камеру, Вт;

$L$  – затраченная механическая энергия, Вт.

Учитывая, что  $Q_0 = Q_k + L$ , тогда

$$\varphi_i = Q_0/(Q_0 - Q_k) = T_0/(T_0 - T_k). \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что повышение энергетической эффективности ТНУ возможно при минимальной разности температур  $T_0 - T_k$ , т.е. отработанный сушильный агент должен иметь более высокую температуру  $T_k$ .

На практике в сушильных установках с тепловым насосом сушильный агент может нагреваться до  $80^\circ\text{C}$ , повысить эту температуру позволит применение высококипящих холодильных агентов и комбинированный подвод тепла [9, 10].

### **Результаты**

На основе вышеизложенного можно сформулировать следующие принципы энергосберегающей технологии сушки:

- технологические – обезвоживание материала перед сушкой в центрифугах, применение веществ с небольшой теплотой испарения;
- кинетическое, гидродинамическое, термодинамическое соответствие;
- наиболее полное использование рабочей зоны сушилки, интенсификация;
- высокая температура сушильного агента на входе и низкая температура отработанного сушильного агента (для установок с тепловым насосом  $t_k$  как можно больше);
- замкнутый цикл сушильного агента и его рециркуляция, использование в качестве сушильного агента перегретого пара;
- использование теплоты конденсации испаряемой влаги, применение тепловых труб, тепловых насосов и др.;
- применение многозонных сушилок с промежуточным подогревом сушильного агента;
- применение поверхностей нагрева в качестве дополнительных источников тепла для высушиваемого продукта;
- осуществление нескольких технологических процессов в одном аппарате;
- соблюдение технологических нормативов эксплуатации сушильной установки, обеспечиваемое тщательным регулированием параметров.

### Вывод

Исследование и анализ процессов сушки сельскохозяйственного сырья показывают, что применение описанных способов энергосбережения позволит получить ощутимую экономию энергии и технологических материалов.

---

### Список литературы

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов : учебник для вузов / А.С. Гинзбург. – Москва : Энергия, 1973. – 528 с.
2. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности : учебник для вузов / А.С. Гинзбург. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 336 с.
3. Гоголин А.А. Осушение воздуха холодильными машинами : учебник для вузов / А.А. Гоголин. – Москва : Госторгиздат, 1966. – 104 с.
4. Головкин Н.А. Холодильная технология пищевых продуктов : учебник для вузов / Н.А. Головкин. – Москва : Агропромиздат, 1984. – 239 с.
5. Кретов И.Т. Рациональное использование тепла отработанного сушильного агента / И.Т. Кретов, А.А. Шевцов, И.В. Лакомов // Пищевая промышленность-2000 : межрегиональная науч.-практ. конф. – Казань, 1996. – С. 178-179.
6. Кретов И.Т. Сушка продуктов в замкнутом цикле по сушильному агенту / И.Т. Кретов, А.А. Шевцов, И.В. Лакомов // Передовые технологии пищевой промышленности : материалы Международной научной конференции. – Минск, 1996. – С. 25.
7. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов : учебник для вузов / В.С. Мартыновский. – Москва : Энергия, 1979. – 288 с.
8. Рей Д.М. Тепловые насосы : монография / Макмайкл Д. Рей. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 224 с.
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. Промышленные тепловые насосы : учебник для вузов / Е.И. Янтовский, Л.А. Левин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.