

## **К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКОМ ОБОСНОВАНИИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ**

У статті розглянута концепція застосування теплових насосів у технологічному процесі конвективного сушіння подрібненого вугілля у замкнутому циркуляційному контурі. Наведено результати аналітичних розрахунків, що показують ефективність подібних систем на будь-яких промислових підприємствах, що володіють значними вторинними енергетичними ресурсами.

## **TO THE QUESTION OF THEORETICAL BASIS OF INCULCATING HEAT PUMPS IN DRYING TECHNIQUES**

The concept of heat pumps applying in technological process of convective drying crushed coal in a closed circulation loop is reviewed in this article. The results of analytical calculations, showing the efficiency of such investigated systems in any industrial enterprises, which one have considerable secondary power resources, are reduced.

На современном этапе развития промышленности весьма актуально поставлен вопрос об энергопотреблении и, соответственно, эффективности использования энергетических ресурсов, утилизации и рекуперации тепла в технологических процессах. Возрастание цены на газ для промышленных потребителей, повышение требований к охране окружающей среды требуют нового подхода к энергообеспечению промышленных объектов путём внедрения энергосберегающих технологий.

В промышленности используются в настоящее время свыше 60 % всего добываемого топлива и около 70 % всей вырабатываемой электроэнергии. Коэффициент полезного использования энергии в технологических процессах остается все еще невысоким и составляет лишь 35-40 %. Следует отметить, что большинство предприятий химической, нефтехимической и других отраслей промышленности характеризуются наличием достаточно большого количества вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) в виде пара, горячей воды, шлака, горючих газов и т.п., поддающиеся полезному использованию. В период до 1991 года ситуация с утилизацией ВЭР в промышленности улучшилась. Однако достигнутая фактическая экономия топлива за счет теплоты ВЭР составляет 30-32 %, в том числе в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности – 40 %, в черной металлургии – 40 %, в химической – 25 % [1].

Поэтому стратегическими общегосударственными целями развития промышленности страны, в том числе и горно-металлургического комплекса, является снижение энергоемкости основных её отраслей. Это предполагается совершить за счёт структурного преобразования промышленности, усовершенствования технологических процессов и приобщения к энергетическому обороту ВЭР.

Предлагаемая концептуальная схема как раз и заключается в утилизации

ВЭР с помощью термотрансформаторов или компрессионных тепловых насосов. В общем случае энергетические и экологические преимущества тепловых насосных систем (ТНС) обуславливают целесообразность замены некоторой части котельных для нагрева воды, которые производят около половины тепловой энергии в стране, и потребляют при этом сотни миллионов тонн топлива ежегодно. Поэтому тепловые насосы уже получили широкое распространение и в некоторых развитых странах они уже являются конкурентами традиционной теплоэнергетики, основанной на сжигании органического топлива [2-3]. Особенно выгодно применение тепловых насосов при одновременной выработке тепла и холода, что может быть реализовано в некоторых промышленных или сельскохозяйственных производствах, а также в системах кондиционирования воздуха.

Анализ последних публикаций показал существенное преобладание тем, освещающих применение ТНС в жилищно-коммунальном хозяйстве в целях отопления и горячего водоснабжения [4-7]. Тем самым вопросу об использовании ТНС в промышленных масштабах уделяется меньше внимания. Однако подобные научные исследования проводились ещё во времена СССР, а попытки внедрения продолжают до настоящего времени, и это находит подтверждение в экспериментальных и научных работах [10-12].

Таким образом, накопленный богатый опыт нашими предшественниками в создании и внедрении систем на основе тепловых насосов, позволил вплотную подойти к формулировке и теоретическому обоснованию функционирования ТНС. Эта система по своей сути направлена на утилизацию отработанных тепловых потоков от промышленных производств, которые обладают значительными ВЭР, с помощью теплового насоса. Для этого за основу была принята технология сушки дроблённого угля в потоке горячего сушильного газа [10].

Процесс конвективной сушки неизбежно сопровождается неполным использованием энергии теплоносителя, что связано с условиями гигротермического равновесия между высушиваемым материалом и газовым теплоносителем. Однако утилизация и повторное использование тепла отработанного сушильного агента к этому времени остаются проблематичными, поскольку возникают трудности, связанные со сравнительно невысоким потенциалом газового теплоносителя на выходе из сушилки. По этому поводу значительный интерес представляют собой способы утилизации и рекуперации тепла, содержащегося в отработанном газовом потоке или в высушенном продукте, для нужд самого процесса сушки [11]. Конечно же, кроме нагрева воздуха, необходимого для проведения процесса сушки, подведенная энергия используется на компенсацию потерь теплоты через ограждающие конструкции и утечку горячего воздуха через неплотности. Энергия подводится также и на привод вентиляторов. Таким образом, потери энергии могут достигать до 23 кДж на 1 кг влаги.

Поэтому в технологии сушения все более широко применяют ТНС, позволяющие довести сушильные установки до высокой энергетической совер-

шенности по отношению к рекуперации тепла. Как указывают авторы работы [12], это направление является наиболее перспективным на пути интенсификации процессов тепломассообмена и энергосбережения при сушке материалов, поскольку оно обеспечивает увеличение движимой силы процесса за счет снижения влагосодержания сушильного агента, значительно снижает потери первичной энергии на килограмм извлеченной влаги и создает хорошо контролируемые условия обезвоживания независимо от состояния окружающей среды, в первую очередь влагосодержания воздуха.

Конечно же, вопрос о возможности утилизации теплоты является комплексным, он тесно связан с работой сушильной камеры. В частности, для решения вопроса о целесообразности применения теплового насоса принималось во внимание следующее [13]:

- *совпадение по времени выхода сбросных тепловых потоков и потребления теплоты* (для нужд сушки этот аспект выполняется полностью, поскольку время работы сушильной камеры и теплового насоса совпадают);

- *место выхода сбросных тепловых потоков и место потребления теплоты* (компактно спроектированная сушильная установка учитывает и этот аспект);

- *фазу носителя сбросной теплоты (твердая, жидкая, газообразная)* (предложенная технология сушки целиком и полностью отвечает этому аспекту потому, что тепловой насос позволит сконденсировать ту часть влаги, которая испарится в сушильной камере, а обезвоженный газ направить для нужд сушки);

- *расход сбросных потоков и потребность в теплоте* (это условие целиком удовлетворяет необходимые потребности в теплоте для процесса сушки);

- *потенциал сбросной и потребной теплоты* (отработанный сушильный газ имеет достаточный энергетический потенциал для продолжения процесса сушения, особенно с рециркуляцией воздуха).

ТНС работает аналогично холодильной компрессионной установке по термодинамическому циклу, обратному тепловому двигателю. В тепловом насосе теплота внешней среды, которой может быть отработанный сушильный газ, в результате затраты механической энергии в компрессоре переходит от низкого температурного потенциала на более высокий температурный уровень.

Отличие теплового насоса от обычных теплообменников состоит в том, что теплообменник позволяет передавать теплоту только от более нагретого к менее нагретому потоку, т.е. в сторону уменьшения градиента температуры.

Исходя из рис.1, горячий сушильный газ, проходя через сушильную камеру, нагревает дробленый уголь, имеющий начальную температуру  $t_1$ . При достижении определенной температуры  $t_2$  влага, находящаяся в пылеугольных частицах, переходит в газообразное состояние, покидает их и уносится потоком сушильного газа из сушильной камеры. Если сразу после выхода из сушильной камеры охладить сушильный газ, который несёт в себе пары удалённой из частиц влаги, до исходной температуры сыпучих веществ  $t_1$  в испа-

рителе теплового насоса, то вода сконденсируется.



Рис. 1 – Принципиальная блок-схема сушки влажных материалов с помощью ТНС

Обезвоженный таким образом сушильный газ с помощью компрессора подаётся на конденсатор. Поток энергии, отобранный у сушильного газа, с помощью теплового насоса концентрируется и передаётся теплоносителем в конденсатор, стоящий у самого входа в сушильную камеру. Таким образом, холодный сушильный газ, проходя через этот теплообменник, нагревается той же энергией, которой он был нагрет первоначально при пуске сушилки. Другими словами, в конденсаторе происходит процесс трансформации теплоты с низкого температурного на более высокий уровень рабочего сушильного агента. Горячий и сухой газ опять поступает в камеру, где продолжает процесс сушки. Вышеописанный процесс получается энергетически замкнутым. И если бы не потери энергии (к которым необходимо присовокупить и энергию, затрачиваемую на перемещение масс сушильного газа, и носителя по замкнутому контуру), то процесс можно было бы продолжать бесконечно долго, высушивая одной и той же энергией бесконечно большое количество влажных пылеугольных частиц.

Обосновывая суть работы ТНС в технологическом процессе сушки, приняты к рассмотрению следующие потоки энергии:

Энергию, которая обеспечивает функционирование некоего технологического процесса, назовем *технологической энергией*  $E_T$ ;

Энергию, которую после выполнения некоей работы в технологическом процессе не удаётся утилизировать и опять направить в технологический процесс, назовём *энергией потерь*  $E_n$ ;

Энергию, которая подаётся в технологический процесс для компенсации энергетических потерь, назовём *компенсационной энергией*  $E_k$ .

Из определений, которые даны выше, видно, что для стабильной работы некоего технологического процесса необходимо, чтобы

$$E_n = E_k \quad (1).$$

Общая энергия (обозначим ее  $E_o$ ), находящаяся в технологическом процессе, равна:

$$E_o = E_T + E_n \quad (2).$$

Тогда в соответствии с термодинамическим анализом термической коэффициент полезного действия (КПД) технологии  $\eta$  можно представить равенством:

$$\frac{E_T}{E_o} = \eta \quad (3).$$

Коэффициент потерь технологии (обозначим его как  $1 - \eta$ ) равен:

$$\frac{E_n}{E_o} = \frac{E_k}{E_o} = 1 - \eta \quad (4).$$

Преобразовав выражение (3) и (4), получим:

$$\frac{\eta}{1 - \eta} = \frac{E_T \cdot E_o}{E_o \cdot E_n} = \frac{E_T}{E_k}$$

Иными словами

$$\frac{E_T}{E_k} = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad (5).$$

Выражение (5) является теоретической основой для создания систем на основе тепловых насосов. При анализе поведения функции, как видно из рис. 2, при достаточно высоких значениях КПД, первоначально наполнив некий технологический процесс необходимым количеством энергии  $E_T$ , можно, добавляя в этот технологический процесс минимальное количество  $E_k$ , совершать достаточно большую работу. Кроме того, из выражения (5) при  $\eta \rightarrow 1$  и при  $E_k = \text{const}$  следует, что  $E_T \rightarrow \infty$ , т.е. количество энергии, необходимой для обеспечения протекания процесса, стремится к бесконечности.

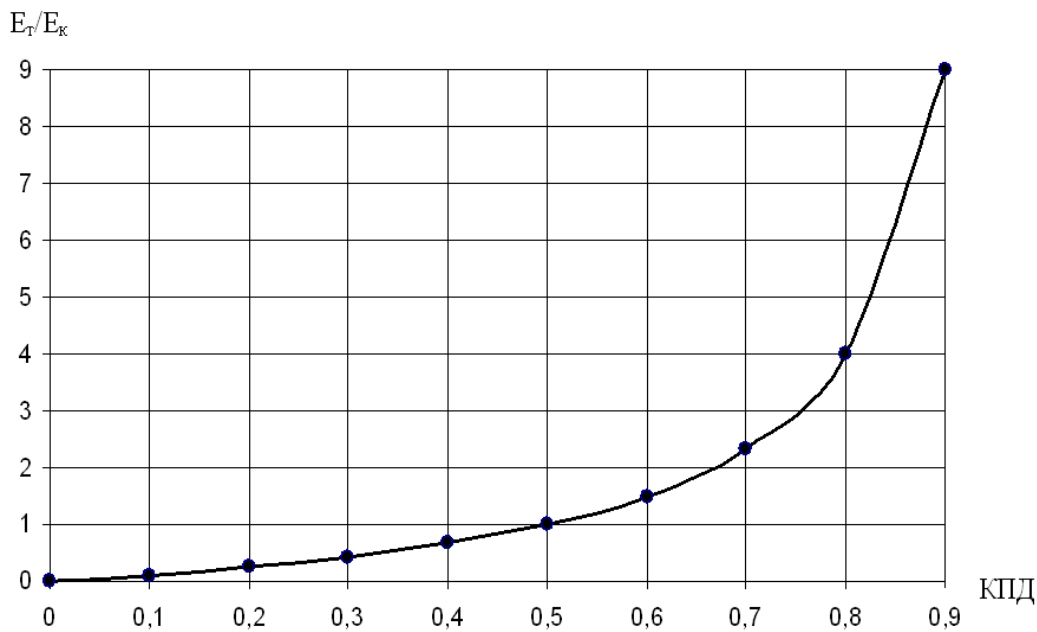


Рис. 2 – Графическая зависимость КПД технологии и отношения технологической энергии к компенсационной  $E_t/E_k$

В обычной сушилке невозможен 100 %-ный возврат отработанного сушильного агента, так как повышение его влажности быстро ликвидирует сушильную способность газа. Однако предлагаемая схема может эффективно применяться в сушильных установках как средство удаления влаги из уходящего сушильного газа, так что он может направляться на рециркуляцию в больших количествах. Таким образом, принцип рециркуляции сушильного газа делает сушку не зависящей от погоды и позволяет осуществлять равномерный процесс сушения.

Как показывают расчеты и большой опыт эксплуатации за рубежом, тепловые насосы по сравнению с котельными установками экономят 30 – 70 кг топлива на отпущенный 1 МВт·ч тепла. Это в 1,2 – 1,5 раза выгоднее самой эффективной газовой котельной и в 6 – 7 раз – электрических котлов. Эксплуатационные расходы на отопление жилого дома площадью 180 м<sup>2</sup> (1700 часов в год) с помощью электрического котла составляет приблизительно 2500 грн., а с помощью теплового насоса – 400 грн.

Таким образом, рентабельность работы системы теплоснабжения с ТНС обуславливается издержками на её создание и непосредственным образом связана с соотношениями тарифов на электроэнергию и цены на генерированную теплоту. Напрямую от стоимости сэкономленного топлива зависит и общий экономический эффект.

Одновременно вместе с использованием тепловых насосов возникают новые экономико-структурные перемены в системах теплоснабжения, сокращается материалоёмкость систем и эксплуатационные расходы, вместе с тем увеличивается наукоёмкость, что соответствует современным тенденциям в теплоснабжении.

При этом достаточно не эффективно с экономической точки зрения проектировать систему на максимально расчётную мощность объекта, поскольку получим в этом случае слишком высокие капитальные вложения. Поэтому, как правило, используется суммарная мощность теплового насоса и компенсационного аппарата, работающего на традиционном топливе или использующего электроэнергию. Это позволит оптимизировать и получить достаточно хорошие экономические показатели всей системы в целом [14, 15].

В результате вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- предложено для внедрения в технологический процесс сушки пылеугольных частиц схему, которая основана на тепловых насосах;
- на основе аналитических расчетов обоснована энергетическая эффективность предложенной схемы;
- указаны некоторые экономические аспекты использования системы на тепловых насосах.

Оценка технологии и техники сушки в химической промышленности и других отраслях промышленности показывает, что реализация известных способов энергосбережения позволит получить экономию до 30% энергии и 50% металла.

Для уяснения последующих аспектов применения тепловых насосов в процессе сушки дроблёных пылеугольных частиц требуется проведение дальнейших конструкторских расчетов и осуществление экспериментов на опытных образцах.

Предлагаемую схему можно внедрять не только в сушильной технике, но и в других отраслях промышленности, обладающие значительными вторичными энергетическими ресурсами, которые поддаются полезному использованию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошкин Н. Н. и др. Холодильные машины; под общей редакцией И. А. Сакуна. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 510 с.; ил.
2. Калнинь И., Пустовалов С., Савицкий А. Создание теплового насоса нового поколения на диоксиде углерода (R744) // В мире науки. – 2006. – № 10.
3. Бутузов В. А. Перспективы применения тепловых насосов // Промышленная энергетика. – 2005. – № 10.
4. Васильев Г. П. Эффективность и перспектива использования тепловых насосов в городском хозяйстве Москвы // Энергосбережение. – 2007. – № 8. – с. 63 – 65.
5. Васильев Г. П., Шилкин Н. В. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах // АВОК. – 2003. – № 2.
6. Фролов В. П., Щербаков С. Н., Фролов М. В., Шелгинский А. Я. Эффективность использования тепловых насосов в централизованных системах теплоснабжения // Новости теплоснабжения. – 2004 – № 7.
7. Шилкин Н. В. Использование тепловых насосов в системах горячего водоснабжения зданий // Сантехника. – 2003. – № 3. – с. 65 – 67.
8. Хоштария А. Г., Везиришвили О. Ш. Применение теплового насоса в производстве зелёного чая // Холодильная техника. – 1970. – № 7. – с. 21, 22.
9. Гомелаури В. И., Везиришвили О. Ш., Хоштария А. Г. Тепловой насос на фреоне-142 для сушки чая // Холодильная техника. – 1977. – № 6. – с. 11 – 13.
10. Святун А. А., Ключев Э. С. Концепция энергетического рециклинга в технологическом процессе конвективной сушки измельченных материалов с рециркуляцией воздуха на мусороперерабатывающем заводе // Матеріали міжнародної наукової конференції “Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу”. – Дніпропетровськ, ДНУ, 2008, 179 с.
11. Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. – 568 с.
12. Снежкін Ю. Ф., Чалаєв Д. М., Шаврін В. С., Хавін О. О., Дабіжа Н. О.. Використання теплових насосів у процесах сушіння // Пром. теплотехніка. – 2006. – Т. 28. – № 2. – с. 106 – 109.

13. Янговский Е.И., Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.: ил.
14. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 224 с., ил.
15. Чумак І. Г., Чепурненко В. П., Лар'янівський С. Ю. та ін. Холодильні установки. – К.: Либідь, 1995. – 224 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. С.І. Скіпочкою 10.08.09*