

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Игорь Вячеславович Лакомов
Юрий Михайлович Помогаев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Целью исследования является анализ вариантов применения тепловых насосов в установках удаления влаги (сушки) из различных сельскохозяйственных продуктов и выбор наиболее экономически эффективной сушильной установки. Объект исследования – сушильная установка, имеющая в своем составе тепловой насос (разновидность холодильной машины, работающей в определенном температурном диапазоне), используемый для кондиционирования воздуха, применяемого в качестве сушильного агента. Рассматриваются различные способы удаления влаги, в которых применяются те или иные технологические приемы обработки сушильного агента и высушиваемого материала, схемы взаимного направления участвующих в сушке потоков воздуха и продукта. Изучается энергетическая эффективность той или иной системы сушки, анализируются ее достоинства и недостатки с точки зрения поддержания оптимальных параметров и режимов процесса удаления влаги, дается технологическая оценка получаемых результатов тепло- и массообменных процессов в сушильной установке, приводится описание наиболее эффективной системы сушильной установки с рециркуляцией воздуха через тепловой насос и термодинамических процессов обработки сушильного агента (воздуха), протекающих в данной сушилке в диаграмме влажного воздуха. Показана эффективность применения тепловых насосов в сушильных установках с целью экономии энергетических ресурсов и использования бросовых источников тепла, а также проведения «мягких» режимов сушки для термолабильных продуктов. Приведены конкретные значения удельного расхода энергии; которые в существующих сушильных аппаратах достигают 4 МДж/кг, тогда как в оптимальной системе не превышают 0,55-0,81 МДж/кг. Сделан вывод об использовании различных модификаций схем низкотемпературной сушки в зависимости от конкретных условий их эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сушка, сушильный агент, тепловая эффективность, рециркуляция, тепловой насос, регенерация, энергосбережение.

USE OF HEAT PUMPS IN VARIOUS SCHEMES OF DRYERS

Igor V. Lakomov
Yuriy M. Pomogaev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I

The objective of this study was to analyze the options for using heat pumps in the systems for removing moisture (drying) of various agricultural products and to choose the most cost-efficient dryer. The object of study was a drying unit that included a heat pump (a kind of a refrigerating machine operating in a certain temperature range) used for conditioning the air, which in its turn was applied as the drying agent. The authors consider various methods for removing moisture that employ some particular processing technologies of treating the drying agent and the material to be dried, and the schemes of mutual direction of the air and product flows involved in drying. The authors also study the energy efficiency of some particular drying systems, analyze their advantages and disadvantages in terms of maintaining the optimal parameters and modes of moisture removal process, give technological evaluation of the results of heat and mass transfer processes in the drying unit, and describe the most effective system of a dryer with air recirculation through the heat pump and thermodynamic processes of treating the drying agent (the air) occurring in the given dryer in the humid air diagram. It was shown that heat pumps can be efficiently used in the drying units in order to save the energy resources, introduce idle heat sources and exercise «soft» modes of drying for heat-sensitive products. The concrete values of specific energy consumption are listed, which reach 4 MJ/kg in the existing dryers, whereas in the optimal system they do not exceed 0.55-0.81 MJ/kg. It was concluded that it is reasonable to use various modifications of low-temperature drying schemes depending on the specific conditions of operation.

KEY WORDS: drying, drying agent, thermal efficiency, recirculation, heat pump, regeneration, energy saving.

Обезвоживание различных продуктов проводят с помощью конвективной сушки в сушильных установках периодического действия, в этом случае продукт загружается в сушильную камеру и находится в ней постоянно всё время сушки. Также этот процесс может осуществляться в сушильных установках непрерывного действия, в которые продукт постоянно загружается, проходит через сушильную камеру и всё время удаляется из неё в высушенном виде [3].

Целью исследования является анализ различных схем сушильных установок с применением теплового насоса, анализ достоинств и недостатков, выбор наиболее энергетически эффективной схемы сушки. Объект исследования – теплонасосная сушильная установка [1, 7, 10].

Влажный воздух после сушки с температурой от 28 до 72°C непрерывно отводится из сушильной камеры *СК*, при этом теплота, затраченная на удаление влаги, теряется вместе с воздухом. Как правило, утилизацию этой теплоты осуществляют или частичной рециркуляцией воздуха, или применением регенеративного теплообменника *ТР_к*, служащего для передачи тепла поступающему воздуху от насадки, которая ранее была нагрета воздухом, покидающим сушилку (рис. 1).

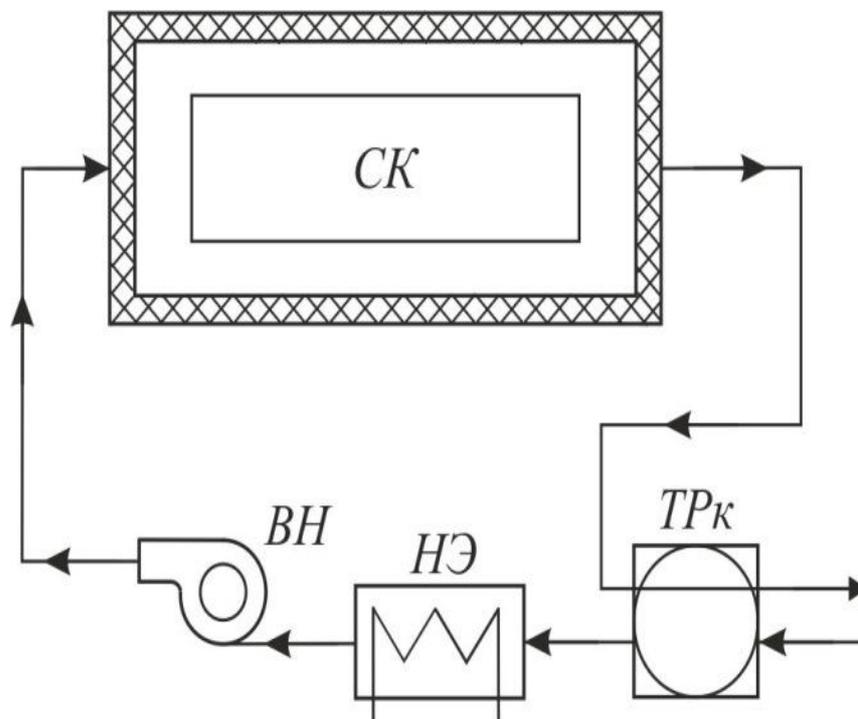


Рис. 1. Схема сушильной установки с теплообменником-регенератором

Применение рециркуляционных схем с регенерацией позволяет осуществлять низкотемпературную сушку непищевых продуктов, например, древесину, керамику, полимерные изделия и т. д. [6]. Использование таких схем не может в полной мере обеспечить технологию так называемых «мягких» режимов сушки, в которых постоянно контролируется и проводится регулировка температуры и относительной влажности сушильного агента в сушильной камере в течение всего расчетного времени процесса. Только применение тепловых насосов позволяет осуществлять эти режимы в полной мере [4, 9].

Схему сушилки называют прямоточной в случае подачи наружного воздуха центробежным вентилятором *ВН* в нагреватель-конденсатор *Н-К* теплового насоса, а затем в сушильную камеру *СК*, откуда он после охлаждения и насыщения влагой продукта выбрасывается в окружающую среду (рис. 2).

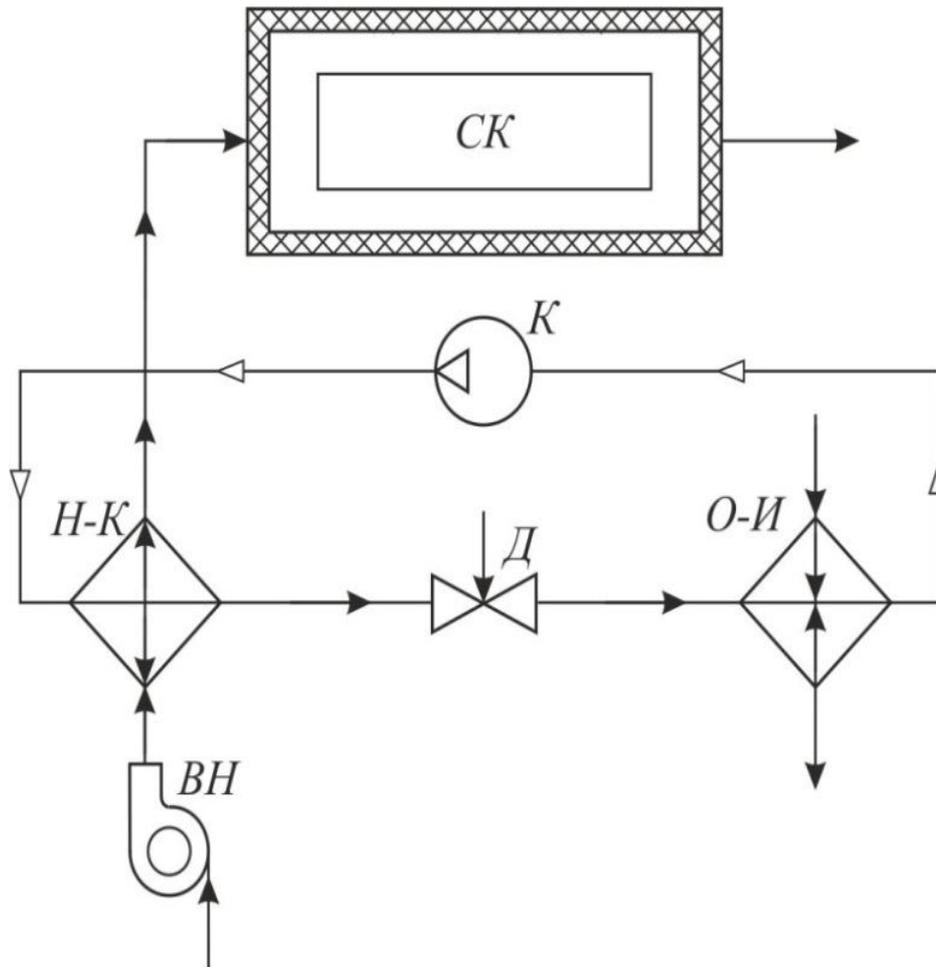


Рис. 2. Схема прямоточной сушилки с обработкой воздуха в тепловом насосе

Низкопотенциальное тепло, которое требуется для эффективной работы теплового насоса, отбирается от источника неиспользуемого тепла или из окружающей среды. Так как источник неиспользуемого тепла или тепла окружающего воздуха не связан с самой сушильной камерой, работа теплового насоса является независимой, что говорит о преимуществе такой схемы. С другой стороны, недостатком является отсутствие возможности регулирования относительной влажности и влагосодержания воздуха, так как процесс подогрева воздуха проходит при постоянном влагосодержании d_n .

Холод, вырабатываемый в охладителе-испарителе *О-И*, можно полезно использовать для обработки продукта в охладительной камере *О* (рис. 3), что играет важную роль в плане создания устойчивой тепловой нагрузки теплового насоса и роста энергетической эффективности системы. Все это не позволяет устранить отрицательные моменты предыдущей схемы в плане создания оптимальных режимов сушки с применением тепловых насосов [5].

Существенного роста энергетической эффективности теплового насоса можно добиться, направляя обратный поток воздуха сушильной установки для охлаждения в испаритель *О-И* и используя его в качестве источника низкопотенциального тепла (рис. 4). Это объясняется уменьшением градиента температур нагретого и холодного воздуха, при этом проблема регулирования термодинамических параметров воздуха (d_n , φ_n) на входе в сушильную камеру остается открытой.

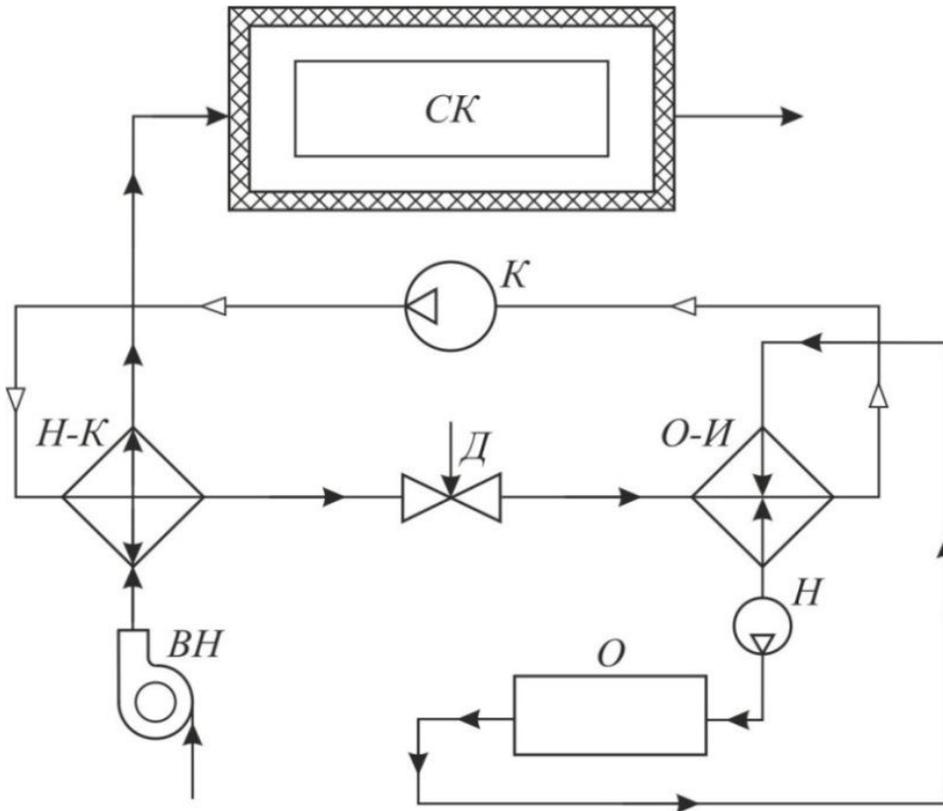


Рис. 3. Схема сушилки с раздельной обработкой теплом и холодом в тепловом насосе

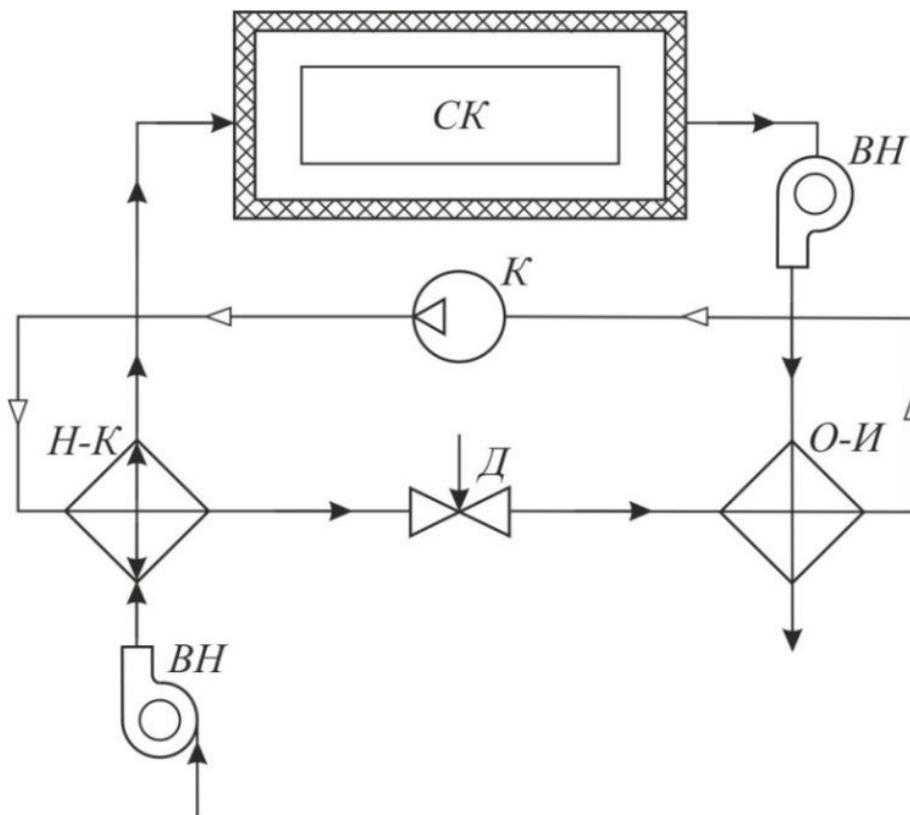


Рис. 4. Схема сушилки с использованием теплоты отработанного воздуха в тепловом насосе

Использование схемы с замкнутым контуром циркуляции воздуха (рис. 5, а) позволяет проводить последовательное охлаждение и нагревание воздуха (рис. 5, б). В испарителе *О-И* отводится тепло Q_0 , влажный воздух охлаждается до температуры точки росы и становится суше (теряет влагу) на величину Δd_1 (процесс 4-1), затем воздух направляется в нагреватель-конденсатор *Н-К*, где нагревается за счет теплоты конденсации Q_k , при этом его энтальпия и температура возрастают (процесс 1-2). В процессе 2-3 воздух дополнительно подогревается за счет теплоты сжатия в вентиляторе *ВН* и направляется в сушильную камеру *СК*, где протекает процесс сушки 3-4.

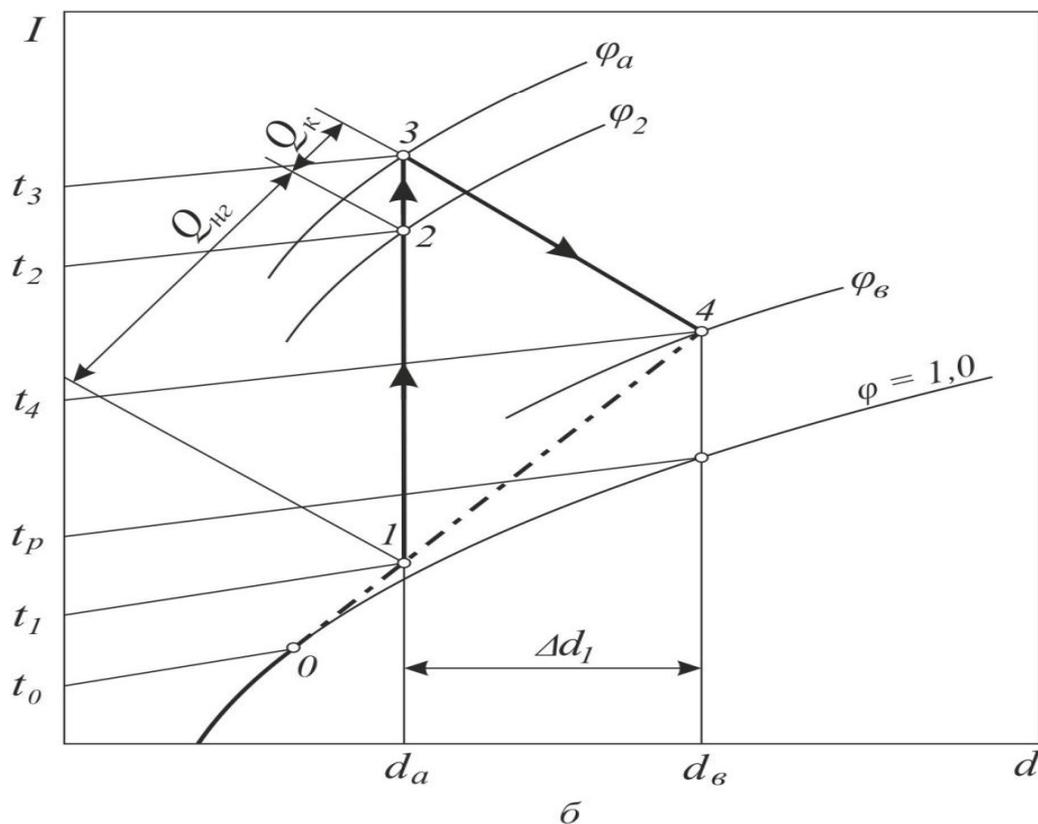
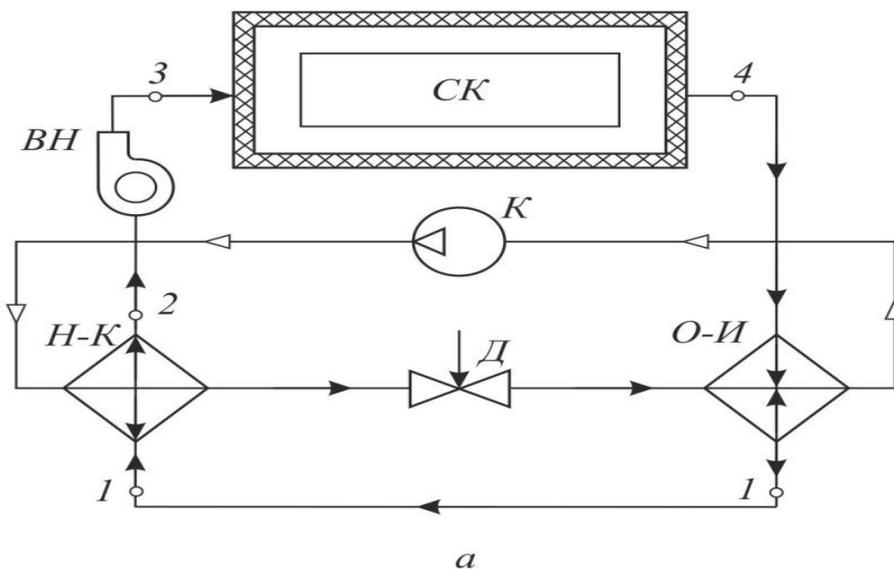


Рис. 5. Схема сушилки с рециркуляцией воздуха в тепловом насосе (а) и процессы обработки воздуха в *I-d*-диаграмме (б)

Данная схема позволяет осуществлять плавное изменение влагосодержания d_n и относительной влажности φ_n в широком диапазоне за счет регулирования температур охлаждающей поверхности и конденсации влаги из воздуха, а также полностью утилизировать то количество теплоты, которое идет на удаление влаги из продукта. Удельный расход энергии в существующих сушильных аппаратах составляет порядка 4 МДж/кг, тогда как в этой системе он не превышает 0,55-0,81 МДж/кг [2, 8].

Применение различных модификаций схем низкотемпературной сушки зависит от конкретных условий их использования, таких как температура и относительная влажность атмосферного воздуха и воздуха, обработанного в сушильной камере, наличие источника низкопотенциального тепла и величины теплосодержания, оценка оправданности использования получаемого холода для обработки воздуха, вид высушиваемого материала, вид привода компрессора теплового насоса, вентилятора и т. д. [2].

Рассмотренные схемы имеют резервы для совершенствования, которые могут интенсифицировать процесс сушки и создать реальные перспективы в разработке энергосберегающих технологий в производстве высококачественных продуктов питания.

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 // Известия 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. Головкин Н.А. Холодильная технология пищевых продуктов : учебник для вузов / Н.А. Головкин. – Москва : Агропромиздат, 1984. – 239 с.
6. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов : монография / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 215 с.
7. Ионов А.Г. Теплонасосная установка для вяления рыбы / А.Г. Ионов, А.Э. Суслов // Холодильная техника. – 1986. – № 9. – С. 24-27.
8. Кретов И.Т. Программно-логические функции системы управления теплонасосной сушильной установкой / И.Т. Кретов, А.А. Шевцов, И.В. Лакомов // Известия вузов. Пищевая технология. – 1998. – № 4. – С. 69-72.
9. Шаizzo Р.И. Низкотемпературная сушка пищевых продуктов в кондиционированном воздухе : монография / Р.И. Шаizzo, 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Принадлежность к организации

Игорь Вячеславович Лакомов – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации сельского хозяйства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-63-02, E-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Юрий Михайлович Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации сельского хозяйства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-63-02, E-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 17.05.2016

Дата принятия к печати 21.06.2016

AUTHOR CREDENTIALS

Affiliation

Igor V. Lakomov – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrification in Farming, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 253-63-02, E-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Yuriy M. Pomogaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrification in Farming, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 253-63-02, E-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Date of receipt 17.05.2016

Date of admittance 21.06.2016