

УДК 66.045

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ТИПА

Дубовкина И.А., Чалаев Д.М., к.т.н.,
Институт технической теплофизики НАН Украины,

Исследован процесс предварительного подогрева воздуха подаваемого в сушильную камеру за счет утилизации теплоты отработанного теплоносителя в технологии распылительной сушки.

The processes of preliminary heating air to feed spray drying chamber with heat recovery of exhaust air in the spray drying technology are investigated.

Ключевые слова: распылительная сушильная установка, рекуперация, рекуператор, утилизатор, утилизация тепла, тепловая труба.

В современных условиях при быстром удорожании энергоносителей, особенно актуальной становится проблема энергосбережения в производственно-хозяйственной деятельности предприятий. Широкое использование процессов сушки в различных отраслях промышленности, их значительная энергоемкость (в развитых странах на процессы высушивания тратится около 8 % всей энергии) свидетельствует о важном значении данных технологий для научно-технического процесса [1]. В плане экономии энергетических ресурсов остро стоит вопрос снижения потерь теплоты и уменьшение энергозатрат в тепло- и массообменных аппаратах, используемых для распылительной сушки дисперсных материалов, так как процесс распылительной сушки является одним из самых энергоемких технологических процессов. Ввиду необходимости перевода воды из жидкого в парообразное состояние, а также использования больших объемов высокотемпературного теплоносителя реализация процесса распылительного высушивания требует значительных энергетических затрат.

Расход теплоносителя в распылительных сушильных установках в среднем составляют 35-40 кг на 1 кг испаренной влаги, а влагосодержание воздуха после реализации процесса сушки возрастает от 6-12 г/кг с.в. до 35-40 г/кг с.в. (в зависимости от температуры и влагосодержания окружающего воздуха, а также конечной влажности порошка) [2]. Отработанный теплоноситель в зависимости от типа сушильной установки, конструктивных особенностей сушильной камеры, характера движения продукта в камере в большинстве случаев имеет температуру от 600 °С до 1000 °С [3]. В сушилках противоточно-смешанного типа (НЕМА, ЦТ-500, ЦТ-300) температура отработанного теплоносителя является низкой и при высушивании молочных продуктов находится в интервале 65...90 °С, а в прямоточных распылительных сушильных установках сушилках (РСМ-500, РС-1000, ВРА-4, А1-ОРЧ) она является более высокой и составляет 80...100 °С.

Сушильной установкой с производительностью 1000 кг испаренной влаги в час в атмосферу выбрасывается около 3,0 ГДж/ теплоты в час. За год (с учетом 6000 часов работы) такая сушилка с уходящим теплоносителем выбрасывает в атмосферу около 18000 ГДж теплоты [4]. Энтальпия отработанного теплоносителя в расчете на 1 кг испаренной влаги составляет: в сушильных установках прямоточного типа 3000 кДж/кг, в сушильных установках противоточно-смешанного типа 2500 кДж/кг. Для распылительной сушилки производительностью 1 т/час по испаренной влаге тепловой потенциал теплоносителя, выбрасываемого в атмосферу, составляет: в установках прямоточного типа – 3,0 ГДж/час (830 кВт), противоточно-смешанного типа – 2,5 ГДж/час (700 кВт).

Одним из направлений сбережения энергоресурсов при использовании сушилок распылительного типа может служить применение в технологических схемах рекуперативного теплообменного оборудования для предварительного подогрева подаваемого в сушильную камеру воздуха за счет утилизации теплоты отработанного теплоносителя.

На рис. 1 в диаграмме состояния влажного воздуха (H-d диаграмме) представлены процессы распыли-

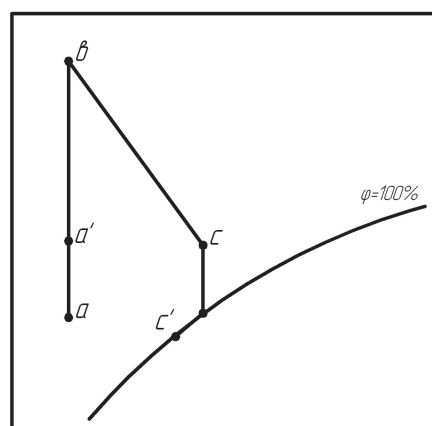


Рис. 1 – Процессы распылительной сушки в H-d диаграмме

тельной сушки, проводимые по традиционной технологии и с применением рекуперации теплоты.

На H-d диаграмме точка а соответствует состоянию атмосферного воздуха перед нагревателем, его температура будет равна t_a , энтальпия H_a и влагосодержание d_a . При подогреве воздуха в нагревателе увеличивается его температура и энтальпия, а влагосодержание остается неизменным. Этот процесс на H-d диаграмме описан линией ав. В точке в температура воздуха равна t_v , энтальпия H_v и влагосодержание d_a . Процесс сушки, который происходит в сушильной камере, описывается линией вс. Точка с соответствует параметрам отработанного теплоносителя на выходе из сушильной камеры, соответственно температура, энтальпия и влагосодержание будут равны t_c , H_c , d_c . С этими параметрами отработанный теплоноситель по традиционной технологии выбрасывается в атмосферу и при этом обладает еще высоким тепловым потенциалом. Применение рекуператора в технологической схеме для предварительного подогрева воздуха, подаваемого в сушильную камеру, за счет утилизации теплоты отработанного теплоносителя изменит процесс. Состоянию атмосферного воздуха перед нагревателем будет соответствовать точка а', в которой температура, энтальпия и влагосодержание будут $t_{a'}$, $H_{a'}$, $d_{a'}$. Линии сс' соответствует охлаждение отработанного теплоносителя в рекуператоре. Предварительный подогрев атмосферного воздуха за счет утилизации тепла отработанного теплоносителя описывается линией аа', при этом количество тепла, затрачиваемое на нагрев воздуха, сокращается на величину Δq , что соответствует разнице энтальпий в точках а' и а.

Количество теплоты необходимое для нагрев атмосферного воздуха при проведении процесса сушки по традиционной технологии можно рассчитать по формуле:

$$q = \frac{H_b - H_a}{d_c - d_a}$$

При проведении процесса сушки с утилизацией теплоты отработанного теплоносителя количество теплоты необходимое для нагрева воздуха равно:

$$q' = \frac{H_b - H_{a'}}{d_c - d_{a'}}$$

Соответственно, энергозатраты уменьшаются на величину:

$$\Delta q = \left(1 - \frac{q'}{q}\right) \cdot 100\%$$

Температура воздуха, предварительно подогретого за счет утилизации теплоты отработанного теплоносителя, рассчитывается следующим образом:

$$t_{a'} = E(t_c - t_a) + t_a$$

где эффективность рекуператора выражается формулой

$$E = \frac{t_a - t_{a'}}{t_c - t_a}$$

Энтальпия воздуха в точке а' будет равна:

$$H_{a'} = 1.005 \cdot t_{a'} + (2500 + 1.8068 \cdot t_{a'}) \cdot d_{a'}$$

Количество утилизированной теплоты в основном зависит от эффективности рекуператора, температуры атмосферного воздуха и, в меньшей степени, от его влажности. Степень уменьшения энергозатрат при различной эффективности рекуператора и температуре атмосферного воздуха показана на рис. 2.

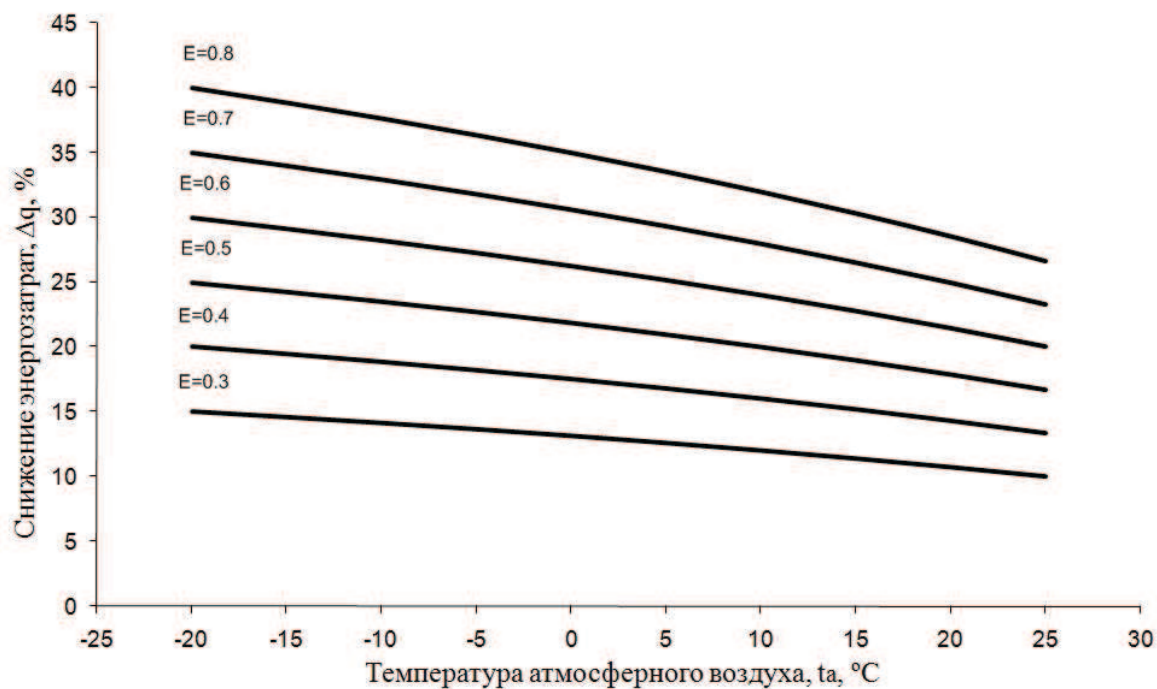
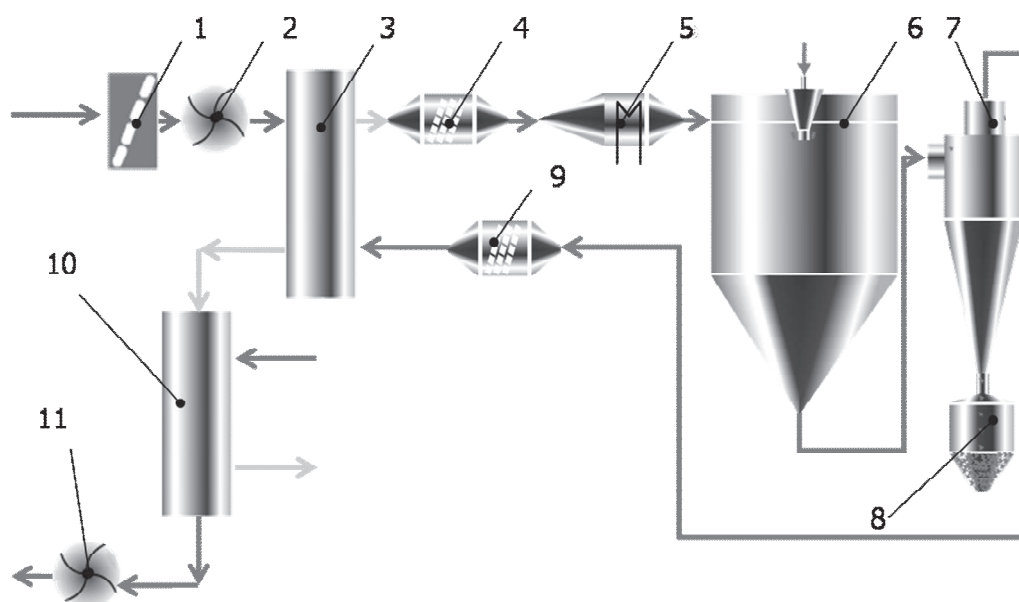


Рис. 2 – Зависимость снижения энергозатрат от температуры атмосферного воздуха для различной эффективности рекуператоров (при $t_b=160^{\circ}\text{C}$, $t_c=70^{\circ}\text{C}$)

При расчетах принято, что температура подаваемого в сушильную камеру воздуха равна $t_b=160^{\circ}\text{C}$, а температура выбрасываемого воздуха $t_c=70^{\circ}\text{C}$.

При одинаковых массовых расходах теплоносителя на притоке и вытяжке рекуператора количество утилизируемого тепла не достигает максимально возможной величины.



1 – фильтр воздушный; 2 – вентилятор нагнетательный; 3 – воздушный рекуператор; 4 – фильтр; 5 – нагреватель воздуха; 6 – сушильная камера; 7 – циклон; 8 – бункер для сбора готового продукта; 9 – фильтр; 10 – теплообменник; 11 – вентилятор.

Рис. 3 – Схема утилизации теплоты отработанного теплоносителя

Для полной утилизации тепла отработанного в процессе сушки теплоносителя можно применить технологическую схему (рис. 3), в которой после воздушного рекуператора устанавливается дополнительный теплообменник для подогрева воды на технологические нужды. Кроме этого, процесс утилизации можно организовать таким образом, чтобы одновременно протекали охлаждение отработанного агента сушки, конденсация растворителя и выделение пыли [5]. Благодаря этому достигается снижение энергозатрат и сокращение регламентированных потерь пищевого продукта в процессе сушки, а именно: возвращается в технологию теплота за счет подогрева атмосферного воздуха из окружающей среды; возвращается в технологию пищевой продукт, полученный при растворении и смыве сконденсированным растворителем; повышается интенсивность теплопередачи между отработанным теплоносителем и воздухом из окружающей среды, стабилизируются теплотехнические характеристики и улучшаются условия эксплуатации утилизатора за счет одновременного действия двух факторов: конденсации на поверхностях теплопередачи паров растворителя и смыва пыли пищевого продукта.

Способ утилизации не изменяет традиционного процесса сушки, так как реализуется в конце технологической линии и затраты на реализацию предложенного способа несоизмеримо малы по сравнению с получаемым экономическим эффектом от его использования.

Для рекуперации тепла в технологических процессах обычно используют пластинчатые рекуператоры, роторные рекуператоры, рекуператоры с промежуточным теплоносителем, а также рекуператоры на тепловых трубах.

Эффективность пластинчатых рекуператоров высока ($E=50-80\%$). Основными преимуществами пластинчатых теплообменников являются: простейшее устройство, отсутствие движущихся частей; практически отсутствует необходимость технического обслуживания, за исключением случаев установки оборудования в условиях особо загрязненной воздушной среды, что делает их достаточно дешевыми и в силу этого - весьма распространенными. При надлежащей аппаратурной обвязке (вытяжной вентилятор до теплообменника и вытяжной вентилятор за теплообменником) гидравлический режим в сушильной камере не изменится. Затрачиваемая вентиляторами энергия на преодоление потери напора на притоке и вытяжке незначительна, так как рекуператор этого типа имеет малое сопротивление.

К основным недостаткам можно отнести то, что при условиях, способствующих обмерзанию теплообменника в зимний период, необходимо осуществлять периодически автоматическую остановку вентилятора на притоке либо использовать байпас.

Роторные рекуператоры наиболее эффективны ($E = 75...90\%$), и поэтому стоят дороже других. Основные преимущества: возможность использования роторов различного типа обеспечивает широкий спектр практических приложений; благодаря тому, что процесс теплообмена осуществляется по большой удельной поверхности используемой насадки, агрегат в целом имеет минимальные габариты; регулирование скорости вращения ротора позволяет управлять общей эффективностью рекуператора; отсутствует необходимость непрерывного удаления конденсата.

Основные недостатки: использование возможно при условии параллельного расположения приточного и вытяжного воздуховодов в непосредственной близости друг от друга; дополнительный расход электроэнергии, потребляемой приводом ротора и вентиляторами на преодоление добавленной потери напора на притоке и вытяжке; наличие частичного переноса загрязненного воздуха из вытяжки в приток, что может быть сокращено за счет использования ряда мероприятий конструктивного характера, таких как устройство зоны очистки, но не может быть устранено полностью, в связи с чем использование роторных теплообменников в условиях присутствия токсичных и веществ недопустимо.

В рекуператорах с промежуточным теплоносителем присутствуют два теплообменника, между которыми циркулирует теплоноситель (вода или водно-гликолиевый раствор), который нагревается удаляемым воздухом в одном канале, после чего передает тепло приточному воздуху в другом канале. Замкнутая система исключает опасность передачи загрязнений из удаляемого воздуха в приточный, поэтому используются в случае загрязненности или токсичности удаляемого воздуха. Передача тепла определяется изменением скорости циркуляции теплоносителя. Эффективность этих рекуператоров невысока ($E = 45...60\%$).

Главные преимущества: отсутствует необходимость смежного расположения приточного и вытяжного воздуховодов, что исключает надобность изменения их трассировки; перетекание загрязненного воздуха из вытяжки в приток полностью исключено, поскольку они изолированы между собой через промежуточный теплоноситель.

Основные недостатки: высокий дополнительный расход электроэнергии, потребляемой циркуляционным насосом, который в сумме со сравнительно небольшим дополнительным расходом электроэнергии, потребляемой вентиляторами на преодоление добавленной потери напора на притоке и вытяжке, при определенных обстоятельствах делает достигаемую рекуперацию тепла экономически нецелесооб-

разной; наличие циркуляционного насоса и большого количества запорно-регулирующей арматуры обуславливают необходимость эксплуатационного технического обслуживания в значительных объемах [6].

Рекуператор типа "тепловые трубы" представляет собой закрытую систему трубок. Передача тепла осуществляется за счет испарения и конденсации легкокипящего агента в рабочих зонах трубок. Такому рекуператору свойственна эффективность $E = 50..80\%$ [7].

Преимущества: среди других средств рекуперации тепловые трубы отличаются наибольшей компактностью; использование их возможно при условии параллельного расположения приточного и вытяжного воздуховодов, непосредственно примыкающих друг к другу; перетекание загрязненного воздуха из вытяжки в приток полностью исключено, поскольку они изолированы между собой через промежуточный теплоноситель; большая площадь теплообменной поверхности на единицу объема; возможность рекуперации теплоты при малых разностях температур; простота обслуживания, свободный доступ к теплообменным поверхностям, что облегчает процесс очищения теплообменника [8, 9].

Выводы

Исследования процессов рекуперации теплоты отработанного в технологии распылительной сушки теплоносителя показали, что применение рекуператоров может ощутимо снизить энергопотребление сушильной установки. При температуре отработанного воздуха $70..95\text{ }^{\circ}\text{C}$ доля теплоты, возвращенная в технологический цикл, в зависимости от параметров атмосферного воздуха может достигать 15-40 %.

Литература

1. Энергосбережение, использование вторичных энергоресурсов и холодоснабжение в системах вентиляции и кондиционирования пищевых производств // ЭСКО. – 2008. – № 2.
2. Свинаярева Г.А., Дядичко Г.К., Головкин О.М. Об использовании теплоты отработанного в сушилке воздуха // Мол. пром-сть. — 1984. - №4. — С. 15-17.
3. Л.Н.Грабов, Д.М.Чалаев, В.В.Шморгун, А.А.Карповец. Рекуперация теплоты отработанного в распылительной сушилке теплоносителя с использованием теплообменника на тепловых трубах // Труды 2-й Международной научно - практической конференции “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005”, 11-14 октября 2005 г. – Москва, 2005. – Т.2. – С.78-80.
4. Шморгун В.В., Чалаев Д.М., Гершуни А.Н. Пути уменьшения энергозатратных показателей технологий распылительной сушки // Промышленная теплотехника – 2007. – Т. 29, №7. – С. 190 – 193.
5. Бурдо О., Терзиев С, Перетяка С Эффективність термосифонного утилізатора// Харч, і перероб. пром-сть. — 1994. — № 8. — С. 25 — 27.
6. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т.1 Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 560 с.
7. Буркин А.И., Самсонов В.Н., Григорьев А.Ю. и др. Об эффективности применения термосифонов для рекуперации теплоты низкотемпературного потенциала// Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии. - Москва: МГУПБ, 2003.
8. Безродный М. К., Пиоро И. Л., Костюк Т. О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах: Монография. Киев: Факт, 2003.
9. Васильев Л. Л., Киселев В. Г., Матвеев Ю. Н., Молодкин Ф. Ф. Теплообменники-утилизаторы на тепловых трубах / Под ред. Л. И. Колыхана. Минск: Наука и техника, 1987.