

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, профессор, д.т.н., зав. лабораторией пористых сред ГНУ ИТМО НАН Беларуси,
Л.Е. КАНОНЧИК, к.т.н., с.н.с. лаборатории пористых сред ГНУ ИТМО НАН Беларуси

Сорбционные машины — эффективная энергосберегающая технология

Окончание. Начало в №6/2002

В целом проблема внедрения и создания сорбционных машин вышла за рамки отдельных государств. Регулярно проводятся международные конференции и совещания, публикуется много работ по этой тематике. Межреспубликанская научная ассоциация «Тепловые трубы», «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси являются организаторами Международного семинара «Тепловые трубы, тепловые насосы, холодильники» в г. Минске, в работе которого принимают участие ведущие специалисты стран дальнего и ближнего зарубежья. Целью семинара является ознакомление его участников с современными достижениями в области теплообменных технологий, холодильной техники и энергосберегающих систем нагрева и охлаждения, с возможностями их применения в различных областях народного хозяйства. Институт технологии энергетики Норвегии и Институт охраны окружающей среды Голландии взяли на себя инициативу создания программы международного сотрудничества (IEA Annex 28) по разработке технологии сорбционных машин. Создан исполнительный комитет Международного энергетического агентства (IEA) по сорбционным тепловым насосам.

Таким образом, есть основания утверждать, что тепловые насосы на твердых сорбентах для Республики Беларусь представляют интерес как:

- 1) заменители котлов в промышленной энергетике;
- 2) системы нагрева, охлаждения и кондиционирования в промышленности;
- 3) системы нагрева, охлаждения и кондиционирования в быту;
- 4) промышленные районные и областные холодильники на базе комбинированных сорбционных систем утилизации сбросного тепла электростанций.

Для промышленной энергетики и крупных сельскохозяйственных предприятий наиболее предпочтительны аммиачные парокомпрессионные насосы и сорбционные тепловые насосы (аммиак, вода) с газовым приводом — газовыми горелками. Для жилищно-коммунального хозяйства и мелких сельскохо-

зяйственных предприятий перспективными являются сорбционные тепловые насосы с газовым или электроприводом и пропан-бутановые парокомпрессионные тепловые насосы с электроприводом.

Повышение эффективности работы белорусских тепловых электрических станций может быть достигнуто за счет использования тепловых насосов на твердых сорбентах, дающих возможность уменьшить выбросы CO_2 в атмосферу и на единицу сожженного топлива получить 3 вида энергии — электричество, тепло и холод (тригенерация). В отличие от парокомпрессионного устройства, такой насос позволяет одновременно подогревать метан перед входом в турбодетандер газотурбинной установки и генерировать холод для холодильника либо овощехранилища, поскольку он обеспечивает перепад температуры 70°C и более. С точки зрения термодинамики системы тригенерации всегда имеют более высокую эффективность по сравнению с системами выработки только электроэнергии.

Создание и внедрение неэлектрических сорбционных систем получения холода и тепла — весьма перспективное энергосберегающее направление, которое одновременно решает проблемы улучшения экологии, развития холодильной промышленности и теплоэнергетики в Республике Беларусь.

Большой комплекс работ по разработке сорбционных машин (тепловых насосов, холодильников, систем трансформации и аккумуляции электроэнергии) выполнен с 1991 г. в лаборатории пористых сред «Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси. Особенности применения новых сорбентов на основе волокнистого угольного материала «Бусофит» и использование для нагрева и охлаждения адсорберов тепловых труб и термосифонов. Активированное угольное волокно типа «Бусофит» производства Светлогорского ПО «Химволокно» (Беларусь) получают путем прогрессирующей активации парами воды продуктов карбонизации волокон целлюлозы до различных обжа-

ров при температурах $850-1100^\circ\text{C}$. Среди преимуществ углеродного волокнистого сорбента можно отметить высокие скорости адсорбции и десорбции, разнообразные текстильные формы (в виде ткани, жгута, войлока). Данный микропористый сорбент обладает уникальными физико-химическими и механическими свойствами, компактностью (возможность формировать блоки). Изучение многоциклового работы угольных волокон с целью выявления возможности их повторного использования показало, что сорбционная способность материала после первого цикла изменяется, а затем стабилизируется, достигая некоторого стационарного состояния. Они могут регенерироваться в результате термической обработки и многократно использоваться в качестве сорбента.

Тепловые трубы и термосифоны были выбраны как теплопередающие устройства, способные транспортировать большие тепловые потоки при малых температурных перепадах и обеспечить быстрый нагрев сорбента в адсорбере в нестационарных режимах благодаря высоким значениям коэффициентов теплопередачи — 10^3-10^5 Вт/м К. Они легко монтируются внутри сорбента и имеют небольшой вес.

Экономически целесообразно для создания широкого спектра тепловых насосов различной мощности применять унифицированные модули по 0,5-5 кВт, содержащие по два адсорбера (рис. 2). В настоящее время здесь разрабатываются сорбционные машины, работающие на аммиаке, воде и твердых сорбентах (активированный уголь, углеволокно, хлориды металлов, силикагели, цеолиты). Для космоса предложен компактный сорбционный холодильник мощностью 0,3 кВт на базе термосифона и совмещенного испарителя-конденсатора с пористой вставкой, способный эффективно работать при любой ориентации.

Опытный образец солнечного сорбционного холодильника продемонстрировал преимущества совместного использования физической и химической сорбции, которые позволили повысить

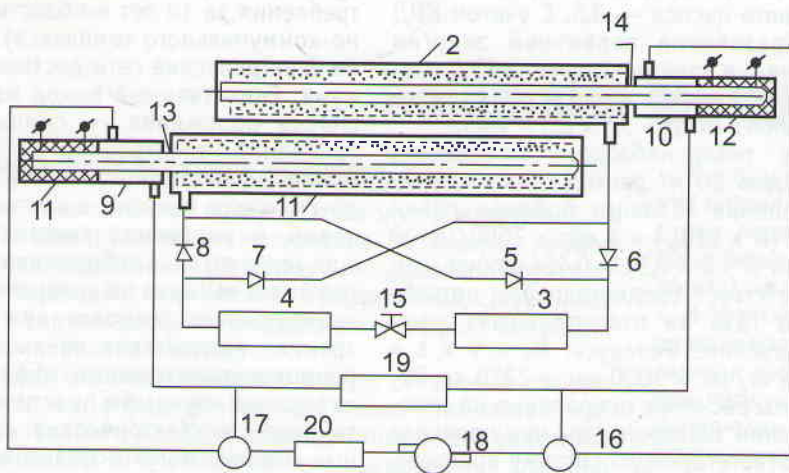


Рис. 2. Сорбционный тепловой насос с применением тепловых труб и контура регенерации

1, 2 – адсорберы; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; 5–8 – обратные вентили; 9–10 – жидкостные теплообменники, расположенные на внешней поверхности конденсаторов тепловых труб; 11–12 – испарители тепловых труб с электрическими нагревателями; 13–14 – водяные тепловые трубы; 15 – дроссель; 16–17 – трехпозиционные вентили; 18 – жидкостный насос; 19 – ротаметр; 20 – термостат.

сорбционную емкость углеволокна на 20-30% за счет его обработки солями. С целью проверки новых технических решений был изготовлен и исследован газовый тепловой насос, в котором применена система нагрева и охлаждения на базе пародинамического термосифона, отсутствуют обратные клапаны и дроссель, а коммутация 2-х адсорберов осуществлялась при помощи трехпозиционного электромагнитного вентиля. Как показали проведенные испытания, подобная схема не только работоспо-

собна, проста и надежна, но и дает возможность получить достаточно высокие рабочие характеристики: время цикла адсорбции/десорбции — 15-17 мин. и удельная тепловая мощность на килограмм сорбента порядка 500 Вт/кг. Для горячего водоснабжения, отопления жилищ, производственных помещений и теплиц спроектирован, изготовлен и испытан сорбционный тепловой насос мощностью 5 кВт. Десять адсорберов, содержащих по 1 кг углеволокна и 0,25 кг аммиака, нагревались от газо-

вой горелки с помощью теплообменника типа «воздух-воздух», в камере сгорания которого размещались оребренные испарители тепловых труб. Оптимизация конструкции выполнялась на основе математической двухмерной модели адсорбера, учитывающей теплоту сорбции. Экспериментальные и численные результаты подтвердили, что тепловой насос, в котором организована регенерация тепла, выделяющегося в адсорберах на стадии адсорбции, способен отводить тепловой поток 5 кВт с коэффициентом преобразования тепловой энергии 1,4 и выше. Децентрализованным потребителям предназначен экологически чистый сорбционный тепловой насос мощностью 2 кВт с автономным источником энергии - баллоном для связанного хранения природного газа. Ключевым элементом обоих устройств был цилиндрический сосуд, заполненный прессованным угольным активированным волокном «Бусофит АУТМ». Разработанный тепловой насос для обогрева и кондиционирования обеспечивал снижение затрат первичной энергии за счет применения низкопотенциальной энергии окружающего воздуха (средний COP=1,3-1,5), удельную холодильную мощность — до 300 Вт/кг и удельную тепловую мощность — около 660 Вт/кг.

Ниже приводится расчет энергетической эффективности, эксплуатационных затрат и срока окупаемости при использовании сорбционного теплового насоса мощностью 2 кВт.

Исходные данные для расчета:

- среднее время отопительного сезона в Республике Беларусь (t) — 5000 ч/год;
- теплоснабжение помещения площадью 20 м² (N) — 4 кВт;
- теплотворная способность условного топлива (Hu) — 7000 ккал/кг;
- теплотворная способность газа (H) — 8400 ккал/кг;

Таблица 1

Система обогрева	Сокращенное название, индекс	Эффективность	Стоимость серийного производства
Газовый бойлер	Г	КПД _Г = 0,9	СГ = 200 долларов США
Электрическая нагревательная система	Э	КПД _Э = 0,3	СЭ = 150 долларов США
Электрический компрессионный тепловой насос	К	КПД _К = 1,05	СК = 350 долларов США
Сорбционный тепловой насос	С	КПД _С (COP) = 1,6	СС = 600 долларов США (1000 шт./год)

• мировая цена за газ (S_f) — 80 долларов США/т.

Под коэффициентом преобразования тепловой энергии (COP) подразумевается отношение полезного тепла, отведенного в цикле, к тепловому потоку, подведенному от внешнего источника и полученному за счет затраты первичной энергии (топлива). Так, сорбционный тепловой насос мощностью $Q_{ТН}=2$ кВт при потреблении $Q_{Т}=1,25$ кВт тепла позволяет сэкономить $DQ=0,75$ кВт тепла, что соответствует $COP=1,6$. Для расчета энергетической эффективности (среднегодовой экономии условного топлива) ЭЭ необходимо определить количество тепла SQ , которое позволяет сэкономить применение теплового насоса в течение отопительного сезона:

$$SQ = t \times DQ = 5000 \times 3600 \times 0,75/4,18 = 3,23 \cdot 10^6 \text{ ккал}$$

$$ЭЭ = SQ/H_u = 3,23 \cdot 10^6 \text{ ккал}/7000 \text{ ккал/кг} = 461,4 \text{ кг у.т.} = 0,46 \text{ т у.т.}$$

Сравним эксплуатационные затраты на обогрев помещения (20 м²) с помощью следующих систем (мощность 2 кВт), эффективность и стоимость серийного производства которых приведена в таблице 1.

Заметим, что КПД компрессионного теплового насоса — 3,5. С учетом КПД преобразования первичной энергии (топлива) в электрическую на ТЭЦ, равного 0,3, истинная эффективность будет составлять $KPD_{\text{к}} = 3,5 \times 0,3 = 1,05$.

Для теплоснабжения помещения площадью 20 м² расход газа в случае применения газового бойлера равен $V = N/(H \times КПД_{\text{Г}}) = 4 \text{ кВт} \times 3600/(8400 \text{ ккал/кг} \times 4,2 \times 0,9) = 0,454 \text{ кг/час}$, что соответствует среднегодовому потреблению газа за отопительный сезон в Республике Беларусь: $M_{\text{Г}} = V \times t = 0,454 \text{ кг/час} \times 5000 \text{ час} = 2270 \text{ кг}$. Результаты расчетов, основанных на сопоставлении экономии газа при переходе на соответствующую систему обогрева, приведены в таблице 2.

Наша оценка показала, что сорбционный тепловой насос мощностью 2 кВт дает на 60% больше тепла, чем прямое сжигание топлива, что соответствует $COP = 1,6$, энергетической эффективности 0,46 т у.т. и имеет срок окупаемости для серийного производства 2,6 года (1000 шт./год); 4,85 года (100 шт./год). Такой насос предназначен для обогрева и кондиционирования бытовых помещений.

В заключение отметим, что из-за активного увеличения потребления элект-

троэнергии (более 30% прироста потребления за 10 лет в области жилищно-коммунального комплекса) нагрузка на электрические сети достигла максимума. Единственный выход из создавшегося положения — снижение потребления электроэнергии за счет более эффективного использования других видов энергии, в частности, тепловой, и внедрения энергосберегающих технологий. Сорбционная технология более выгодна по сравнению с конкурирующими технологиями с точки зрения воздействия на экономику и природоохранительного эффекта, имеет высокий научный и практический потенциал. Неэлектрические сорбционные машины могут использоваться как тепловые насосы, охладители, холодильники и теплотрансформаторы. Для Республики Беларусь требуется разработка сорбционной технологии с уклоном на внедрение и интеграцию сорбционных машин в промышленность, жилищно-коммунальное и сельское хозяйство для целей нагрева, охлаждения, утилизации тепла, и использование бросового тепла. Комбинированные системы выработки электроэнергии, утилизации тепла и генерации холода — оптимальное решение проблем республиканской энергетики.

Таблица 2

	Расчетная формула (индекс I=Г, Э, К, С)	Г	Э	К	С
Эквивалентное среднегодовое потребление газа за отопительный сезон, кг	$M_I = M_{\text{Г}} \times КПД_{\text{Г}}/КПД_I$	2270	6810	1945,7	1276,9
Годовая стоимость отопления в пересчете на газ, долларов США/год	$C_I = M_I \times S_f$	181,6	544,8	155,7	102,1
Среднегодовая экономия газа за год при замене соответствующей системы сорбционным тепловым насосом, кг	$\Delta M_{\text{Г}} = M_I - M_{\text{С}}$	993,1	5533,1	668,8	—
Ожидаемая прибыль, долларов США	$\Delta S_I = S_f \times \Delta M_I$	79,5	442,6	53,5	—
Предполагаемый срок возврата инвестиций, год	$T_I = [(C_{\text{С}} + CC) - (C_I + CI)]/\Delta S_I$	4,03	0,01	3,67	—