

Сорбционные термотрансформаторы: от теории к практике

Чтобы иметь возможность «поднять» известное количество тепла с низкого температурного уровня на высокий, необходимо совершать компенсирующий процесс, чтобы суммарная энтропия веществ, участвующих во всех процессах, оставалась бы, по крайней мере, неизменной [4].

Второй закон термодинамики не определяет характера компенсирующего процесса, так что специалисты имеют максимальную свободу выбора.

Из множества известных в технике термотрансформаторов термохимический компенсирующий процесс реализуется в сорбционных.

Несмотря на то что эти термотрансформаторы имеют столетнюю историю, настоящее их развитие началось в 30-е годы. Первыми исследователями были R.Mollier, F.Merkel, F.Bosnjakovic, работы которых в направлении поиска рабочего вещества (точнее, пары агент-сорбент), создания термодинамических основ, методов расчета в значительной мере предопределили дальнейшее развитие сорбционной техники. Большой вклад внес также Ed.Altenkirch. К его заслугам можно отнести разработку теории абсорбционных машин для кондиционирования воздуха; создание абсорбционных машин без механических насосов и машин со вспомогательным газом; разработку теории циркуляции раствора с помощью термосифонных насосов, обратной подачи раствора в абсорбер и генератор, машин с перекрытием температур, вторичного введения тепла ректификации в рабочий процесс с помощью охлаждения пара крепким раствором, абсорбционных тепловых насосов; создание термодинамических диаграмм для смесей рабочих веществ.

Наибольший интерес к сорбционной технике наблюдается за рубежом и в бывшем СССР в 50–60-е годы, когда выходят в свет основополагающие учебники и монографии по сорбционным машинам F.Bosnjakovic, Ed.Altenkirch, W.Niebergall, Л.М.Розенфельда, Б.М.Блиера, И.С.Бадилькеса [1, 3, 4, 7, 9, 11]. Эти публикации привлекали к разработке абсорбционных термотрансформаторов новое поколение ученых.

Единой классификации сорбционных термотрансформаторов до настоящего времени создать не удалось. Первые попытки разработки узкопрофильной классификации крупных водоаммиачных машин отражены в диссертации Б.А.Минкуса, а малых абсорбционно-диффузионных – в диссертации Л.И.Морозюк. В данной статье приведены лишь малоизученные и малоизвестные направления в области абсорбционных термотрансформаторов и современные перспективные направления исследований машин этих типов.

АДСОРБЦИОННЫЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРЫ

Простота устройства сорбционных машин с сухими поглотителями, работающих на чистых рабочих веществах без применения ректификации, издавна привлекала внимание специалистов. Однако периодичность работы, свойственная этим машинам, позволяла использовать их лишь в сравнительно узкой области «малых холодильных шкафов». Одну из первых сорбционных машин в Европе предложил R.Plank. Рабочим веществом являлась пара $\text{CaCl}_2\text{--NH}_3$, коэффициент преобразования (COP) составил 0,21. Стремление к обеспечению равномерности работы привело к созданию машин с двумя генераторами, в результате чего COP увеличился до 0,3.

Единственные в мире сорбционные машины промышленной производительности выпускались в СССР. Их разработкой и внедрением руководил Б.М.Блиер [2].

Безотказность, компактность и другие положительные характеристики этих машин привели к тому, что сорбционные холодильные машины стали объектом закрытого изучения, и на протяжении многих десятков лет, а точнее, до 1992 г., публикации в мире в этом направлении отсутствуют.

Конференции Международного института холода 1992 г. в Париже [9] и 1996 г. в Монреале [11] дали возможность специалистам представить результаты своей работы. Лидерами всестороннего изучения сорбционных холодильных машин оказались турецкие ученые, работавшие под руководством S.Ulku (COP создаваемых ими машин простого действия достиг 0,3–0,35) и группа французских ученых, возглавляемая F.Menieur (машины двойного действия с COP, равным 1,06).

Максимальное значение COP, равное 1,20... 1,30 для машин с сухими сорбентами, получено в 1979 г. в лаборатории реактивных двигателей Калифорнийского технологического института. Весьма специфична и оригинальна роль такой машины – создание криогенных устройств с неограниченным сроком действия для охлаждения чувствительных элементов инфракрасного излучения, предназначенных для межпланетных полетов. Однако спустя 10 лет эта же машина была разработана в качестве бытового теплового насоса [2].

Проведенные в Европе исследования пары агент-сухой сорбент выявили, что наилучшие показатели имеют машины с рабочей смесью активированный уголь– NH_3 [14].

АБСОРБЦИОННЫЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРЫ

Основным классификационным признаком для абсорбционных термотрансформаторов являются рабочие смеси, среди которых наиболее широко используются $\text{H}_2\text{O--LiBr}$ и $\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ [14].

Бромисто-литиевые машины нашли применение в

основном в системах кондиционирования воздуха. В бывшем СССР приоритет в их разработке принадлежал Л.М.Розенфельду, Б.И.Псахису [7], коллективу ученых кафедры холодильных машин ЛТИХП (ныне Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий) [12].

Теория бромисто-литиевых термотрансформаторов в некоторой степени достигла своего предела, а температурный уровень практического применения составил 0 °С. Однако "примитивность" свойств рабочей смеси – отсутствие паров абсорбента, т.е. процесса ректификации, а также теплоты смешения – делают эту смесь идеальным научно-исследовательским материалом для создания математических моделей расчета и проверки их адекватности, методик термодинамического и термоэкономического анализа и т.д.

Наиболее перспективен для применения водоаммиачный раствор [14].

Не будем останавливаться на простых водоаммиачных термотрансформаторах ввиду их известности и многократного описания в работах. Все новое и современное в области водоаммиачных абсорбционных термотрансформаторов – незабытые старые идеи, высказанные еще в 20–30-е годы E.Altenkirch и реализуемые только сейчас благодаря современному уровню техники, технологии, науки.

Специальные типы абсорбционных термотрансформаторов

Многоступенчатые абсорбционные термотрансформаторы более известны в мире как "thermotransformer with double and triple-effect", что очень часто неверно переводится как машины, производящие одновременно тепло и холод (на нескольких температурных уровнях). Принципиальное отличие многоступенчатых абсорбционных термотрансформаторов от термотрансформаторов со ступенчатыми процессами заключается в том, что давление генерации предыдущей ступени равно давлению абсорбции последующей. При этом каждый генератор (если того требует рабочее вещество) дополняется системой "очистки пара", т.е. ректификационным устройством. Именно поэтому водоаммиачные абсорбционные термотрансформаторы с "double and triple-effect" рассматриваются лишь теоретически. Бромистолитиевые термотрансформаторы, другие абсорбционные и адсорбционные термотрансформаторы с подобными эффектами зарекомендовали себя надежными и экономичными машинами [3, 6, 14].

Термотрансформаторы, работающие с превышением температур, с многократным обогревом, с применением обратной подачи растворов, каскадные и "Компаунд", термоконденсационные машины и многие другие специальные типы абсорбционных термотрансформаторов, теория которых была рассмотрена Б.М.Блиером, Л.М.Розенфельдом и Б.А.Минкусом, еще требуют пристального изучения специалистами. Недостаток рассматриваемых машин – большая металлоемкость, однако с появлением новых типов компактных тепло- и массообменных аппаратов они могут оказаться намного эффективнее ныне известных и применяемых машин.

Отрадно отметить, что именно одесской школе абсорбционщиков принадлежит приоритет в изучении этих типов термотрансформаторов.

Многopotочные абсорбционные термотрансформаторы

Во всех существующих термохимических компрессорах абсорбционных термотрансформаторов использован кругооборот из одного восходящего потока крепкого раствора и одного нисходящего потока слабого раствора. Между тем возможно создание термохимического компрессора с несколькими восходящими потоками крепкого раствора и несколькими нисходящими потоками слабого раствора. При этом число восходящих и нисходящих потоков может быть как равным, так и неравным друг другу.

Потоки слабого раствора получаются в результате нагревания отдельных частей раствора до разных температур, потоки крепкого раствора – в результате охлаждения отдельных частей раствора в процессе абсорбции до различных температур. Число регулирующих вентилей для слабого раствора равно числу нисходящих потоков, а число насосов для подачи крепкого раствора – числу восходящих потоков.

Циклы с многopotочной подачей раствора более известны как "циклы с расширенной зоной дегазации". При этом основной процесс абсорбционного термотрансформатора может быть связан с процессами в термохимическом компрессоре, а может проходить совершенно самостоятельно.

Особый интерес представляет трехпоточный (один нисходящий и два восходящих потока) абсорбционный термотрансформатор с обращенным ректификатором. Исследованиями этих термотрансформаторов занимаются три научные школы:

- Technische Universitaet Munich (Германия) – до 1995 г. это направление возглавлял профессор G.Alefeld, а в настоящее время его многочисленные ученики идею обращенной ректификации воплощают в других областях, связанных с абсорбцией;

- Ecole des mines de Nancy (Франция) – в этом направлении с начала 70-х годов работают профессор P.Le Goff и его ученик J.Labidi в Канаде (для различных рабочих смесей);

- Одесская государственная академия холода.

Одесским ученым принадлежит приоритет в термодинамическом исследовании и анализе процессов обращенной ректификации. Они установили, что главный вопрос по поводу необходимости охлаждения обращенного ректификатора может быть решен через призму химических свойств рабочих веществ.

Термотрансформаторы с последовательной абсорбцией, с последовательной генерацией, с многоступенчатой материальной регенерацией и т.п. находят сейчас все большее применение.

Абсорбционно-компрессорные термотрансформаторы

Показателем эффективности работы абсорбционного термотрансформатора служит величина зоны дегазации – разность концентраций крепкого и слабого растворов, которая зависит от сочетания температур греющего источника, охлаждающей среды и производимого холода. В свою очередь, на основании второго закона термодинамики температура греющего источника определяется двумя другими, т.е. из трех температурных уровней только два выбирают произвольно. При нулевом и отрицательном значениях величины зоны дегазации простейший

одноступенчатый цикл неосуществим даже теоретически, однако эти случаи наиболее часто встречаются при современных температурных режимах работы – при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в качестве греющего источника, а также охлаждающей среды с повышенной температурой (отопление и горячее водоснабжение).

При создании абсорбционных термотрансформаторов на рассматриваемых температурных уровнях эксплуатации применяют гибридные схемы: абсорбционно-компрессорные и их частный случай – абсорбционно-эжекторные.

Компрессор в качестве дожимающего устройства между испарителем и абсорбером применяют в низкотемпературных холодильных машинах. Вначале для привода компрессора использовали электроэнергию. Известно также и применение с этой целью эжектора. Низкотемпературные водоаммиачные абсорбционные холодильные машины широкого применения не нашли, поэтому развитие гибридных абсорбционных термотрансформаторов идет в направлении тепловых насосов и теплофикационных машин. Многообразие схемных решений основано на термодинамическом анализе циклов.

Если располагаемые исходные температуры обеспечивают величину зоны дегазации больше 6%, то возможно организовать внутренний энергопроизводящий контур с целью выработки механической энергии для привода компрессора и избежать дополнительного подвода электрической энергии (кроме привода насосов). Таким образом, гибридный термотрансформатор становится работоспособным и полностью теплоиспользующим при любом сочетании исходных температурных уровней его работы.

Абсорбционно-диффузионные холодильные машины

В состав малой абсорбционной холодильной техники входят абсорбционно-диффузионные холодильные машины и тепловые насосы. COP первых машин составлял 0,12–0,17. Особенно интенсивно малая абсорбционная техника развивалась в 50-е годы. В 1962 г. фирма Sibir (Швейцария) представила на рынок машины с COP, равным 0,37, а в 1968 г. выпустила холодильный агрегат с коэффициентом преобразования 0,51. В настоящее время она поставляет на рынок абсорбционно-диффузионные тепловые насосы теплопроизводительностью 3 кВт или холодопроизводительностью 1 кВт.

Большую роль в развитии этих машин сыграла ленинградская школа под руководством Н.П.Третьякова. Ей принадлежат работы по совершенствованию энергетических характеристик генераторов, улучшению процессов в парогазовом теплообменнике, созданию основ теплотехнических расчетов испарителя и абсорбера с помощью критериальных уравнений, точность которых достаточна для инженерной практики, а также прикладных программ для расчета на ЭВМ термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ.

За рубежом научные исследования в тех же направлениях проводили N.Eber, D.A.Kouremenos, A.Stegou-Sagia, сотрудники фирмы Sibir. Среди современных исследователей абсорбционно-диф-

фузионных холодильных машин особо следует отметить H.Stierhn – генерального директора фирмы Sibir. Он разработал основы термодинамического анализа абсорбционных систем, исследовал особенности циркуляции парогазовой смеси в низкотемпературных машинах. Именно его работы послужили основой для создания нового поколения абсорбционно-диффузионных холодильных машин.

Теоретические исследования в области термодинамического анализа циклов, процессов в генераторах и парогазовых контурах, изучение влияния психрометрической разности температур в парогазовом контуре на его схему и цикл всей машины, создание инженерной методики теплотехнических расчетов и систематизации схем для последующего функционального проектирования и оптимизации принадлежат одесской школе [5].

Абсорбционно-диффузионные холодильные машины малой производительности являются новым и перспективным направлением в научной деятельности уже упоминавшейся французской школы. Работы, проведенные в ОГАХ, включены в базу данных по этим машинам в части термодинамического анализа и синтеза систем, теории проведения испытаний и конструкции экспериментальных стендов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадилькес И.С., Данилов Р.Л. Абсорбционные холодильные машины. – М.: Пищевая промышленность, 1966.
2. Бльер Б.М. Сухая абсорбционная холодильная установка для сепараторных станций // Холодильная техника. 1936. № 2.
3. Бльер Б.М., Вургафт А.В. Теоретические основы проектирования абсорбционных термотрансформаторов. – М.: Пищевая промышленность, 1971.
4. Бошнякович Ф. Техническая термодинамика. Часть вторая. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1956.
5. Повышение надежности термосифона абсорбционной холодильной машины/ А.М.Пилипенко, Л.И.Морозюк, В.Н. Тихонова, В.Н.Шмелева// Холодильная техника. 1989. № 12.
6. Розенфельд Л.М., Ткачев А.Г. Холодильные машины и аппараты. –М.: Госторгиздат, 1955.
7. Розенфельд Л.М., Псахис Б.И. Анализ влияния параметров абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с помощью математической модели // Изв. СО АН СССР. Серия технических наук № 3, вып. 1.
8. Altenkirch E. Absorption - kaltemaschinen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1954.
9. Menieur F. Solid sorption refrigeration. Proceesings of the IIF/IIR Symposium, Paris< France, 1992.
10. Niebergall W. Sorption-Kaelte-maschinen, Berlin, Springer, 1959.
11. Nikanpur D., Hosante S. Ab-Sorption'96 - Towards sustainable technologies. Proceedings of the International Ab-Sorption Heat Pump Conference, Montreal, Canada. 1996.
12. Orekhov I., Timofeyevsky L., Dolotov A. A complex mathematical model for assessment of effectiveness of absorption, resorption-compression and vapor-compression heat pumps // Proceedings of 19-th International Congress of Refrigeration, The Haag, The Netherlands, 1995, Vol.4b, p. 1221-1226.
13. Stierlin H. Last Developments in Domestic Absorption Refrigerators and the Future Out-Look. Progress in Refrigeration Science and Technology//Proceedings of the XII International Congress of Refrigeration, Madrid, 1967.
14. Thermodynamuc based comparison of absorption systems for cooling and heat pumping/ Pons M. et all // Int.J.Refrig., 1999, Vol.22, No.1.