

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, лауреат Государственной премии и Премии Совета Министров СССР, проф., д.т.н., зав.лабораторией пористых сред ГНУ «ИТМО им.А.В. Лыкова» НАН Беларуси

Сорбционные тепловые насосы для Республики Беларусь

На современном этапе экономического развития в Республике Беларусь существует острая необходимость в рациональном использовании энергии и топлива. Это относится, прежде всего, к природному газу в связи с проблемами его поставок из России в Беларусь. Поэтому для целей нагрева и охлаждения воздуха/воды экономически выгодно применение тепловых насосов, позволяющих до 30% понизить расход топлива. В Беларуси такие насосы применяются в основном для нагрева, хотя в некоторый период летнего времени возможно их применение для охлаждения воздуха/воды. В данной статье основное внимание уделено тепловым насосам небольшой мощности, используемым для систем кондиционирования с автоматическим переключением из состояния нагрева в состояние охлаждения (воздух/вода).

В мировой практике для достижения указанной цели широко используются парокомпрессионные тепловые насосы с электрическим приводом [1], в которых вместо экологически опасного хладона R22 используются экологически безопасные хладоны R 410A и R 407C. Экологически безопасными рабочими жидкостями для тепловых насосов являются также пропан, пропилен, аммиак и CO_2 . Однако в последние годы появились публикации, посвященные разработке и внедрению сорбционных (абсорбционных и адсорбционных) тепловых насосов с газовым приводом (пламя, газовые горелки). К сожалению, серийное производство сорбционных тепловых насосов пока имеет место только в Японии и США, хотя в последние два-три года Китай также приступил к их серийному производству (в составе систем бромистый литий-вода).

Одним из важных компонентов сорбционных тепловых насосов является низкотемпературный источник энергии, который в существенной степени влияет на конструкцию теплового насоса с точки зрения экономики и охраны окружающей среды. К такому относятся: атмосферный воздух, отходящий воздух помещений (вентиляционные выбросы), вода рек и озер, грунт и грунтовые воды, скалистые породы.

Следует указать на перспективную и экономически выгодную комбинацию сорбционных тепловых насосов с теплообменниками на тепловых трубах для утилизации теплоты грунта, грунтовых вод, рек и озер, скалистых пород [3]. Очевидно, что эффективность работы теплового насоса зависит не только от сорбционной емкости сорбентов, но и от степени совершенства теплообменников (интенсификация тепло- и массообмена в сорбционных системах, испарителях и конденсаторах).

Тепло- и массообмен в сорбционных тепловых насосах

В настоящее время существует два типа сорбционных тепловых насосов с тепловым приводом (пламя, горячая вода, нагретый воздух, отходящие газы, отработанный пар и т.д.), представляющие интерес для практики:

а) абсорбционные тепловые насосы с применением жидких сорбентов (аммиак - вода, бромистый литий - вода);

б) адсорбционные тепловые насосы с использованием твердых сорбентов.

Как абсорбционные, так и адсорбционные тепловые насосы имеют свои преимущества и недостатки. Общим для указанных тепловых насосов является тепловой привод (пламя, горячий газ, вода, солнечная энергия и т.д.) — они не требуют применения электрических компрессоров для выработки теплоты и холода.

1. Абсорбционные тепловые насосы

В абсорбционных тепловых насосах используется явление абсорбции паров низкотемпературных жидкостей пленками высокотемпературных жидкостей. На практике наибольшее распространение получили пары $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, используемые в системах кондиционирования, и $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, используемые в холодильной технике. Однако имеются публикации, в которых описаны новые пары рабочих жидкостей — органические теплоносители. Основным преимуществом абсорбционных тепловых насосов по сравнению с адсорбционными является организация постоянного (во времени) процесса сорбции/десорбции, что сказывается на повышении эффективности COP работы теплового насоса. 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.

В абсорбционных тепловых насосах основное внимание уделяется теплообмену пленок раствора солей в жидкости LiBr/ H_2O (либо жидкости в жидкости $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) с горячей стенкой (десорбция) и холодной стенкой (абсорбция). Для пары $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ характерна десорбция аммиака при нагреве раствора. Аммиак конденсируется в конденсаторе теплового насоса и попадает в его испаритель, где происходит его испарение. При охлаждении обедненного раствора аммиака в воде возникают благоприятные условия для абсорбции паров аммиака охлажденной жидкостью. Оба процесса сопровождаются тепловыми эффектами (поглощение теплоты/выделение теплоты). Интенсификация процесса тепло- и массообмена при абсорбции паров аммиака водой возможна при применении специальных добавок, уменьшающих поверхностное натяжение воды. Поскольку раствор $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ является наиболее распространенным в серийно изготавливаемых тепловых насосах, много публикаций посвящено исследованию влияния поверхностно-активных веществ на интенсификацию абсорбции паров воды раствором. Безусловно, вязкость жидкости и ее поверхностное натяжение оказывают существенное влияние на гидродинамику стекающих пленок. Градиенты концентрации и температуры в процессе абсорбции паров воды обогащенным раствором интенсифицируют перемешивание слоев жидкости в пленке и теплообмен.

Для справки.

В настоящее время только 450 тысяч из 9 миллионов тепловых насосов, установленных в мире, находится в Европе и используется в основном по циклу газ - газ для целей нагрева зимой и охлаждения летом. 135 тысяч из них находится в центральной Европе и предназначено для целей нагрева воздуха и воды. Спрос на тепловые насосы удовлетворяется в основном за счет импорта из США и Японии. Поэтому национальные программы производства тепловых насосов всячески приветствуются и стимулируются. В Швейцарии 40 % новых одно- и двухквартирных домов снабжено тепловыми насосами. Аналогичная ситуация и в Австрии. Для домов индивидуального пользования большой интерес представляют адсорбционные тепловые насосы малой мощности (цеолиты - вода; силикагели + соли - вода; активированные угли - спирт и т.д.) [2].

Соответственно наличие поверхностно-активных добавок в пленках на горячей поверхности теплообмена (десорбция) замедляет процесс тепло- и массообмена. Однако пока это только гипотеза, нуждающаяся в проверке. В тепловых насосах на

жидких сорбентах широко распространен способ утилизации теплоты генератора (высокотемпературный теплообменник) для предварительного подогрева абсорбера (низкотемпературный теплообменник). Такой способ утилизации теплоты носит название GAX (Generator-Absorber Heat Exchange).

2. Адсорбционные тепловые насосы

Принцип работы адсорбционных тепловых насосов 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. 1 [4].

Наиболее широкое применение в качестве сорбентов для систем кондиционирования и вентиляции 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 углеродное волокно и аммиак, цеолит и вода. Для расчета пары сорбат/сорбент в тепловом насосе нужно знать следующие параметры:

1) сорбционная емкость (находится в соответствии с уравнением Дубинина - Радужевиича) при $P_{нас}(T, w)$:

$$\log V = \log(V_0) - k \cdot \left(\log \frac{P_0}{P} \right)^2,$$

где $k = 2,303 \cdot K \cdot \left(\frac{R \cdot T}{\beta} \right)^2$;

2) свойства жидкости: $\rho_{жст} c_{жст} c_m P_{нас}(T)$, идеальный газ;

3) теплота сорбции: $q_{адс}(T, w) = -r \left[\frac{\partial \ln(p_{нас})}{\partial (1/T)} \right]_{p, w}$;

4) теплоемкость: $\left[\frac{\partial c_{pw}}{\partial w} \right]_{p, T} = - \left[\frac{\partial r_{pT}}{\partial T} \right]_{p, w} = c_{pv} - c_{p_{жст}}^{адс}$;

5) энтальпия $h_{адс}$;

6) энтропия $S_{адс}(T, w)$.

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

$$COP = \frac{L \delta m}{\delta m \Delta H + \sum m C_p \Delta T} < \frac{L}{\Delta H},$$

где $\frac{L}{\Delta H}$ — эффективность цикла Карно для заданной пары сорбат/сорбент;

L — скрытая теплота парообразования;

ΔH — теплота сорбции.

Конструкция насоса (теплоемкость металлических элементов) в существенной степени влияет на его эффективность. Чем меньше теплоемкость металлических компонентов и перепад температуры между испарителем и конденсатором, тем выше COP. **Преимуществом** адсорбционных тепловых насосов по сравнению с абсорбционными является возможность их использования в широком диапазоне температуры, нечувствительность к полю тяжести (что особенно важно при использовании тепловых насосов на транспорте). **Недостатком** адсорбционных тепловых насосов является периодичность их работы (требуется периодический процесс нагрева/охлаждения сорбента), приводящая 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 COP теплового насоса. Применение способа конвективного нагрева/охлаждения сорбента ускоряет цикл в тепловом насосе и решает

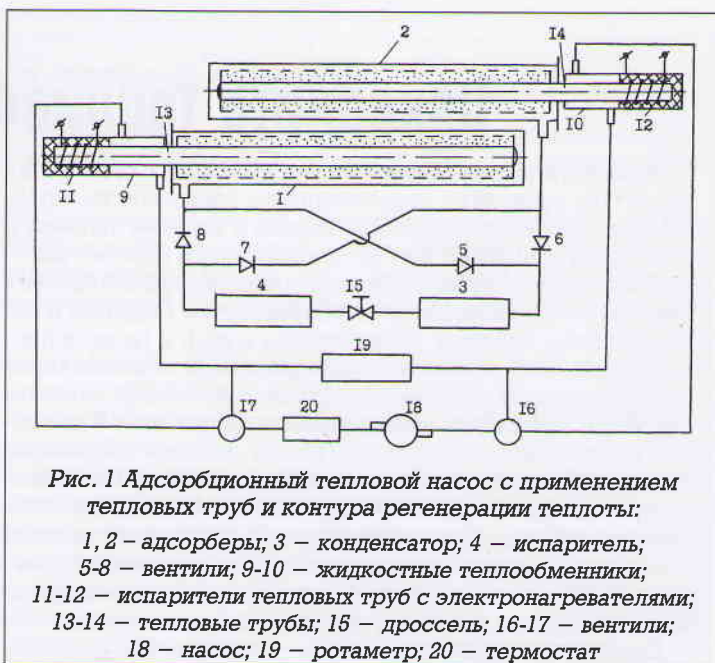


Рис. 1 Адсорбционный тепловой насос с применением тепловых труб и контура регенерации теплоты:

- 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

эту проблему. В тепловых насосах на твердых сорбентах процесс интенсификации тепло- и массообмена является также более критичным по сравнению с абсорбционным насосом, поскольку толщина слоя сорбента велика по сравнению с пленкой жидкости. Эффективная теплопроводность слоя пористого сорбента мала и существует необходимость увеличить ее путем добавления высокотеплопроводных материалов (например, пенометалла). В тепловых насосах на твердых сорбентах существенное значение имеет процесс тепло- и массообмена внутри сорбента и теплообмена сорбента со стенкой теплообменника. Интенсификация теплообмена наряду с повышением сорбционной емкости сорбента, кинетики и динамики массообмена является необходимым требованием для повышения эффективности работы теплового насоса. В последние годы предложено несколько вариантов утилизации теплоты высокотемпературных адсорберов для предварительного подогрева низкотемпературных адсорберов. Утилизация теплоты осуществляется непосредственно с помощью теплообменников (тепловые трубы) либо путем массообмена между адсорберами. К тепловым насосам на твердых сорбентах также относятся водородные тепловые насосы, в которых в качестве сорбентов применяются гидриды металлов. Для водородных тепловых насосов характерно изменение энтальпии во время цикла в пределах ($\Delta H = -30 - +40$ kJ/mol). Такое изменение энтальпии обеспечивают гидриды металлов LaNi, LaNiAl, LaNiSn и LaNiMn. Для водородных тепловых насосов характерно малое изменение энтропии в процессе цикла, соответственно имеет место слабая зависимость давления от температуры (плато). Водородные тепловые насосы обладают высокой термодинамической эффективностью, обеспечивают широкий диапазон изменения температуры, однако они требуют обеспечения высокого уровня надежности эксплуатации и относительно дороги.

Продолжение следует

Литература

1. Takao Nishimura. «Heat pumps — status and trends in Asia and Pacific»// Journal of Refrigeration 25 (2002). Pp.405-413.
2. Meunier F., Adsorption heat pump technology: possibilities and limits: ISHPC 1999, Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, March 24-26, 1999, Munich, Germany. Pp. 25-35.
3. Васильев Л.Л., Вааз С.Л. Замораживание и нагрев грунта с помощью охлаждающих устройств. Минск: Наука и техника, 1986, 192 с.
4. Vasiliev L.L., Mishkinis D.A., Antukh A.A., Vasiliev Jr. L.L. Solar — gas solid sorption heat pump, ISHPC, Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, March 24-26, 1999, Munich, Germany. Pp.117-122.
5. Vasiliev L.L., Nikanpour D., Antukh A.A., Snelson K., Vasiliev Jr. L.L., Lebru A., Multisalt — carbon chemical cooler for space applications, ISHPC, Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, March 24-26, 1999, Munich, Germany. Pp.579-583.