

12. Novel ammonia sorbents “porous matrix modified by active salt” for adsorptive heat transformation: 5. Designing the composite adsorbent for ice makers / Alexandra D. Grekova, Janna V. Veselovskaya, Mikhail M. Tokarev, Larisa G. Gordeeva // *Applied Thermal Engineering*. – 2012. – V. 37. – P. 80–86.
13. Khattab N.M. A novel solar-powered adsorption refrigeration module / N.M. Khattab // *Applied Thermal Engineering*. – 2004. – V. 24, I. 17–18. – P. 2747–2760.
14. A new zero energy cool chamber with a solar-driven adsorption refrigerator / Md. Parvez Islam, Tetsuo Morimoto // *Renewable Energy*. – 2014. – V. 72. – P. 367–376.
15. Development and transient performance results of a single stage activated carbon – HFC 134a closed cycle adsorption cooling system / N.D. Banker, M. Prasad, P. Dutta, K. Srinivasan // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – V.30, I.10. – P. 1126 – 1132.
16. Pressurized adsorption cooling cycles driven by solar/waste heat / Azhar Bin Ismail, Ang Li, Kyaw Thu, Kim Choon Ng, Wongee Chun // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – V. 67, I. 1–2. – P.106–113.
17. Анализ цикла работы солнечных адсорбционных холодильных установок /О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.С. Шаронов// *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 8. – с. 24–29.
18. Structure and adsorption properties of the composites ‘silicagelesodium sulphate’, obtained by solegel method/ Kostyantyn M. Sukhyi, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomiyets, Mikhaylo P. Sukhyi // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – V. 64. – p. 408 – 412.
19. Пат. 86227 Україна, МПК F 25 B 17/00. Адсорбційний холодильник / Сухий К.М., Сухий М.П., Коломієць О.В. [та ін.]; заявник і патентовласник Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”. – № у 2013 05136; заявл. 22.04.2013 опубл. 25.12.2013, Бюл. №24.

УДК 664.854:66.047

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТИВНЫХ СУШИЛОК НА БАЗЕ ТЕРМОСИФОНОВ

Безбах И.В., канд. техн. наук, доц.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Рассмотрены аппараты на базе термосифонов для сушки дисперсных пищевых материалов. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Devices on the basis of thermosiphons for drying of disperse food materials are considered. Results of experimental researches are presented.

Ключевые слова: термосифоны, дисперсные материалы, рекуперация.

В современных условиях возрастающего потребления энергии, с одной стороны, и дефицита энергетических ресурсов, с другой, все более остро ставятся вопросы рационального использования энергии, рекуперации тепла во всех процессах пищевой технологии, включая сушку. Процесс конвективной сушки неизбежно сопровождается неполным использованием энергии теплоносителя, что связано с условиями гидротермического равновесия между высушиваемым материалом и сушильной средой.

Рекуперация и вторичное использование тепла отработанного сушильного агента до сих пор остаются проблематичными, так как существуют трудности, связанные со сравнительно невысоким потенциалом газового теплоносителя на выходе из сушилки. В этом отношении значительный интерес представляют способы рекуперации теплоты, содержащейся в отработанном сушильном агенте или в высушенном продукте, для нужд самого процесса сушки [1].

Классификация способов рекуперации теплоты при сушке дисперсных материалов представлена на рисунке 1.

Наиболее перспективными из них является утилизация физического тепла отходящих газов, достигаемой их частичной рециркуляцией, утилизация физического тепла отходящих газов с использованием промежуточного теплоносителя, утилизация физического тепла высушенного продукта при прямом теплообмене с ним исходного сушильного агента, применение тепловых труб (ТТ) термосифонов (ТС), вращающихся термосифонов (ВТС). Анализ состояния зерносушильной техники на пищевых предприятиях Украины показывает, что в 48 % случаев эксплуатируются шахтные агрегаты отечественного производства. Шахтные конвективные зерносушилки имеют ряд недостатков: невысокий КПД использования объема сушильного аппарата; малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие энергоза-

траты (5 МДж/кг и выше). Поэтому при модернизации предприятий многие аграрии собираются уделить внимание участкам сушки (до 15 %) как одним из наиболее затратных в составе зернохранилищ [3]. При сушке зерна в шахтных зерносушилках в окружающую среду выбрасывается отработанный сушильный агент, который имеет температуру близкую к температуре пара над продуктом (около 60 °С), и низкое



Рис. 1 – Классификация способов рекуперации теплоты при сушке дисперсных продуктов

влажностное содержание (около 20 г/кг), объемы теплоносителя огромны, но потенциал для энергосбережения невысокий. Расход воздуха в шахтных сушилках составляет 122...136 м³/ч. Производители сушилок заинтересованы в снижении теплопотерь. Применительно к шахтным зерносушилкам основным способом рекуперации теплоты является рециркуляция теплоносителя [3], теплообмен сушильного агента с высушенным продуктом (таблица 1).

Таблица 1 – Способы рекуперации теплоты в шахтных сушилках

Способы рекуперации теплоты	Удельные энергозатраты, кДж/кг уд. вл.
Зерносушилки, не использующие рекуперацию	5000...5850
Рекуперация теплоты охлаждающего воздуха	4800
Рекуперация теплоты охлаждающего воздуха и частично отработавшего ненасыщенного сушильного агента из нижних зон сушки	4418
Рекуперация теплоты охлаждающего воздуха и отработавшего насыщенного сушильного агента из верхних зон сушки	3240

Сложная аппаратно-техническая реализация, невысокий тепловой потенциал отработавшего агента делает такие способы малоэффективными.

Аналогами конструкций сушилок на базе тепловых труб, термосифонов являются сушилки, теплота в которых передается зерну от нагретой поверхности. В качестве нагретой поверхности могут использоваться трубы, обогреваемые изнутри паром или горячей водой. Для поглощения водяного пара, выделяемого из зерна, через сушильную шахту пропускают нагретый или холодный воздух. Воздух выполняет функции только влагопоглотителя. Такие конструкции применяют для сушки зерновых гораздо реже до 5 % респондентов [3]. Паровые сушилки обеспечивают высокие коэффициенты теплопередачи к зерновому потоку 30...90 Вт/м² К. Сравнительные характеристики сушилок с использованием водяного пара в

качестве теплоносителя приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики сушилок с использованием водяного пара в качестве теплоносителя

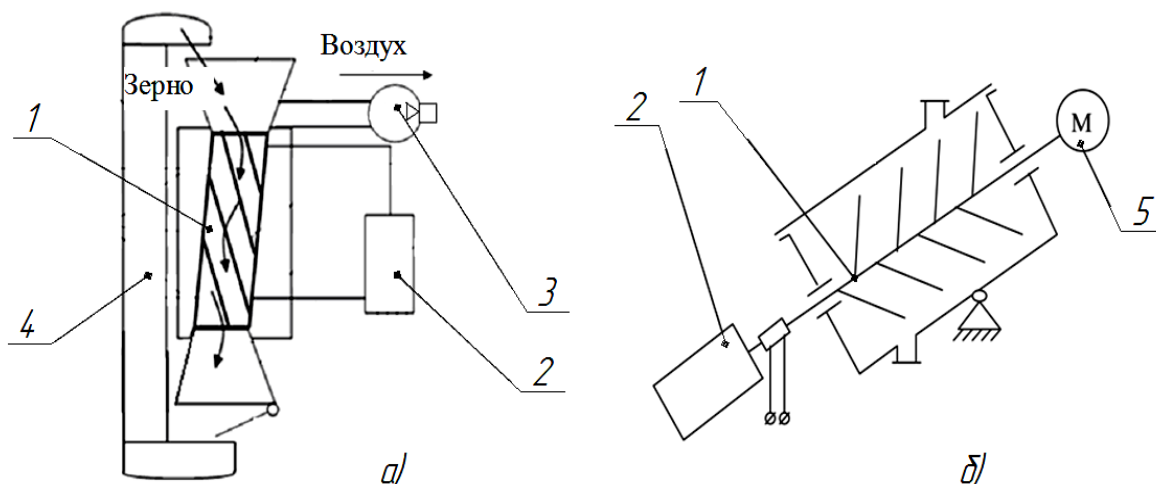
Поверхность нагрева	Тип сушилки	Продукт	Давление пара, МПа	Расход пара, кг/с	Влажность продукта начальная, %	Влажность продукта конечная, %	Число оборотов ротора, об/мин	Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² К
Неподвижная	Вертикальная паровая сушилка ВС-10-49 [4]	Овес, гречиха, горох, рис	0,39	0,5	25	14	-	25...30
	Паровая тарелочная сушилка	Овес, горох, бобы	0,4	0,85	18	15	-	25
Движущаяся	Сушилка трубчатая барабанная горизонтальная	Кукурузные полуфабрикаты	0,6	0,09	25	15	20	40
	Вращающиеся паровые трубчатые сушилки с непрямым нагревом [5]	Дисперсные продукты с высокой влажностью	0,88	0,1	50	14	6	30...90

Сушилки с движущейся поверхностью нагрева имеют коэффициент теплопередачи практически в 2 раза выше сушилок с неподвижной поверхностью теплообмена. В сушилках используют греющий пар высокого давления от 0,39 до 0,88 МПа. Сушилки с вращающейся поверхностью используют для более широкого диапазона продуктов с высокой начальной влажностью, не только дисперсных но и вязких.

Недостатки конструкций паровых сушилок: сложная аппаратурно-техническая реализация, необходимы дополнительные устройства для подачи пара, отвода конденсата, образование водяных пробок в трубках, низкая степень перемешивания зернового потока.

В связи с этим вопрос разработки новых видов зерносушильной техники актуален. Решение проблемы – использование термосифонов, вращающихся термосифонов, тепловых труб в технологиях сушки.

В рекуперативной сушилке на базе ТС (рис 2, а), дисперсный продукт перемешивается за счет оригинальной конструкции конденсатора ТС [6]. Общая схема рекуперативной зерносушилки представлена на рис. 2, а. Конденсатор 2 термосифона размещен в шахте. Посредством ТС осуществляется подогрев зерна, которое движется плотным гравитационным слоем.



1 – конденсатор ТС, 2 – испаритель ТС, 3 – вентилятор, 4 – нория, 5 – привод
а) рекуперативная сушилка на базе ТС, б) сушилка на базе ВТС

Рис. 2 – Конструкции рекуперативных зерносушилок

Развитием схемы (рис. 2, а) является рекуперативная сушилка с утилизацией теплоты уходящего воздуха. Конструкция представляет собой рекуперативную сушилку, дополненную теплообменником рекуператором для утилизации теплоты уходящего из сушилки воздуха. Теплообменник-рекуператор имеет пучок труб, внутри которых проходит смесь воздуха и пара из сушильной шахты. Таким образом, для предварительного нагрева зерна перед сушкой полностью используется утилизируемая энергия уходящего воздуха. Процесс передачи теплоты через поверхность трубы к зерновому потоку в теплообменнике рекуператоре происходит в условиях парциальной конденсации водяного пара из смеси в объеме трубы.

Рекуперативная сушилка с ВТС (рис. 2, б) состоит из корпуса, конденсатора 1, испарителя 2, привода 5. При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода продукту. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. В основу работы сушилок положено два основных принципа интенсификации: обновление поверхности контакта фаз; разрушение теплового и диффузионного слоев плоскостью поверхности теплопередачи.

С целью проверки работоспособности предложенных схемных решений применительно к дисперсным материалам проведен ряд экспериментов. В рекуперативной сушилке на базе ТС производилась сушка пшеницы, в сушилке на базе ВТС проводили сушку вареного гороха, амаранта, пшеницы. Получены кинетические зависимости процессов тепло- массообмена при сушке дисперсных продуктов в рекуперативных зерносушилках.

Для оценки распределения энергии в рекуперативной зерносушилке на базе ТС, составлено уравнение теплового баланса. После анализа экспериментальных данных получаем, что в сравнении с конвективной сушкой у рекуперативной сушилки большая часть энергии (69,4 %) затрачивается на испарение влаги, на нагрев зерна 16,3 %, потери в окружающую среду 13,2 %, на подогрев воздуха всего около 1,1 % (рис. 3, а). Анализ тепловых балансов сушилок показывает, что если считать полезной энергию, которая затрачивается на испарение влаги, энергетический КПД конвективной сушилки составляет 40 %, рекуперативной 69,4 (рис. 3).

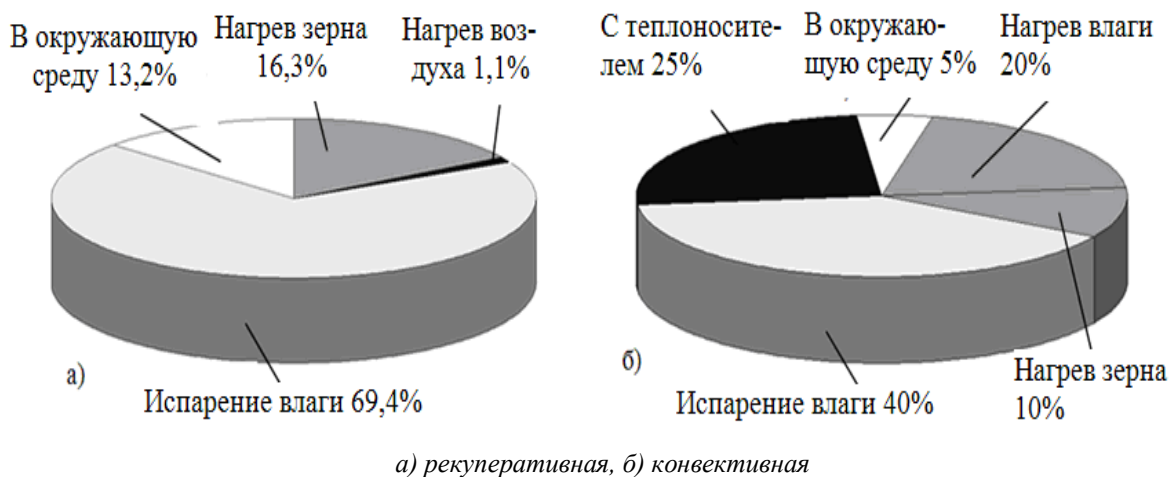


Рис. 3 – Распределение тепловой энергии в зерносушилках

В рекуперативной сушилке с испаренной влагой и воздухом теряется около 70 % подведенной энергии, ее утилизация позволит значительно снизить энергозатраты сушилки, увеличить ее КПД. Анализ параметров отработанного воздуха рекуперативной зерносушилки, показывает, что появляется реальная возможность использования тепла конденсации влажного воздуха для предыдущего нагревания зерна.

При расходе воздуха 0,006 кг/с, влагосодержание воздуха в конце процесса сушки в рекуперативной сушилке составило 60 г/кг при относительной влажности 94 %, что делает его близким к точке фазового перехода. В условиях экспериментов утилизировано 12 % подведенной теплоты, что позволяет снизить энергозатраты рекуперативной зерносушилки до 3 МДж/ кг уд. вл. Задача дальнейших экспериментов – в теплообменнике - рекуператоре подогреть зерно перед сушкой за счет энергии отработавшего воздуха. При таких условиях появляется возможность вернуть в зерновой поток значительную часть энергии, которая была израсходована в сушильной шахте. Конструкции сушилок на базе ТС, ВТС обладают рядом преимуществ: возможность экономии энергии, величина которой может быть значительной; нет необхо-

димости во внешних энергетических затратах на транспортировку промежуточного теплоносителя; компактность; низкие эксплуатационные расходы; высокая надежность. Снижение удельных энергозатрат в сушилках с ВТС, ТС достигается за счет высоких коэффициентов теплопередачи к продукту (до 90 Вт/м² К), обновления контакта фаз, увеличения активной поверхности влагоотдачи. Энергозатраты на сушку приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Удельные энергозатраты рекуперативных сушилок

Аппарат	Удельные энергозатраты, МДж/ кг уд. вл.
Рекуперативная сушилка	3,2
Рекуперативная сушилка с утилизацией теплоты уходящего воздуха	3
Сушилка с ВТС	3,5

Отсутствие дополнительных устройств подачи пара, отвода конденсата и сокращение цепочки термотрансформации энергии приводит к сокращению энергозатрат до 30 % для всех типов сушилок на базе ВТС, ТС.

Литература

1. Бурдо, О. Г. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб [Текст] / О. Г. Бурдо, Г. Ф. Смирнов, С. Г. Терзиев, А.В. Зыков – Одесса: «ИНВАЦ», 2014. – 376с.
2. Алейников, В.И. Интенсификация процесса сушки и энергосбережения в шахтных и камерных зерносушилках [Текст]: автореф. дис.... докт. техн. наук / В.И. Алейников – Минск, 1988. – 56 с.
3. Современное состояние и тенденции развития мощностей по хранению зерна в хозяйствах Украины, Журнал «Хранение и переработка зерна» : <http://hipzmag.com/>
4. Гришин, М. А. Установки для сушки пищевых продуктов [Текст]: справ. / М. А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов–М.: Агропромиздат, 1989 . - 215 с.
5. Дж. ПЕРРИ, Справочник инженера-химика,. т. 1. Перевод с англ. под ред. акад. Жаворонкова Н. М. и чл.-корр. АН СССР Романкова П. Г. Издательство «Химия», 1969, стр. 640, рис. 397, табл. 332.
6. Патент України 97592 МКИ F26 В 17/10. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Бурдо О. Г., Безбах І. В., Зиков О. В.; заявник ОНАХТ. - № u 2014 10150, опубл. 25. 03. 2015; Бюл. № 6.