

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Е.В. Романова, А.Ю. Орлов

Кафедра «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ»

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гапановой

В современных условиях при быстром удорожании энергоносителей, особенно актуальной становится проблема энергосбережения в производственно-хозяйственной деятельности предприятий. Одним из самых энергоемких процессов является тепловая сушка. Особенное значение данный технологический процесс приобретает в условиях, когда необходимо сохранение определенных свойств высушиваемого материала (красители, фарм- и биопрепараты и др.). Но даже при высоких издержках рассматриваемого процесса не удается избежать низкого качества высушиваемого материала, поскольку на предприятиях зачастую работают морально и физически устаревшие конструкции сушильных установок, в то время как в рыночных условиях предприятие должно особое внимание уделять качеству конечного продукта.

Одним из способов, позволяющих существенно снизить эксплуатационные затраты процесса сушки и получить высококачественный продукт, является технология сушки с тепловым насосом (ТН).

Тепловой насос представляет собой устройство, реализующее процесс переноса низкотемпературной теплоты, не пригодной для прямого использования, на более высокотемпературный уровень. Иными словами, тепловые насосы являются трансформаторами теплоты, в которых рабочие тела совершают обратный термодинамический цикл, перенося теплоту с низкого температурного уровня на высокий. Таким образом из низкопотенциальной теплоты различного происхождения (природной возобновляемой теплоты грунтовых и поверхностных вод, теплоты грунта, атмосферного воздуха, а также сбросной техногенной теплоты технологических процессов промышленных производств, сточных вод биологических и других очистных сооружений) с температурой 0...50 °С вырабатывается тепло [1]. При этом количество получаемой полезной тепловой энергии среднего потенциала, за исключением потерь, равно сумме тепловых энергий низкого и высокого потенциалов, что обуславливает энергетическую и, как следствие, экономическую и экологическую эффективность тепловых насосов.

Существуют следующие **типы тепловых насосов**:

- парокompрессионные;
- абсорбционные;
- адсорбционные;
- гидридные;
- химические;
- термоэлектрические.

Массовое распространение пока получили парокompрессионные тепловые насосы с электроприводом компрессора. Постоянно совершенствуются тепловые насосы абсорбционного типа, расширяется область их внедрения. В последние годы активизировались исследования адсорбционных тепловых насосов на твердых сорбентах.

Принцип работы **компрессионных тепловых насосов** (воздушно-компрессионных и пароконпрессионных) основан на последовательном осуществлении расширения и сжатия рабочего тела.

На рис. 1 показана принципиальная схема **компрессионного теплового насоса** для использования низкопотенциальной тепловой энергии удаляемого из сушильной установки (СУ) воздуха. Пары рабочего тела (хладагента) засасываются из испарителя 1 компрессором 4, подвергаются сжатию и подаются в конденсатор 3. При сжатии возрастают температура и давление паров. В конденсаторе 3 при конденсации паров выделяется теплота, которая отводится. Из конденсатора сжиженное рабочее тело через регулирующий вентиль – дроссель 2 при снижении давления поступает в испаритель 1, где испаряется. Низкопотенциальная теплота подводится в испарителе, например, от воздуха или воды.

Схема применения теплового насоса в СУ показана на рис. 2. Отработавший воздух из СУ проходит через испаритель теплового насоса, где он охлаждается, отдавая теплоту рабочему телу. Содержащаяся в воздухе влага конденсируется и выводится из системы. Для нагревания воздуха используется теплота, эквивалентная теплоте, приобретенной в испарителе, и работе сжатия в компрессоре.

В **сорбционных** (абсорбционных и адсорбционных) тепловых насосах осуществляются последовательные термохимические процессы поглощения (сорбции) рабочего тела сорбентом, что сопровождается выделением теплоты, а затем выделения (десорбции) рабочего тела из сорбента с поглощением теплоты.

В **абсорбционных** тепловых насосах используется явление абсорбции паров низкотемпературных жидкостей пленками высокотемпературных жидкостей. На практике наибольшее распространение получили пары $H_2O/LiBr$, используемые в системах кондиционирования, и NH_3/H_2O , используемые в холодильной технике.

На рис. 3 принципиальная схема абсорбционного цикла сопоставлена с компрессионной.

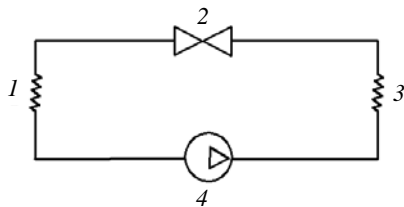


Рис. 1. Схема теплового насоса:
1 – испаритель; 2 – дроссель;
3 – конденсатор; 4 – компрессор

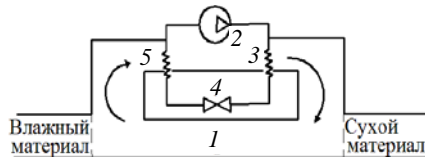


Рис. 2. Схема применения теплового насоса в СУ:
1 – камера; 2 – компрессор;
3 – конденсатор; 4 – дроссель;
5 – испаритель

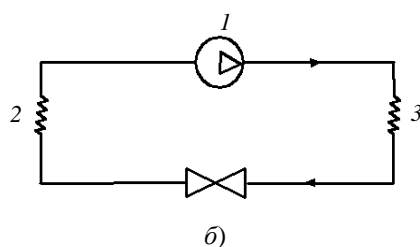
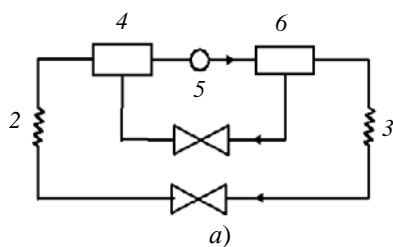


Рис. 3. Сопоставление простого абсорбционного (а) и пароконпрессионного (б) циклов:
1 – компрессор; 2 – испаритель; 3 – конденсатор;
4 – абсорбер; 5 – насос; 6 – генератор

Абсорбционный тепловой насос содержит испаритель и конденсатор, которые работают так же, как в парокompрессионном цикле. Теплота подводится к испарителю, вызывая кипение хладагента при низком давлении. Полезное тепло отводится от конденсатора, внутри которого происходит конденсация при высоком давлении. Однако в абсорбционном цикле используется дополнительный контур, в котором течет жидкий абсорбент (растворитель). Испарившийся хладагент поглощается жидкостью при низком давлении. Затем жидкость специальным насосом перекачивается в область высокого давления, где происходит подвод тепла, и, несмотря на высокое давление, пары хладагента выделяются из жидкости. Поскольку смесь жидкого абсорбента и хладагента практически несжимаема, затраты мощности на насос пренебрежимо малы, и источником первичной энергии является только теплота, подводимая к генератору пара, который всегда имеет максимальную температуру цикла [3].

Наиболее термодинамически совершенными являются **парокompрессионные** машины, особенно с приводом от **двигателей внутреннего сгорания (ДВС)**. Это связано с тем, что подвод низкопотенциального тепла, определяющий эффективность работы теплового насоса, у парокompрессионного теплового насоса осуществляется при фазовом переходе (испарении) рабочего тела, а в абсорбционном тепловом насосе подвод низкопотенциального тепла лимитируется изменением концентрации рабочего тела в абсорбере [4].

Однако тепловые насосы с приводом от ДВС более сложны в изготовлении и, соответственно, более дороги. Кроме того, ресурс работы их меньше. Этот недостаток присущ всем типам парокompрессионных тепловых насосов.

Абсорбционные тепловые насосы, представляющие собой по сути теплообменник, не имеют вращающихся и высоконапряженных деталей, поэтому их ресурс работы, определяемый исключительно коррозионной стойкостью конструкционных материалов, выше, чем парокompрессионных тепловых насосов. Абсорбционные тепловые насосы позволяют получать более высокотемпературное тепло, например, воду с температурой выше 100 °С или пар, что трудноосуществимо в парокompрессионных тепловых насосах.

Недостатком абсорбционных тепловых насосов является их чувствительность к влиянию силы тяжести, необходимость применения электрических насосов для перекачки жидкости, явление кристаллизации раствора LiBr в воде при повышенных температурах.

Из литературных источников известно о применении абсорбционных ТН в процессе сушки. Так, в работе [5] рассматривается сушка древесных опилок с абсорбционным ТН. Авторы пришли к выводу, что одноступенчатый абсорбционный ТН может быть реализован только при температуре сушильного агента ниже 60 °С. Для более высоких температур необходимо использовать двухступенчатую схему, но ее применение значительно усложняет установку и ухудшает энергетические показатели.

Металлоемкость установки наряду с энергетическими показателями является одной из важнейших характеристик, так как от нее зависит стоимость оборудования и, следовательно, технико-экономическая целесообразность того или иного варианта. Как показывают расчеты [6], даже одноступенчатые абсорбционные установки оказываются более металлоемкими, чем компрессионные.

Принцип работы **адсорбционных ТН** основан на явлении адсорбции паров жидкости твердыми телами (сорбентами). Схема адсорбционного теплового насоса, состоящего из двух адсорберов с системой терморегулирования и утилизацией теплоты (тепловые трубы), показана на рис. 4 [7].

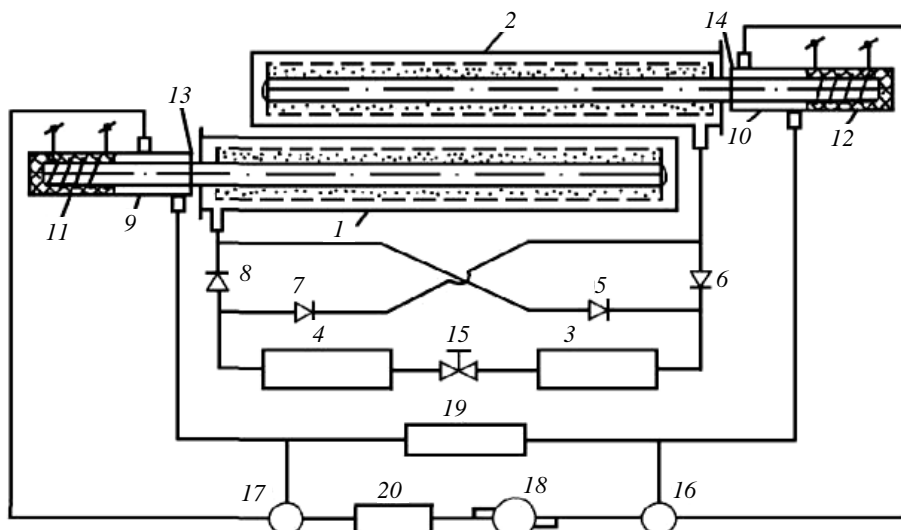


Рис. 4. Адсорбционный тепловой насос с применением тепловых труб и контура регенерации теплоты:

1, 2 – адсорберы; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; 5–8 – вентили;
9–10 – жидкостные теплообменники; 11–12 – испарители тепловых труб
с электронагревателями; 13–14 – тепловые трубы; 15 – дроссель;
16–17 – вентили; 18 – насос; 19 – ротаметр; 20 – термостат

Наиболее широкое применение в качестве сорбентов получили активированные угли, цеолиты и силикагели. В последние годы рассматриваются возможности использования силикагелей совместно с солями металлов. Большой интерес при создании тепловых насосов представляют активированный уголь и аммиак, а также активированное углеволокно и аммиак, цеолит и вода [7].

Простейший тепловой насос содержит один адсорбер, испаритель, конденсатор и вентили. Эффективность его работы (**СОР**) зависит от особенностей конструкции и выбранной пары сорбат (жидкость)/сорбент (твердое тело).

Преимуществом адсорбционных тепловых насосов по сравнению с абсорбционными является возможность их использования в широком диапазоне температуры, нечувствительность к силе тяжести (что особенно важно при использовании тепловых насосов на транспорте).

Недостатком адсорбционных тепловых насосов является периодичность их работы (требуется периодический процесс нагрева/охлаждения сорбента), приводящий к затратам дополнительной энергии на нагрев/охлаждение не только сорбента, но и корпуса адсорбера. Низкая теплопроводность пористого материала замедляет процесс нестационарного нагрева/охлаждения, увеличивает время цикла, уменьшает **СОР** теплового насоса. Применение способа конвективного нагрева/охлаждения сорбента ускоряет цикл в тепловом насосе и решает эту проблему.

Большой комплекс работ по разработке **сорбционных машин** выполнен с 1991 г. в лаборатории пористых сред Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. Особенности выполненных работ являются применение новых сорбентов на основе активированного волокнистого угольного материала «Бусофит» и использование для нагрева и охлаждения адсорберов тепловых труб.

Тепловые трубы были выбраны как теплопередающие устройства, способные транспортировать большие тепловые потоки при малых температурных перепадах и обеспечить быстрый нагрев сорбента в адсорбере при нестационарных режимах благодаря высокой интенсивности теплообмена внутри тепловой трубы ($10^3 \dots 10^5$ Вт/(м·К)). Они легко монтируются внутри сорбента и имеют малую массу.

Разработки ТН ведутся также Институтом катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН, создан лабораторный прототип **адсорбционного** теплового насоса, разрабатываются новые высокоэффективные сорбенты.

К тепловым насосам на твердых сорбентах также относятся **водородные** тепловые насосы, в которых в качестве сорбентов применяются гидриды металлов $\text{LaNi}_4 \text{Al}_{0.52} \text{Mn}_{0.37} - \text{Ti}_{0.99} \text{Zr}_{0.01} \text{V}_{0.43} \text{Fe}_{0.09} \text{Cr}_{0.05} \text{Mn}_{1.5}$ и др.

Рабочим телом **гидридных ТН** является обратимо циркулирующий водород. При сорбции водорода выделяется теплота, при его десорбции поглощается теплота из окружающей среды (генерируется холод). Диапазон температур таких ТН находится в пределах $-50 \dots 200$ °С.

Наибольших успехов в настоящее время в этом направлении добились японские ученые, причем основным направлением опытно-конструкторских работ является создание холода. В работе [8] приведены математические модели четырех вариантов устройств ТН: три из них предназначены для получения холода и одно – для получения тепла.

Водородные тепловые насосы обладают высокой термодинамической эффективностью, обеспечивают широкий диапазон изменения температуры, однако они требуют обеспечения высокого уровня надежности эксплуатации и относительно дороги.

Практическое применение **ТН на твердых сорбентах**:

- отопление;
- транспорт;
- системы охлаждения электроники.

Рассматривается возможность применения адсорбционного ТН для сушки.

Одной из альтернатив парокомпрессионных ТН является **химический ТН**. Химический ТН может хранить тепловую энергию в виде химической энергии, выделяющейся при экзотермической реакции. Химические ТН используют только тепловую энергию и не дают загрязняющих выбросов, что существенно отличает их от механических ТН. В работе [9] из многочисленных химических реакций была выбрана реакция гидратации/дегидратации $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ как наиболее приемлемая для экспериментов и моделирования химического ТН. Исходя из полученных результатов была предложена концепция сушилки с химическим ТН. Энергетическая эффективность сушилки с химическим ТН оказалась намного выше по сравнению с конвективной сушилкой. Особенности сушки с химическим ТН зависят от выбранной химической реакции, а также от режима работы. Необходимы дальнейшие детальные теоретические и экспериментальные исследования для изучения потенциала сушки с химическим ТН, так как полученные результаты базируются на упрощенном анализе [9].

Принцип действия **термоэлектрических** тепловых насосов основан на эффекте Пельтье, то есть на выделении и поглощении теплоты в спаях термопарных цепей при прохождении через них электрического тока. В Воронежской государственной технологической академии была разработана сублимационная сушилка с термоэлектрическими элементами, проведен теоретический анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в установках сублимационной сушки и выбраны оптимальные режимы их работы, получен патент на вакуум-сублимационную сушилку с термоэлектрическими модулями [10].

Эффективность и целесообразность применения каждого вида теплонасосного оборудования (адсорбционного, парокомпрессионного и др.) зависит от конкретных условий и требует технико-экономического анализа с учетом различных принципов работы оборудования, обуславливающих разные энергозатраты и разную себестоимость единицы получаемого тепла. В каждом отдельном случае следует рассчитывать конкретную экономическую и энергетическую выгоду и эксплуатационные затраты.

Список литературы

1. Горшков, В.Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор / В.Г. Горшков // Справ. пром. оборудования. – 2004. – № 2. – С. 47–80.
2. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
3. Рей, Д. Тепловые насосы / Д. Рей, Д.М. Макмайкл. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 224 с.
4. Петин, Ю.М. Тепловые насосы / Ю.М. Петин, В.Е. Накоряков // Рос. хим. журн. – 1997. – № 6. – С. 107–111.
5. Wood chip drying with an absorption heat pump / В. Le Lostec [et al.] // Energy. – 2008. – V. 33. – P. 500–512.
6. Мартыновский, В.С. Тепловые насосы / В.С. Мартыновский. – М. : Госэнергоиздат, 1955. – 191 с.
7. Васильев, Л.Л. Перспективы применения тепловых насосов в республике Беларусь / Л.Л. Васильев // Электрон. журн. энергосервисн. компании «Экологические системы» [Электронный ресурс]. – 2005. – № 7. – Режим доступа : <http://esco-ecosys.narod.ru/index.htm>.
8. Ижванов, Л.А. Разработка гидридных тепловых насосов / Л.А. Ижванов, А.И. Соловей // Рос. хим. журн. – 2001. – Т. XLV, № 5–6. – С. 112–118.
9. Kudra, T. Heat-Pump Drying / T. Kudra // Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A.S. Mujumdar. – 2nd ed. – New York, 2008.
10. Пат. 2183307 Российская Федерация, МКИ⁷ F 26 В 5/06. Вакуум-сублимационная сушилка [Электронный ресурс] / Санин В.Н., Антипов С.Т., Пойманов В.В. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технолог. акад. – № 2000118947/06 ; заявл. 17.07.2000 ; опубл. 10.06.02. – Режим доступа : <http://www.fips.ru>.

Possibilities of Using Heat Pumps in Drying Process

E.V. Romanova, A.Yu. Orlov

Department "Chemical Engineering", TSTU

Möglichkeiten der Benutzung der Wärmepumpen im Trockenprozess

Possibilités de l'utilisation des pompes thermiques lors du séchage
