

Проф. В.В. САМОНИН, Е.В. БУЗИН  
Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт  
(технический университет)

# СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ АДсорбЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Холодильная техника имеет, несомненно, жизненно важное значение в современном мире. Без широкого использования кондиционирования воздуха, процессов холодильной технологии пищевых продуктов, применения искусственного охлаждения в самых разнообразных отраслях промышленности, энергетике, медицине невозможны были бы научно-технический прогресс и современное развитие экономики.

Однако существующие подходы к охлаждению не всегда однозначны, а применение традиционных схем охлаждения не всегда позитивно. Такая неоднозначность выражается в необходимости отказа от применения в качестве хладагентов веществ, негативно воздействующих на окружающую среду. Связанные с разрушением озонового слоя и глобальным потеплением драматические коллизии последнего десятилетия предупреждают нас о том, что в будущих системах охлаждения и кондиционирования едва ли найдется место применению традиционных методов охлаждения с использованием в качестве хладагентов веществ, представляющих опасность для атмосферы Земли (CFC, HCFC). Труды многих лет по созданию нетоксичных и пожаробезопасных хладагентов остались в прошлом после обнаружения озоновых дыр и влияния глобального потепления на атмосферу Земли. Применение же новых смесей не всегда оказывается перспективным, поскольку требуется значительное усложнение конструкций холодильного оборудования, а следовательно, и привлечение более квалифицированных кадров.

*A literature review oriented to determine a position of adsorption cooling in the refrigerating engineering is presented. It is shown that alternative methods of cooling became important for consideration since the image of traditional ones had become globally mixed. The prospects for adsorption cooling associated with the discovery of fundamentally new sorption materials and methods of their studying are considered. Some details of original investigation carried out at the SPb. St. Technical University are also presented.*

После принятия Монреальского протокола значительно шире в мире стали использовать аммиак, углеводороды и синтетические хладагенты без атомов хлора. Аммиак никак не угрожает атмосфере Земли в целом, однако он ядовит и образует с воздухом взрывчатую смесь. Углеводороды, в свою очередь, имеют нулевой потенциал разрушения озонового слоя и пренебрежимо малый потенциал глобального потепления, но и у них есть «ахиллесова пята» — горючесть.

Со временем проблема энергосбережения становится все актуальнее. Один из массовых потребителей холода — бытовая холодильная техника, поглощающая сегодня свыше 20 % всей производимой в мире энергии. Для уменьшения ее «аппетита», а также для снижения теплового загрязнения окружающей среды необходим поиск методов получения холода с меньшими энергозатратами или с использованием более дешевых видов энергии.

Наряду с указанными проблемами постоянно повышаются требования к вновь создаваемому холодильному оборудованию. Это касается увеличения его эффективности, снижения шума, электромагнитных излучений и вибраций.

Как выход предполагается широко использовать тепловые насосы,

регенерацию теплоты и новые циклы. Этим можно объяснить постоянно возрастающий в последнее время интерес к альтернативным методам охлаждения. Особенно перспективными представляются следующие из них.

- «Использование так называемой природной стратегии, т.е. развитие производства и применения природных хладагентов», — так определяют перспективы развития тепловых насосов в XXI в. норвежские ученые (E. Strommen et al., 1999). Речь идет об использовании диоксида углерода в системах кондиционирования воздуха и в тепловых насосах для подогрева воды [5]. Особый интерес исследователей вызывают кондиционеры для автомобилей на диоксиде углерода.

Американские ученые (Paul J. Jahn E., 1996) предлагают использовать воду в качестве хладагента для охлаждения воды и изготовления льда [12]. Такая стратегия, без сомнения, актуальна. Однако наряду с усложнением конструкции холодильного оборудования (в некоторых случаях применение системы многоступенчатого сжатия) остаются другие недостатки, присущие парокомпрессионному методу охлаждения: шум, вибрации и др.

- Применение воздуха в качестве хладагента в воздушных холодильных машинах. Еще в 1932 г. Ранк экспериментально доказал, что темпера-

туры движущегося воздуха у оси и на периферии циклона различны. Температура холодного воздуха на 30...70 °С ниже его начальной температуры. Большие необратимые потери при расширении воздуха в вихревой трубе предопределяют сравнительно высокие энергетические затраты, которые значительно превышают затраты при изотропном расширении с совершением внешней работы. Однако не всегда результат энергетического сопоставления может быть решающим при оценке холодильных систем. Исключительная же простота и надежность вихревой трубы делают ее в некоторых случаях более предпочтительной. Кроме того, последние технические и технологические достижения (в отношении шумоизоляции, снижения гидравлических сопротивлений) позволяют рассчитывать на существенное улучшение показателей воздушных холодильных машин [5].

• *Более интенсивное использование термоэлектрического охлаждения.* В последнее десятилетие наблюдается очевидное оживление интереса к термоэлектрическому охлаждению [3]. Это связано в первую очередь с выгодными особенностями термоэлектрических охлаждающих устройств в сравнении с парокомпрессионными и другими типами холодильных машин. Термоэлектрическое охлаждение, как известно, основано на эффекте Пельтье. Термоэлектрические холодильники абсолютно безопасны с экологической точки зрения, не имеют изнашивающихся и трущихся элементов, а следовательно, бесшумны в работе, характеризуются отсутствием вибраций, не нуждаются в штатных устройствах очистки рабочих веществ, способны устойчиво работать десятилетиями. Ряд других преимуществ термоэлектрических холодильников — возможность не только охлаждения, но и нагрева; исключительная высокая надежность компонентов, вырабатывающих холод; высокая

точность регулировки температуры и возможность термостатирования; выгодные массогабаритные характеристики и др.) делает их перспективными для использования в системах охлаждения, даже несмотря на достаточно низкую энергетическую эффективность. Интенсивные исследования в области термоэлектричества и использование эффекта сверхпроводимости открывают новые возможности для еще более широкого использования термоэлектрического охлаждения.

• *Применение адсорбционного охлаждения.* К оставшемуся до недавнего времени без должного внимания адсорбционному охлаждению в настоящее время проявляют повышенный интерес. Последнее объясняется выгодными отличиями данного способа охлаждения от существующих, в том числе от парокомпрессионного.

Адсорбционное охлаждение заключается в интенсификации испарения хладагента путем применения сорбента (цеолит, силикагель). Действие адсорбционной холодильной установки подобно циклу, осуществляемому в парокомпрессионной холодильной машине. Отличие состоит в том, что вместо механического компрессора для сжатия и конденсации паров газообразного хладагента применяют сорбент, способный поглощать некоторые вещества при одних значениях давления и температуры, а регенерировать их пары — при других.

Несомненное преимущество такого способа охлаждения заключается в использовании в качестве хладагента веществ, безопасных с экологической точки зрения, в том числе обычной воды. Отсутствие механического компрессора делает такой холодильник абсолютно бесшумным. Он характеризуется отсутствием вибраций и электромагнитных излучений, способен устойчиво работать неограниченное время, а при эксплуатации его нет необходимости в штатных устройствах очистки рабочих тел.

Кроме того, в качестве источника энергии, требуемой для периодической регенерации сорбента, совсем не обязательно использовать электрическую энергию. Холодильник такого типа может работать на тепловых выбросах (с этой точки зрения перспективно его оформление, например, как кондиционера в салоне автомобиля, работающего на выхлопных газах) или использовать теплоту низких рабочих параметров и стоимости (горячие жидкости и газы, топочные газы, греющий пар и т.д.). Следовательно, такой холодильник может быть абсолютно беззатратным и с его помощью может быть решена проблема теплового загрязнения окружающей среды.

Исследования по данной тематике, аналогичные проводимому в СПбГТУ (ТИ), в России и странах СНГ больше не проводятся. Вместе с тем число публикаций зарубежных авторов по теме «адсорбционные холодильники» все время увеличивается, причем «пик» приходится на последние два года. Среди журналов, содержащих максимальное число публикаций по этой теме, следует отметить «Renewable Energy», «Heat-Mass Transfer», «Energy», «Microporous and Mesoporous Materials», «Cryogenics» и др.

На существенную потребность в холодильных системах, работающих с использованием теплоты, для стран с жарким климатом или при отсутствии надежного электропитания указывает R.E. Critoph. В качестве таких систем предлагается применять адсорбционные холодильники с парой активный уголь — аммиак, работающие на теплоте пара, конденсирующегося в тепловой трубе, выполненной в виде термосифона [7]. Источником теплоты могут быть солнечная энергия, биомасса или их комбинация. Для применения в качестве адсорбента был специально разработан монолитный углеродный адсорбент на основе алюминия. Автор приводит впечатляющие дан-

ные о работе холодильника: последний способен развивать холодопроизводительность 1 кВт в расчете на 1 кг сорбента. Если представленные цифры не носят рекламного характера и реально соответствуют действительности, то такие системы способны бросить вызов разработчикам систем охлаждения будущего.

Тот же автор совместно с другими учеными [8, 15] представил результаты исследований теплофизических свойств созданного композитного материала. Даются также подробное описание отдельных частей конструкции холодильника и числовая модель работы холодильника в тропическом климате.

Заинтересованность специалистов областью адсорбционного охлаждения возникла в результате установления самой возможности работы таких холодильных систем на солнечной энергии в странах с жарким климатом. Например, R. Best и N. Ortega, выполнив литературный обзор по технологиям охлаждения с использованием тепловой энергии Солнца, пришли к выводу, что применение таких технологий может стать перспективным. Вместе с тем они отмечают [6], что на данный момент такие системы не могут конкурировать с традиционными методами охлаждения из-за экономических соображений. К тому же экономика часто зависит от легитимных актов, подобных Монреальскому протоколу, поэтому критерии, определяющие в конечном счете выбор того или иного хладагента, не всегда однозначны.

За последние несколько лет исследования в данной области продвинулись весьма значительно. Если в 1994 г. J. Reichelt, Германия, например, еще только предлагал использовать адсорбционные установки [13], то к настоящему времени уже имеются публикации по математическому моделированию адсорбции. Так, S. O. Enibe et al. (2000) создали алгоритм для компьютерного моделирования адсор-

бции в сорбционном холодильнике, работающем на солнечной энергии. На его основе построена математическая модель системы и создана компьютерная программа «COSSOR», состоящая из основной короткой программы и 50 подпрограмм [10].

J. Wang, L. Zhang (1999) детально исследовали движущие силы и механизмы тепломассопереноса в адсорбенте сорбционной холодильной системы, работающей на бросовой теплоте. Авторы представили трехмерную пространственную неравновесную модель для исследования одновременного переноса теплоты и массы. Модель выдержана в строгом теоретическом оформлении и хорошо согласуется с экспериментальными данными [17].

L. Duband, B. Collaudin предлагают использовать в космосе адсорбционные установки в качестве криоохладителей. Требования надежности, простоты, отсутствия трения или вообще движущихся элементов не оставляют выбора разработчикам капсул космических летательных аппаратов. Ученые представили большой экспериментальный материал [9]. Хотя в качестве хладагента применяли жидкий гелий, основные экспериментальные зависимости с достаточно высокой степенью достоверности можно использовать и в пересчете на другие вещества, в том числе на воду.

Всестороннее изучение адсорбции в холодильной системе с парой цеолит — вода проведено L. Zhenyan et al. (1998). В качестве адсорбента предлагается композиция цеолит — активный уголь (CZACA) [18]. Посредством введения активного угля в слой цеолита ученым удалось добиться резкого усиления теплопереноса в материале сорбента и значительного уменьшения длительности стадии десорбции. Данная холодильная система, выполненная в виде тепловой трубы, для периодической регенерации адсорбента использует солнечную энергию. Авторы представили также экспериментальные данные по

работе холодильника и оценили влияние некоторых рабочих параметров на функционирование системы.

S. Techajunta et al. (1999) предлагают применять в качестве адсорбента для кондиционеров силикагель, причем не только для охлаждения, но и для осушки влажного воздуха [16]. Аналитическая модель осушки хорошо согласуется с экспериментальными данными. Расчетами показано, что такие кондиционеры можно использовать для работы во влажном тропическом климате, когда днем проводится регенерация сорбента, а процессы охлаждения и осушки происходят ночью.

Обширный экспериментальный материал получен учеными K. Sumathy et al. (1999) для машины по производству льда, работающей на солнечной энергии. В своей статье [14] они приводят описание холодильника и принцип его действия. В качестве адсорбента в нем применяется активный уголь, а хладагентом служит метанол. Однако наиболее ценным в их исследовании представляется конструкция коллектора (испарителя) для производства льда в количестве 4...5 кг/день. КПД самой холодильной машины невелик и составляет лишь 0,10 — 0,12.

Создаваемые многими авторами композиционные материалы для применения в качестве адсорбентов и сорбционные холодильники на их основе, а также новые идеи аппаратного оформления процесса, сами конструкции и даже программные материалы в большинстве случаев патентуются, что отражено в сообщениях о патентах [11].

С учетом всего сказанного ранее по выполненному литературному обзору можно сделать следующие выводы.

В последнее время наблюдается наиболее устойчивый интерес к адсорбционному охлаждению. Широкие перспективы, открывшиеся в области создания новых компо-

лиционных сорбирующих материалов, позволяют рассчитывать на существенное улучшение характеристик адсорбционных холодильников. К настоящему времени такие материалы активно используются. Значительные успехи достигнуты и в области теоретического описания процессов тепло- и массообмена в слое адсорбента.

В некоторых случаях имеются детально разработанные математические модели таких процессов и построенные на их основе компьютерные программы, что говорит о высоком уровне данных исследований. Кроме того, решено множество инженерных задач и найдены оптимальные конструкции адсорбционных холодильников. Нарботан большой экспериментальный материал. Наблюдается существенное улучшение параметров сорбционных холодильников. Эти результаты получены в лабораториях разных стран и успешно воспроизводятся. В связи с этим можно надеяться, что адсорбционное охлаждение уже в обозримом будущем прочно войдет в нашу жизнь.

Исследование, которым занимаются авторы данной статьи, специалисты в области адсорбционной техники, посвящено созданию и исследованию адсорбционного холодильника для получения умеренного холода, а также разработке научных основ его функционирования. Были исследованы различные типы сорбентов, определены их кинетические, динамические и другие характеристики [1 — 4]. В результате было показано, что наибольшие преимущества для применения в сорбционном холодильнике имеют массивные влагопоглотители. Благодаря значительным емкостным характеристикам в них не требуются высокие температуры регенерации. Поэтому для работы такого холодильника может быть использована теплота низких рабочих параметров. Стоимость влагопоглотителей рассматриваемого типа и дистиллированной воды, применяемых в

сорбционном холодильнике, несравнима со стоимостью компрессора и фреонов в парокомпрессионной холодильной машине. Поэтому для производства таких холодильников существует и веский экономический побудительный мотив.

Расчетами показано, что по массогабаритным характеристикам сорбционные холодильники могут быть даже более выгодными (в 1,2 — 1,5 раза), чем парокомпрессионные холодильные машины (ПКХМ). Энергетическая эффективность их сопоставима с эффективностью ПКХМ в области малых и средних холодопроизводительностей. Расчетные значения КПД составляют 0,3 — 0,5 в зависимости от температурного уровня охлаждения. Экспериментальные данные подтвердили правильность расчетов и наглядно демонстрируют перспективность дальнейших исследований [1, 2, 4].

Построены материальные и тепловые балансы процессов кипения и конденсации, адсорбции и десорбции, а также тепловой баланс внешнего источника энергии. Разработаны алгоритмы математического расчета этих балансов и на их основе — простейшие компьютерные программы.

В свете современного состояния техники адсорбционного охлаждения направление, которым занимаются авторы данной статьи, представляется перспективным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Бузин Е.В., Самонин В.В. Адсорбционный холодильник — новое направление в холодильной технике // Тезисы докладов III научно-технической конференции аспирантов СПбГТИ (ТУ), посвященной памяти Ю.Н.Кукушкина. Ч. II. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2000.
2. Бузин Е.В., Самонин В.В. Разработка, конструирование и изучение сорбционного холодильника // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов и аспирантов. «Дни науки - 99» — СПб: СПбГУТД, 1999.
3. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: состояние и перспективы // Холодильная техника. 1999. № 7.

4. Каменков П.К., Самонин В.В. Адсорбционный холодильник // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов и аспирантов // Вестн. СПб. Гос.ун-та техн. и дизайна. — СПб.: СПбГУТИ, 1998.

5. Материалы XX Международного конгресса по холоду. — Сидней (Австралия), 1999.

6. Best, R., Ortega, N. Solar refrigeration and cooling. // Renewable Energy, 16 (1999), 1 — 4 (январь 04).

7. Critoph, R.E. Rapid cycling solar/biomass powered adsorption refrigerating system. // Renewable Energy, 16 (1999), 1 — 4 (январь 04).

8. Critoph, R.E., Taimanat-Telto, Z. Thermophysical properties of monolithic carbon. // Heat-Mass Transfer, 43 (2000), 11 июнь (01).

9. Duband L., Collaudin B. Sorption coolers development at CE A - SBT. // Cryogenics, 39 (1999), 8 (август).

10. Enibe, S.O., Jecje, O.C. COSSOR - a transient simulation program for a solid adsorption solar - refrigerator. // Renewable Energy, 19 (2000), 3 (март).

11. Patents Report - Ref.: 99. PRpt - 6, pp. 313 - 354. // Microporous and Mesoporous Materials, 33 (1999), 1 — 3 (декабрь 15).

12. Paul J., Jahn E. Использование воды в качестве хладагента для охлаждения воды и получения льда // Proc. 1996 int. Conf. Ozone Prot. Techol., Washington, US., 1996. 10. 21 — 23, 313 — 321. БМИХ, 1997, № 5.

13. Reichelt J. Новые соображения относительно охлаждения и кондиционирования автомобилей. Альтернативные конструкции. Klima Kalte Heiz (Германия), 1993, 11, vol. 21, № 11. БМИХ, 1994, № 4.

14. Sumathy, K., et al. Experiments with solar powered adsorption icemaker. // Renewable Energy, 16 (1999), 1 - 4 (январь 04).

15. Taimanat-Telto, Z., Critoph, R.E. Solar sorption refrigerator using a CPC collector. // Renewable Energy 16 (1999), 1 — 4 (январь 04).

16. Techajunta, S. et al. Experiments in a solar simulator on solid desiccant regeneration and air dehumidification for air-conditioning in tropical humid climate. // Renewable Energy, 17 (1999), 4 (август 01).

17. Wang, J., Zhang, L.Z. Momentum and heat transfer in the adsorbent of a waste-heat adsorption cooling system. // Energy, 24 (1999), 7 (июль).

18. Zhenyan L. et al. Zeolite - active carbon compound adsorbent and its use in adsorption solar cooling tube. // Solar Energy Materials and Solar Cells, 52 (1998), 1 — 2 (март 16).