

А.А. Антух, Л.Л. Васильев, О.С. Филатова

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ТЕПЛОВОЙ НАСОС ДЛЯ СИСТЕМ ТРИ-ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ (ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, ТЕПЛОТА И ХОЛОД)

АННОТАЦИЯ

Исследован новый тепловой насос на твердых сорбентах для систем три-генерации. Удельная мощность аппарата, состоящего из трех адсорберов/десорберов и испарителя/конденсатора, составляет 500...550 Вт/(кг адсорбента). Отличительной особенностью такого теплового насоса является использование в качестве сорбентов активированного угольного волокна «бусофит», пропитанного солями металлов. Рабочей жидкостью служит аммиак. Тепловой насос способен работать в нескольких режимах и иметь один или два источника холода. Определены характеристики работы теплового насоса: количество холода, производимое в обоих режимах, а также коэффициенты эффективности.

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с проблемой теплового загрязнения атмосферы и необходимостью повышать эффективность использования органического топлива (природный газ) целесообразен уход от высокотемпературных циклов сжигания и переход на его прямое низкотемпературное преобразование в электроэнергию, теплоту и холод (три-генерация) с использованием альтернативных источников энергии (солнце, вторичные энергоресурсы и т.д.). В состав системы входит адсорбционный тепловой насос (ТН), его конструкцию составляют три адсорбера, содержащих активированное углеволокно, пропитанное хлоридами никеля, марганца, бария, и испаритель/конденсатор, заправленный аммиаком, способен работать в нескольких режимах, иметь один или два источника холода.

2. СИСТЕМЫ ТРИ-ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

При традиционном получении электроэнергии на тепловых электростанциях, вследствие больших потерь при выработке и передаче электроэнергии, лишь 24% энергии сгоревшего топлива может использоваться на совершение полезной работы.

Для получения 146% энергии на отопление помещения с помощью парокompрессионного ТН с электроприводом (рис. 1) необходимо затратить 314 % первичной энергии сгорания топлива. При этом до ТН доходит лишь 30 % первичной энергии (работа электродвигателя), в окружающую среду выхлопными газами выбрасывается 223 % энергии высокотемпературного сжигания топлива, атмосфера загрязняется углекислым газом и окислами азота. Требуемое для обогрева помещений количество теплоты приходится добирать прямым преобразо-

ванием электрической энергии в теплоту. Более эффективна схема с приводом от двигателя внутреннего сгорания (рис. 2). В этом варианте существенно снижается расход топлива для получения того же количества теплоты [1]. При наличии регенеративного теплообменника те же 146 % полезного тепла для нагрева помещения производятся ТН сжиганием в дизеле 100 % жидкого топлива.

Очевидно, что топливные ресурсы целесообразно использовать децентрализованно, непосредственно в местах их потребления [2]. Одним из перспективных направлений развития энергетики может стать создание экологически чистых неэлектрических сорбционных тепловых машин (рис. 3), использующих вторичные и альтернативные источники энергии (водные бассейны, грунт, тепло отходящих газов) [3—6]. Внедрение систем три-генерации энергии, создаваемых на базе мотор-генераторов либо машин Стирлинга и производящих электричество, теплоту и холод, решит несколько важных проблем, в числе которых экономия топливных ресурсов и уменьшение теплового загрязнения окружающей среды. Сорбционный ТН, утилизирующий энергию отходящих газов и жидкостной системы охлаждения дизеля, при затратах 100% первичной энергии топлива обеспечивает 100% тепла для обогрева помещения, 30% «холода» для охлаждения воды и 25% электроэнергии для собственных нужд.

Тепловые машины на твердых сорбентах могут быть использованы в сельском хозяйстве (электричество, теплая вода и охладители молока на молочных фермах), экологически чистых системах кондиционирования для транспорта, в объектах жилищно-коммунального хозяйства (системы кондиционирования, обогрева и охлаждения, микрокотельные). Они активно разрабатываются в Японии, США, ряде передовых стран Западной Европы. В Англии компания Бритиш Газ (British Gas) планирует в ближайшие 5 лет снабдить системами микро три-генерации взамен обычных котлов-подогревателей более двухсот тысяч домов. К 2010 г. устройства микротри-генерации заменят в стране до 10% всех мини-бойлеров. Замена котла на такое устройство в одном доме приведет к уменьшению выбросов углекислого газа на полторы тонны и экономит 150 фунтов стерлингов в год. В период с 2010 по 2020 г. системы микротри-генерации заменят в индивидуальных жилищах 25% бойлерных систем отопления.

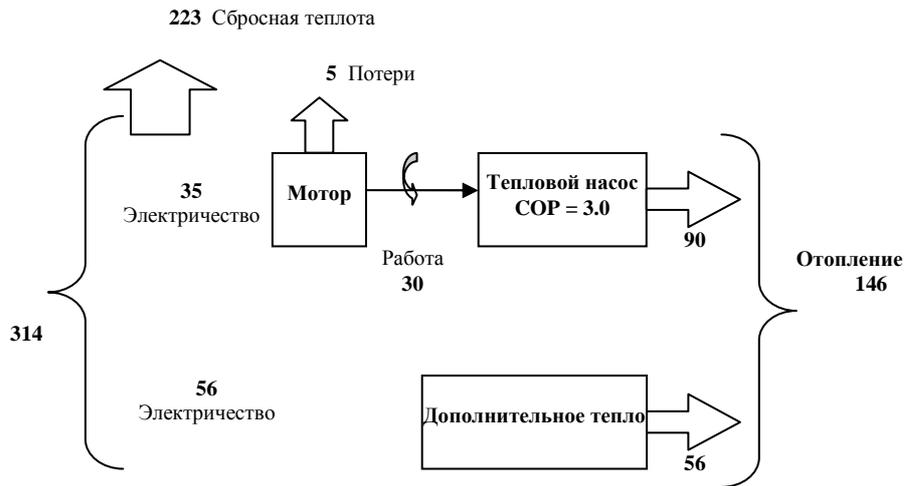


Рис. 1. Эффективность (в %) использования энергии сжигания топлива на тепловых электрических станциях для работы парокompрессионных электрических тепловых насосов

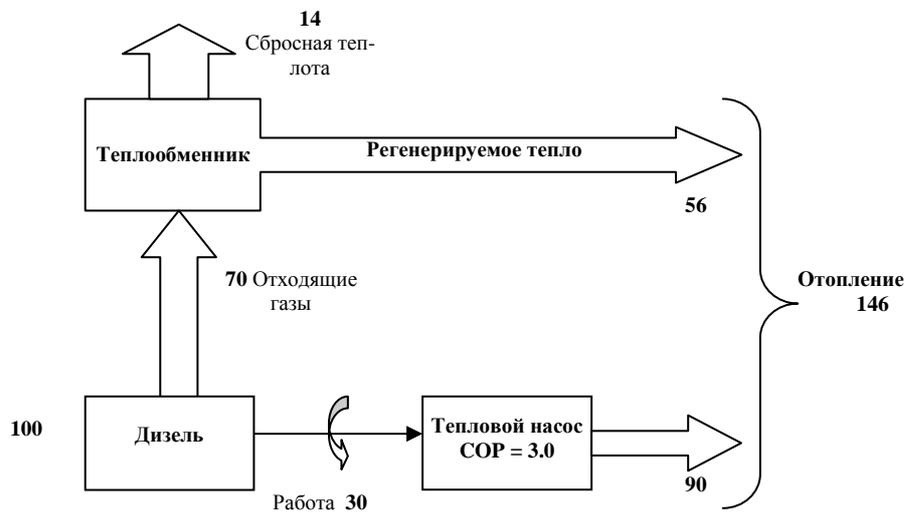


Рис. 2. Парокompрессионный тепловой насос с двигателем внутреннего сгорания

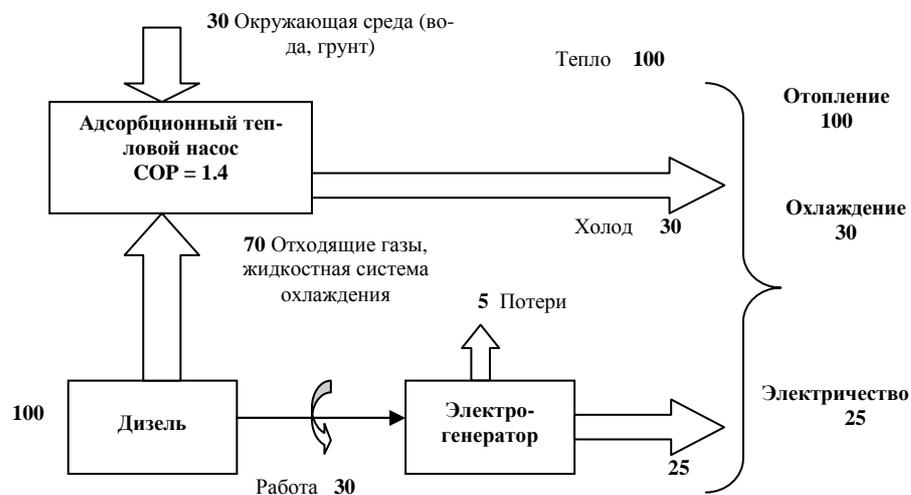


Рис. 3. Система три-генерации на базе дизель-генератора и сорбционного теплового насоса

Тепловые машины на твердых сорбентах на 15...20 % улучшают общую эффективность систем комбинированного производства электроэнергии, теплоты и холода. Адсорбционные реверсивные ТН (тепло + холод) позволяют получить 20...30 кВт/м³ тепловой энергии и до 5 кВт холода на кубический метр сорбента. Такие ТН экономят до 15...20 % первичной энергии (топлива) для производства электричества, теплоты и холода. При распространении подобных энергетических установок в Западной Европе экономия энергии может достигать 50·10¹⁵ Дж ежегодно, что эквивалентно 1.6·10⁹ м³ природного газа (около 250 млн евро). При этом выброс углекислого газа в окружающую среду будет составлять на 3·10⁹ кг меньше.

В настоящее время в Европейском сообществе выполняется проект SOCOOL (окончание в 2006 г.), входящий в 5-ю рамочную программу (EU F5 Energy Program). Проект ориентирован на создание систем три-генерации энергии для бытовых целей. При утилизации теплоты отходящих газов и отработанной жидкости дизель-генераторов либо двигателей Стирлинга эффективность подобных установок возрастает на 15...20 %.

3. СОРБЦИОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС

Работа химических ТН основана на обратимой химической реакции «газ – твердое тело»:



В качестве твердого тела В обычно используют неорганические соли, образующие с рабочей жидкостью А комплекс А·В: с водой — гидраты В·nН₂O, с аммиаком — аммиакаты В·nNH₃ и т.д. Практическому применению неорганических солей в массивном состоянии препятствует несколько серьезных факторов:

а) существенное увеличение объема твердой фазы в ходе образования комплекса (особенно для комплексов с аммиаком);

б) гистерезис в реакции (1), в результате чего разложение комплекса может происходить при более высокой температуре, чем его образование;

в) малая скорость реакции (1) за счет малой реакционной поверхности и/или образования на поверхности соли новой фазы, диффузия газа через которую затруднена;

г) коррозионная активность солей и комплексов при контакте с металлическими частями химического теплового насоса.

Для решения этих проблем и повышения эффективности работы ТН авторами предложены новые двухкомпонентные сорбенты аммиака: активный уголь + микрокристаллы соли [2]. Микрокристаллы соли помещают на внешней или внутренней поверхности активного компонента – матрицы/распределителя. Углеродный волокнистый сорбент «Бусофит» обладает уникальными физико-химическими и механическими свойствами, хорошо адсорбирует газы Н₂, N₂, O₂, CH₄, NH₃ и др., обеспечивает высокие скорости адсорбции и де-

сорбции, отличается разнообразием текстильных форм (ткань, жгут, войлок), компактностью (возможно формирование блоков). Свойства разных марок «Бусофита» определялись на специально созданном экспериментальном стенде [7].

Трехкаскадный адсорбционный ТН, созданный и испытанный в Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси, обеспечивает постоянное тепло- и хладоснабжение и имеет два независимых источника холода: отходящие газы либо система жидкостного охлаждения мотор-электрогенератора. Снабжение потребителя электричеством осуществляется электрогенератором. Тепловой насос (рис. 4, а) содержит адсорберы: высокотемпературный («Бусофит» + NiCl₂/NH₃) и среднетемпературный («Бусофит» + MnCl₂/NH₃), а также низкотемпературный адсорбер-холодильник («Бусофит» + BaCl₂/NH₃) и испаритель/конденсатор. Для улучшения испарения жидкого хладагента в конструкции испарителя/конденсатора имеется интенсификатор теплообмена в виде пористого покрытия. Тепловой насос может использоваться двояким образом.

3.1. Вариант А

Три адсорбера насоса одновременно потребляют энергию отходящих газов двигателя внутреннего сгорания для выработки холода и работают по двум циклам:

а) адсорберы (NiCl₂, MnCl₂, и BaCl₂) имеют комнатную температуру и за время τ₁ нагреваются соответственно до температуры 230, 180 и 90°C отходящими газами двигателя внутреннего сгорания и горячей жидкостью из системы охлаждения двигателя. При нагреве адсорберов идет процесс десорбции аммиака из сорбента и конденсация его паров в конденсаторе/испарителе;

б) в период времени τ₂ все три адсорбера охлаждаются до комнатной температуры, происходит адсорбция паров аммиака сорбентами, испарение жидкого аммиака и понижение температуры стенки испарителя до -3°C (получение холода, рис. 5, а).

3.2. Вариант Б

Источником энергии для ТН являются выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания системы мотор-генератор. Для подогрева низкотемпературного адсорбера и десорбции паров аммиака используется энергия, снимаемая системой жидкостного охлаждения высокотемпературного и среднетемпературного адсорберов NiCl₂, MnCl₂.

Нагрев адсорберов NiCl₂, MnCl₂ до температуры 450...500 °C отходящими газами и затем их охлаждение жидкостью до температуры 90 °C позволяет передать до 1400 кДж энергии низкотемпературному сорбенту BaCl₂ и осуществить в нем процесс десорбции аммиака (рис. 4, б). Таким образом, происходит утилизация энергии системы охлаждения высокотемпературных адсорберов для получения холода в низкотемпературном адсорбере.

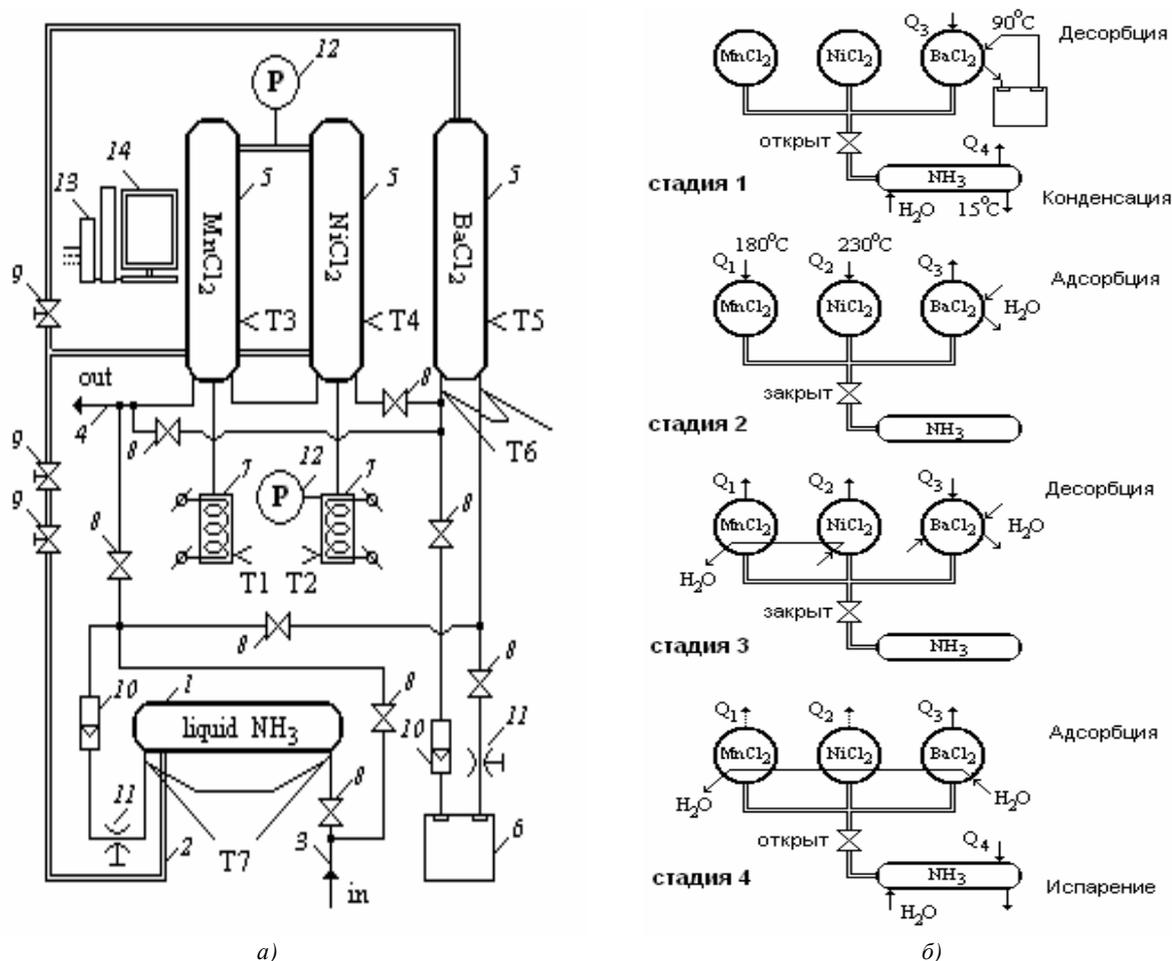


Рис. 4. Экспериментальная установка: а — схема, б — стадии работы для варианта Б

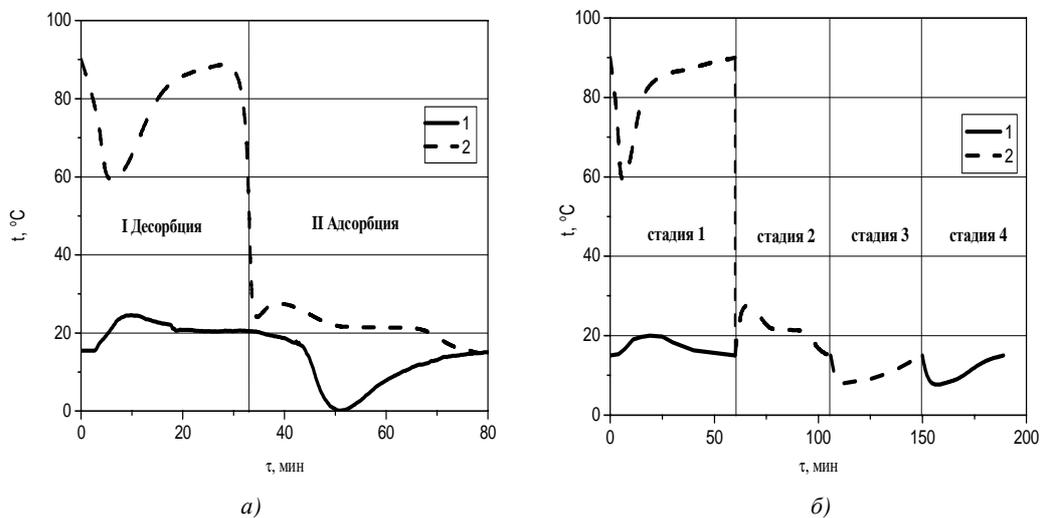


Рис. 5. Изменение температуры воды на выходе жидкостного теплообменника как функции времени работы теплового насоса: а — первый прототип насоса; б — второй прототип насоса (теплообменник находится внутри низкотемпературного адсорбера BaCl_2); 1 — конденсатор/испаритель, 2 — BaCl_2 адсорбер

В данном прототипе теплового насоса получение холода осуществляется в четыре стадии (рис. 5, б):

адсорберы MnCl_2 и NiCl_2 с помощью вставленных в них тепловых труб нагреваются отходящими газами, и происходит процесс десорбции паров аммиака. Пары аммиака конденсируются в конденса-

торе теплового насоса и низкотемпературном адсорбере BaCl_2 ;

адсорберы MnCl_2 и NiCl_2 с помощью вентиля отсоединяются от конденсатора/испарителя, и начинается их охлаждение. Охлаждающая жидкость, имеющая температуру выше 95°C , подается в ад-

сорбер BaCl_2 . Происходят нагрев сорбента и десорбция паров аммиака с последующей его конденсацией в конденсаторе/испарителе;

завершается процесс охлаждения всех адсорберов до температуры окружающей среды. Адсорбер BaCl_2 отсекается от конденсатора/испарителя, адсорберы MnCl_2 , NiCl_2 соединяются с низкотемпературным адсорбером BaCl_2 . Начинается процесс охлаждения (получение холода) адсорбера из-за десорбции паров аммиака, поскольку более сильные сорбенты, находящиеся в адсорберах MnCl_2 , NiCl_2 , забирают аммиак;

конденсатор/испаритель охлаждается при испарении в нем жидкого аммиака (получение холода). Пары аммиака адсорбируются всеми тремя адсорберами, подсоединенными к конденсатору/испарителю при открытых вентилях.

На рис. 6 показаны процессы нагрева и охлаждения ТН. Максимальная подводимая к каждому из адсорберов MnCl_2 , NiCl_2 тепловая мощность составляет 400 Вт, в испарителе производится 200 Вт холода (циркулирующей в нем вода охлаждается до 10°C).

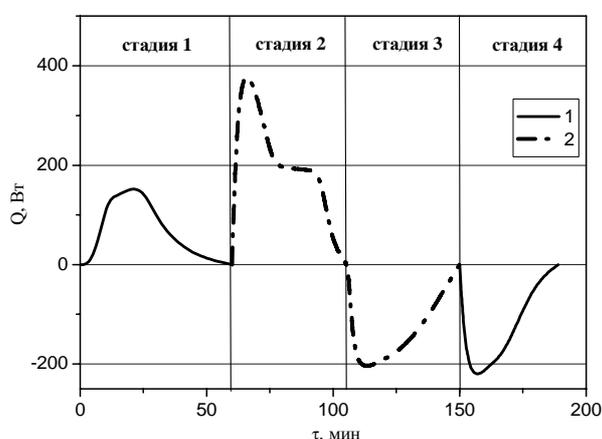


Рис. 6. Поглощение и выделение теплоты в конденсаторе/испарителе (1) и низкотемпературном адсорбере BaCl_2 (2) в течение цикла работы ТН

Анализ диаграммы Клапейрона-Клаузиуса (рис. 7) позволяет оценить эффективность работы ТН с двумя источниками холода, которая для первого типа (три адсорбера + конденсатор/испаритель) равна 0.41. Для второго типа ТН $\text{COP} = 0.6$.

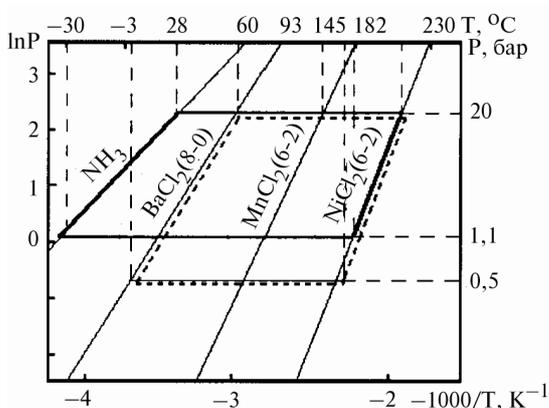


Рис. 7. Диаграмма Клапейрона-Клаузиуса для трех-каскадного ТН («Бусофит» + BaCl_2 , MnCl_2 , NiCl_2) с двумя источниками холода

Это означает, что с помощью сорбционного теплового насоса 1 кВт энергии отходящих газов дизеля преобразуется в 1.6 кВт теплоты для нагрева помещения и 0.6 кВт холода для его охлаждения (холодная вода).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с необходимостью эффективного использования органического топлива целесообразно прямое низкотемпературное преобразование топлива, а также преобразование энергии альтернативных источников в электроэнергию, теплоту и холод (три-генерация).

Внедрение систем три-генерации позволяет решить несколько важных проблем — обеспечение энергетической безопасности, экономию топливных ресурсов и уменьшение теплового загрязнения окружающей среды. Адсорбционный тепловой насос, разработанный и испытанный в ИТМО НАН Беларуси, обеспечивает режим постоянного тепло- и хладоснабжения и имеет два независимых источника холода. Тепловой насос может работать в двух режимах, коэффициенты эффективности по производству холода при этом составляют 0,41 при одновременной работе трех адсорберов и 0,6 в случае поочередной работы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- COP — холодильный коэффициент эффективности (coefficient of performance);
 P — давление, бар;
 Q — количество тепла, Вт;
 T, t — средняя температура, К, $^\circ\text{C}$;
 τ — время, с;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lian Z. et al. // Intern. Journal of Refrigeration. 2005. Vol. 28. P. 810—819.
- Васильев Л.Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь // ИФЖ. 2005. Т. 78. № 1. С. 23—34
- Васильев Л.Л., Канончик Л.Е. Сорбционные машины — эффективная энергосберегающая технология // Энергоэффективность. 2002. № 6-7.
- Васильев Л.Л., Канончик Л.Е., Антух А.А. Современные термодинамические циклы в энергетике — способ уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу и повышение КПД электростанций // Энергоэффективность. 2002. № 11.
- Васильев Л.Л. Стационарные и передвижные хранилища газа в связанном сорбентами состоянии при низком давлении // Энергоэффективность. 2003. № 1.
- Васильев Л.Л. Экологически чистые хладагенты и холодильные циклы для Республики Беларусь // Энергоэффективность. 2005. № 8.
- Пат. ЕВП № 0131270. F 25 В 35/04. Твердофазный адсорбер для адсорбционного циркуляционного процесса.