

УДК 621.577

Разработка гидридных тепловых насосов

Л. А. Ижванов, А. И. Соловей

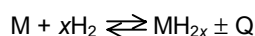
ЛЕВ АЛЕКСЕЕВИЧ ИЖВАНОВ — кандидат технических наук, начальник отдела НИИ НПО «Луч». Область научных интересов: металлургия редких металлов, порошковая металлургия, технология и материаловедение гидридов металлов и сплавов.

АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ СОЛОВЕЙ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ НПО «Луч». Область научных интересов: порошковая металлургия, технология и материаловедение гидридов металлов и сплавов.

142100 Подольск, Московская область, Железнодорожная ул., д. 24, НПО «Луч», отделение «Технология», тел. (095)137-92-58, (27) 63-70-97 для Москвы и Московской области, (096-7) 63-70-97 для других городов, E-mail dvpluch@podolsk.ru

В энергетике в последние десятилетия приоритетное значение приобретают энергосберегающие процессы и технологии с использованием экологически чистых материалов. Среди исследований в этом направлении особое внимание уделяется разработке металлгидридных тепловых насосов как преобразователей тепла с одним температурным потенциалом (тепловые сбросы или тепло окружающей среды) в тепло с другим температурным потенциалом (полезно используемое тепло).

Рабочим телом гидридных тепловых насосов является обратимо циркулирующий водород. Действие этих устройств основано на использовании теплового эффекта обратимой реакции гидрирования металла или интерметаллического соединения:



При сорбции водорода выделяется теплота, при его десорбции поглощается теплота из окружающей среды, т.е. генерируется холод. Использование этих тепловых эффектов позволяет получать температуры обычно в пределах от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, но этим температурные возможности гидридных насосов далеко не исчерпаны [1].

Работы по созданию гидридных тепловых насосов, начатые в середине 70-х годов, до настоящего времени носят опытно-конструкторский характер. Наибольших успехов в этой области добилась Япония [2]. Подавляющее большинство разработок направлено на создание устройств для производства холода.

В рамках нашего проекта проведены конструкторско-технологические исследования и расчеты, итогом которых стала разработка четырех вариантов устройств: три из них предназначаются для производства холода и одно — для производства тепла. Работа одного из устройств по генерации холода обеспечивается электроэнергией, для остальных вариантов источником энергии служат тепловые сбросы в виде горячей воды или выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания.

Математическое моделирование гидридных тепловых насосов

В основу математической модели гидридных тепловых насосов положены процессы сорбции и десорбции водорода гидридообразующими материалами (заполняющими сорбер) с соответствующим выделением и

поглощением тепла, перенос водорода из одного сорбера в другой и теплообмен с теплоносителями.

Состав гидридов в сорберах можно рассчитать по значениям равновесного давления водорода и температуры гидридов, определяемым по изотермам либо по кинетическим соотношениям, описывающим процессы поглощения и десорбции водорода с учетом конечной скорости гетерогенных реакций и гистерезиса. При этом давление водорода определяется из условия сохранения общего количества водорода в системе.

Для описания процесса переноса тепла может быть использована точечная модель гидридного теплового насоса, параметрами которой являются средние значения температуры, концентрации водорода в гидридах и давления водорода в газовой фазе. При другом подходе следует явно учитывать распределение этих параметров по объему сорберов. В настоящей работе применяли цилиндрические сорберы, поэтому учитывалось изменение температуры и концентрации водорода только в радиальном направлении. В рамках обеих моделей были разработаны программы расчета в точечном (нульмерном) и одномерном приближениях для гидридных тепловых насосов, работающих в режиме холодильника и нагревателя. В обоих случаях учитывался теплообмен с теплоносителями во внешних трактах.

Подробно результаты математического моделирования изложены в [3].

Выбор пар металлгидридов для тепловых насосов

Гидридообразующий материал (металлы, интерметаллиды) является основополагающим элементом гидридного теплового насоса, определяющим эффективность его работы. При выборе пар гидридов (низкотемпературного и высокотемпературного) мы исходим из разработанной Данцером с сотр. [4—6] методики, содержащей два ключевых соотношения, одно из которых описывает термодинамическое равновесие в гидридообразующей системе, второе выражает коэффициент преобразования тепловой энергии COP:

$$\ln p = \Delta H/RT - \Delta S/R \quad (1)$$

$$COP = \frac{\Delta m_H \Delta H_l - cm_l \Delta t_l}{\Delta m_H \Delta H_h + cm_h \Delta t_h} \quad (2)$$

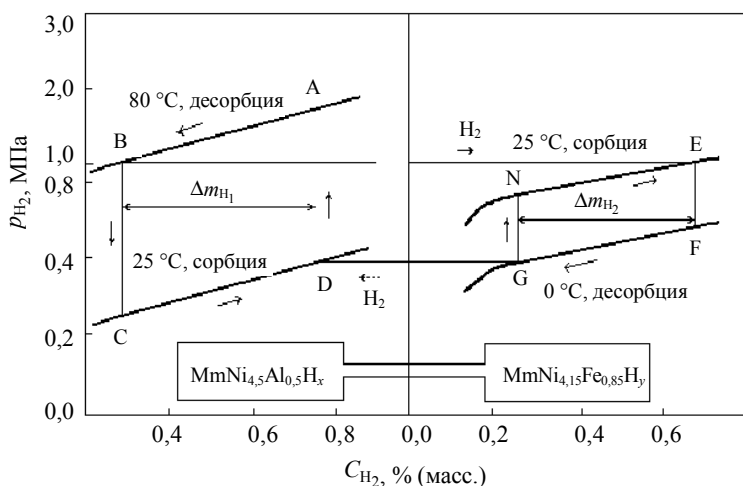


Рис. 1. Цикл работы гидридного насоса на основе пары $MmNi_{4,5}Al_{0,5}H_x$ — $MmNi_{4,15}Fe_{0,85}H_y$ в режиме холодильника

где p — равновесное давление водорода; ΔH — энтальпия образования гидроксида; R — универсальная газовая постоянная; T — температура, К; ΔS — энтропия образования гидроксида; Δm_H — масса водорода, принимающего участие в процессах сорбции-десорбции; Δt_i , Δt_h — изменение температуры сорбера за один цикл; m_i , m_h — масса сорбера; c_i , c_h — теплоемкость сорберов, индексы «i» относятся к низкотемпературному гидриду, «h» — к высокотемпературному гидриду.

По мере развития этой методики в ней стали учитывать гистерезис и наклон плато на зависимостях давление—температура—состав (p — T — C) [4—6].

В нашей работе использовался уточненный нами вариант методики, позволяющей учитывать массу водорода, участвующего в процессах сорбции-десорбции и перетекающего от одного металлгидрида к другому, а именно, предлагаемая нами методика опирается на реальные изотермы, построенные для используемых гидридов. Это позволяет наглядно представить процесс работы теплового насоса и учитывать массу участвующего в реакции водорода [7—9].

Ниже приведены примеры использования предложенной методики. При оценочном выборе гидридов для производства холода с получением температуры $t_i = 0$ — 4 °C (t_i — минимальная температура в гидридной системе) при температуре энергоисточника $t_h = 80$ °C (t_h — максимальная температура в гидридной системе) и температуре окружающей среды $t_m = 20$ — 25 °C мы остановились на $LaNi_{4,5}Al_{0,5}H_x$ и $LaNi_5H_x$, в качестве альтернативных высокотемпературных гидридов и $MmNi_{4,15}Fe_{0,85}H_x$ (Mm — мишметалл) в качестве низкотемпературных гидридов.

Для учета массы взаимодействующего водорода необходимо рассмотреть термодинамический цикл в координатах p — T — C . В условиях заданных или фиксированных температур такое рассмотрение эквивалентно полю изотерм для обоих сорбентов. На рис. 1 представлены изотермы гидридов для пары интерметаллидов $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ — $MmNi_{4,15}Fe_{0,85}$. Движущей силой

для перетекания водорода от одного металлгидрида к другому является перепад давлений между гидридными зонами при соответствующих температурах. При выравнивании давлений поток водорода и сопровождающие ее тепловые эффекты за счет десорбции и сорбции водорода прекращаются. Точки предельных состояний на изотермах выбраны не произвольно, а соответствуют условию $\Delta m_{H1} = \Delta m_{H2}$, т.е. очевидному равенству масс выделяющегося и поглощаемого водорода при неизменной суммарной массе водорода в системе. Представление термодинамического цикла работы насоса в координатах p — T — C позволяет максимально точно оценить величины Δm_H и COP. Для приведенного выше примера Δm_H составляет 0,45%, COP — 0,3.

Другим высокотемпературным кандидатом на использование в гидридном тепловом насосе для генерации холода является интерметаллид $LaNi_5$. В соответствии с изотермами гидридов для пары интерметаллидов $LaNi_5$ — $MmNi_{4,15}Fe_{0,85}$ (рис. 2) имеет место замкнутый рабочий цикл при $\Delta m_{H1} = \Delta m_{H2} = 0,6\%$, что предопределяет COP = 0,4.

Сравнение двух вариантов гидридных тепловых насосов с $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ и $LaNi_5$ свидетельствует в пользу последнего, так как во втором случае обеспечивается большая масса взаимодействующего водорода и, следовательно, более высокий коэффициент преобразования тепловой энергии.

При разработке насоса на основе системы $LaNi_5$ — $MmNi_{4,15}Fe_{0,85}$ для генерации тепла в проекте приняты исходные данные: температура энергоносителя $t_m \leq 80$ — 90 °C; генерируемая температура $t_h \geq 110$ — 120 °C; температура охлаждающей воды $t_i \leq 10$ — 20 °C.

Для достижения более высокой генерируемой температуры, как показали расчеты, в качестве низкотемпературного интерметаллида эффективен $LaNi_5$, в качестве высокотемпературного — сплав системы Zr — Cr — Fe . Описанный в литературе гидрид $ZrCrFeH_x$ не удовлетворяет требованию замкнутости цикла, поэтому состав его был скорректирован увеличением содержания железа в исходном интерметаллиде до состава $ZrCrFe_{1,2}$, который обеспечивает замкнутость цикла при заданных температурных уровнях: $t_h = 120$ °C, $t_m = 80$ °C. В итоге выбор

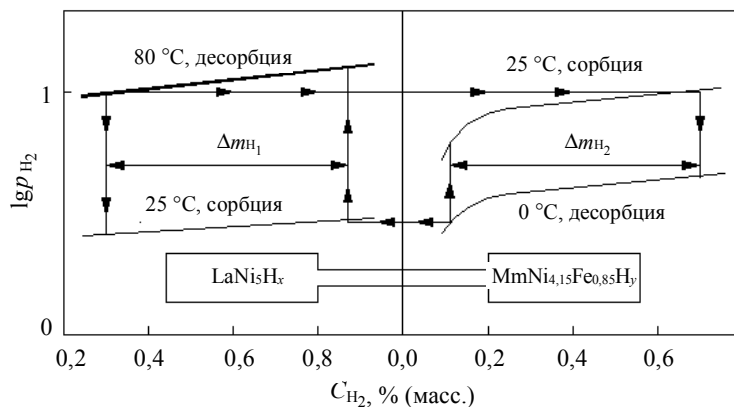


Рис. 2. Цикл работы гидридного насоса на основе пары $LaNi_5$ — $MmNi_{4,15}Fe_{0,85}$ в режиме холодильника

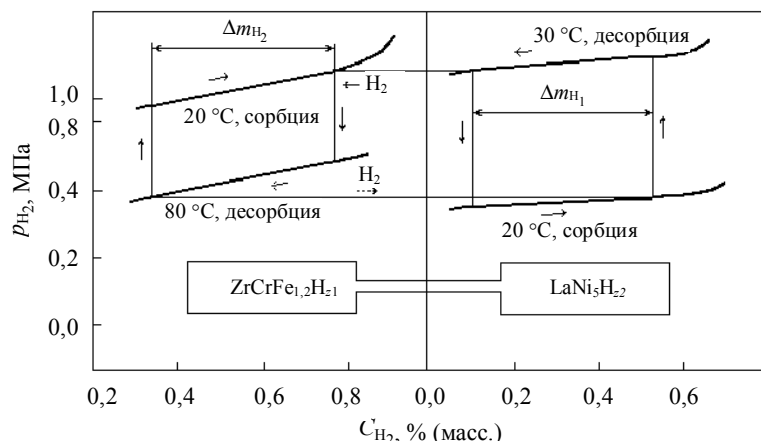


Рис. 3. Цикл работы гидридного насоса на основе пары $\text{LaNi}_5\text{—ZrCrFe}_{1,2}$ в режиме холодильника

был остановлен на системе $\text{LaNi}_5\text{—ZrCrFe}_{1,2}$. На рис. 3 представлены рабочие изотермы пары гидридов этих материалов.

Для целей выбора пары металлгидридов нами разработаны также компьютерные программы, позволяющие учитывать гистерезис, а в отдельных случаях и наклон плато на зависимостях $p\text{—}T\text{—}C$, отношение массы металлгидрида к массе конструкции и производить расчет эффективности преобразования тепла [9].

Некоторые технологические аспекты

Приготовление сплавов. Все используемые сплавы, кроме $\text{ZrCrFe}_{1,2}$, готовили сплавлением компонентов в корундовом тигле в индукционной печи. Сплав $\text{ZrCrFe}_{1,2}$ готовили путем плавки в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медной водоохлаждаемой подложке. Полученные слитки измельчали в порошок до крупности менее 0,5 мм.

Подготовка сорберов. Сорберы, заполненные порошком сплава, «заряжались» водородом. Эту операцию выполняли на специальном стенде, позволяющем проводить дегазацию сплава в условиях вакуума (остаточное давление 10^{-5} мм рт.ст.) и активацию его цикла гидрирования—дегидрирования.

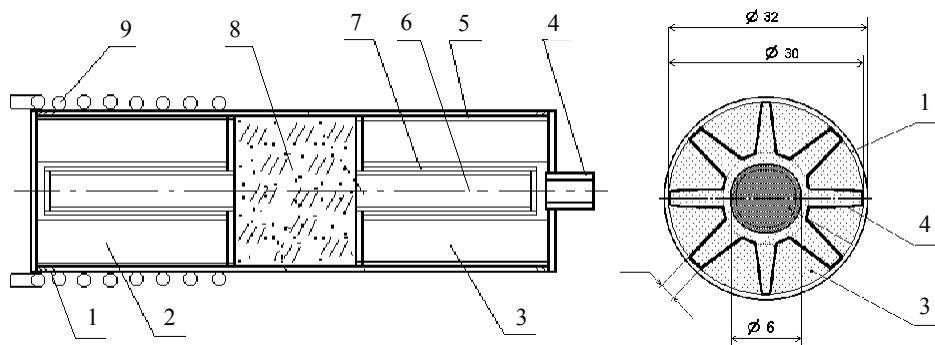


Рис. 4. Схема модуля гидридного теплового насоса с электронагревателем для получения холода:

1 — оболочка из нержавеющей стали; 2 — высокотемпературный металлгидрид; 3 — низкотемпературный металлгидрид; 4 — трубка для дегазации и впуска водорода; 5 — гофрированная алюминиевая фольга; 6 — внутренняя перфорированная трубка; 7 — никелевая сетка; 8 — каолиновая вата; 9 — электрический нагреватель

Установки для генерации холода и тепла

Установка для охлаждения жидкостей с использованием в качестве источника энергии электронагревателя

Установка предназначена для охлаждения жидкостей (вода, молоко, напитки и т.п.) до температуры 0 ± 4 °С. Основными ее узлами являются два блока гидридных тепловых насосов, теплообменники, теплоизолированный бак для охлаждаемой жидкости, насос для подачи охлаждаемой жидкости, два разомкнутых контура для прокачки охлаждающей воды (расход воды 70—120 г/с) и снятия выделяющегося тепла, а также два замкнутых контура для подачи охлаждаемой жидкости (расход воды 180 г/с), снятия генерируемого холода и аккумуляирования его в баке охлаждаемой жидкости.

Каждый блок гидридных тепловых насосов в свою очередь состоит из четырех модулей, собранных в квадратный пучок и размещенных в цилиндрических обечайках (диаметр 130 мм, емкость 6 л). Отдельный модуль (рис. 4) представляет собой трубчатый элемент, изготовленный из нержавеющей стали, длиной 1,5 м. Внутри этого элемента размещается коллектор-фильтр, выполненный в виде перфорированной трубки из нержавеющей стали с намотанной на нее никелевой сеткой. Фильтр из каолиновой ваты делит полость модуля на высокотемпературную и низкотемпературную зоны, которые заполнены $\text{LaNi}_{4,6}\text{Al}_{0,4}$ и $\text{MmNi}_{4,15}\text{Fe}_{0,85}$ соответственно (по 1,5 кг каждого). Фильтр предотвращает возможный перенос гидридного порошка из одной части модуля в другую, а также служит теплоизолятором между высокотемпературной и низкотемпературной зонами модуля. С целью повышения эффективной теплопроводности металлгидридов в модуле размещена алюминиевая фольга звездообразной формы (толщина 0,15 мм).

Разомкнутые контуры охлаждающей воды включают входной фильтр, запорные вентили, электроклапаны подачи охлаждающей воды и электроклапаны дренажа охлаждающей воды.

Система управления установкой состоит из электро-

клапанов управления, насоса подачи охлаждаемой воды, блока ручного управления и компьютера автоматического управления. В систему контроля параметров установки входят манометры на водных магистралях, термодатчики для измерения температуры поверхностей модулей и охлаждаемой воды и термометры для измерения температуры охлаждающей и охлаждаемой воды.

Работа блоков гидридных тепловых насосов осуществляется циклически. В первой половине цикла в высокотемпературном сорбере при включении электронагревателя происходит десорбция из высокотемпературного гидрида водорода, который поступает в низкотемпературный сорбер, где водород сорбируется. Выделяющееся при этом тепло «снимается» охлаждающей водой. Это так называемый «холостой полуцикл».

Холод вырабатывается во второй половине цикла функционирования гидридного насоса. При отключенном электронагревателе в полость высокотемпературного сорбера подается охлаждающая вода, охлаждение сорбера приводит к поглощению водорода и резкому снижению давления в водородной полости модулей. В результате начинается интенсивная десорбция водорода из металлгидрида низкотемпературного сорбера, при этом за счет поглощения тепла металлгидридом охлаждается вода, подаваемая из бака охлаждаемой воды. Десорбируемый в низкотемпературном сорбере водород сорбируется металлгидридом в высокотемпературном сорбере, выделяющееся при этом тепло «снимается» охлаждающей водой.

Для обеспечения непрерывной генерации холода блоки гидридных тепловых насосов работают со сдвигом по времени на «полцикла»: когда в низкотемпературном сорбере одного блока вырабатывается холод, низкотемпературный сорбер другого блока заряжается водородом.

Установка имеет два режима управления: ручной (по сигналам датчиков и показаниям вторичных приборов) и автоматический (по сигналам датчиков температуры в соответствии с выбранной циклограммой работы установки).

Выходные характеристики установки при ручном режиме управления:

температура на наружной поверхности высокотемпературной части модулей	190 °С
температура охлаждающей воды	10 °С
объем охлаждаемой воды	18 л
длительность полуцикла	20 мин
начальная температура охлаждаемой воды	21 °С

За восемь полуциклов работы установки температура охлаждаемой воды снижается до 1,5 °С, средняя холодопроизводительность 154 Вт, коэффициент преобразования тепловой энергии 0,115. Достижимая температура далее поддерживается периодическим включением установки при повышении температуры охлаждаемой воды в баке до ~ 4 °С. Аналогичные показатели имеет установка, работающая в автоматическом режиме.

Снижение температуры нагревателя до 170 °С существенно уменьшает холодопроизводительность установки. При сокращении продолжительности полуцикла до 15 мин она повышается на 10—15%.

Установка для охлаждения жидкостей с использованием в качестве энергоисточника горячей воды

Для обеспечения работы установки, предназначенной для генерации холода, в качестве источника энергии может быть использована сбросная горячая вода с температурой 80—...90 °С. Нами разработан вариант такой установки с гидридным тепловым насосом на основе интерметаллидов LaNi_5 (для высокотемпературного сорбера) и $\text{MmNi}_{4,15}\text{Fe}_{0,85}$ (для низкотемпературного сорбера). Расчетная холодопроизводительность установки 400—...600 Вт. Минимальная температура охлаждаемой воды 2...—4 °С.

Энергоснабжение установки обеспечивается термостатом с горячей водой. Скорость прокачки воды через теплообменники 200 л/с. Охлаждаемая жидкость—вода, прокачивается через теплообменники (расход воды 100—180 г/с).

Для данной установки были предложены два варианта конструкций сорберов: модульный (рис. 5) и моноблочный (рис. 6). Установка включает два блока. Каж-

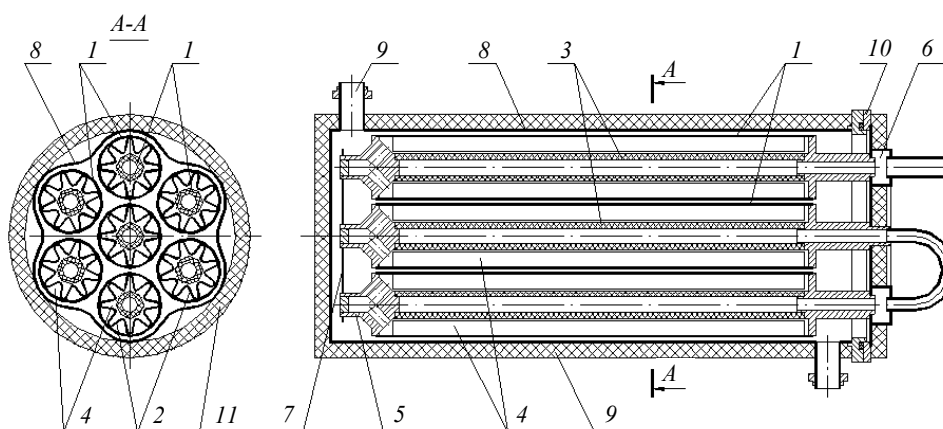


Рис. 5. Схема конструкции модульного сорбера:

1 — трубчатый корпус гидридного модуля; 2 — теплопроводная вставка-гофр; 3 — водородный керамический коллектор-фильтр; 4 — металлгидрид; 5 — наконечник для засыпки металлгидрида; 6 — водородный коллектор; 7 — дистанционирующая пластина; 8 — кожух теплообменника; 9 — штуцер; 10 — фланец-крышка теплообменника; 11 — теплоизоляция

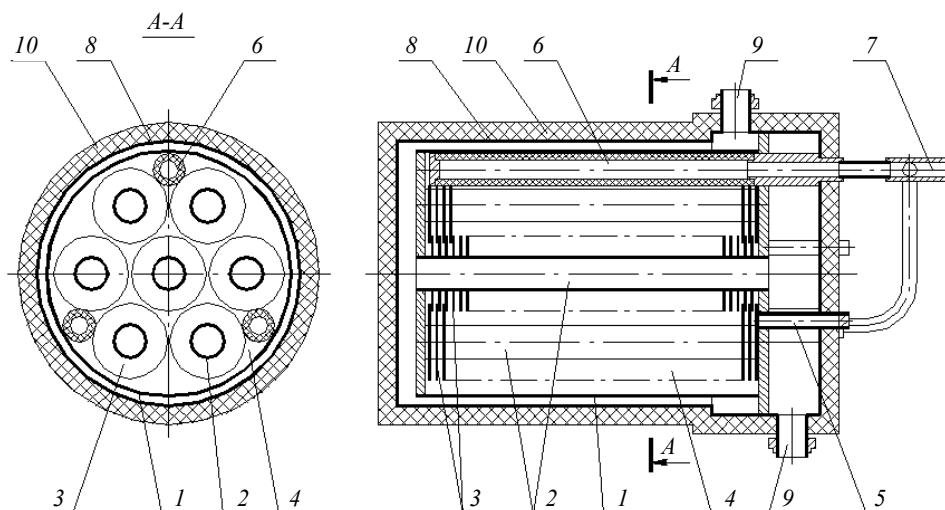


Рис. 6. Схема конструкции моноблочного сорбера:

1 — корпус сорбера; 2 — теплообменная трубка; 3 — теплопроводные ребра; 4 — металлгидрид; 5 — трубка для засыпки металлгидрида; 6 — керамический водородный коллектор-фильтр; 7 — водородный коллектор; 8 — кожух теплообменника; 9 — штуцер; 10 — теплоизоляция

дый блок состоит из высокотемпературного и низкотемпературного сорберов, которые соединены между собой водородным коллектором.

Работа установки осуществляется следующим образом. В режиме генерации холода первым блоком через высокотемпературный сорбер прокачивается водопроводная вода, а через низкотемпературный — охлаждаемая вода. Второй блок в это время работает в режиме перезарядки. По окончании выработки холода первым блоком переключением вентилей он переводится в режим перезарядки, а второй блок — в режим выработки холода. Работа блоков в противофазе обеспечивает квазинепрерывный процесс генерации холода.

Как показали испытания, снижение температуры теплоносителя с 90 °С до 80 °С уменьшает холодопроизводительность на ~ 30%. При повышении температуры теплоносителя до 95 °С она увеличивается на 25—30%. По мере снижения температуры охлаждаемой жидкости с 20 °С до 4 °С холодопроизводительность за счет потерь во внешнюю среду уменьшается до 400 Вт.

В ряде экспериментов в качестве охлаждаемой жидкости был использован антифриз (тосол марки А40М). При этом в стационарном режиме была достигнута температура –4 °С.

Установка для охлаждения воздуха с использованием в качестве энергоисточника тепла выхлопных газов

Отметим, что ранее был описан пример использования тепла выхлопных газов как энергоисточника в устройстве для кондиционирования воздуха в салоне автобуса [10].

В разработанной нами установке для охлаждения воздуха источником энергии служит теплота сгорания дизельного топлива. Основное отличие этой установки от описанных выше заключается в том, что ее гидридную систему составляет одна пара металлгидридов и она работает в периодическом режиме. Другим отличием является использование воздуха в качестве хладоносителя и его смеси с выхлопными газами в качестве

теплоносителя. Температура теплоносителя может варьироваться в широких пределах. Нами она принята равной 180—200 °С.

Схема установки приведена на рис. 7. Гидридный тепловой насос включает гидридные сорберы с высокотемпературным металлгидридом $\text{LaNi}_{4,6}\text{Al}_{0,4}\text{H}_x$ и с низкотемпературным металлгидридом $\text{MmNi}_{4,15}\text{Fe}_{0,85}\text{H}_y$ (масса каждого гидрида по 11,5 кг) и подогреватель воздуха, обеспечивающий температуру смеси воздуха и выхлопных газов на уровне 180—200 °С. Средняя тепловая мощность подогревателя воздуха составляет 20 кВт. Вентилятор подогревателя работает непрерывно, создавая при горении поступающего из бака топлива струю выхлопных газов, а при выключенной камере сгорания — воздушный поток с комнатной температурой.

Каждый сорбер представляет собой блок из 15 труб (диаметр 22 мм, толщина стенки 1 мм, длина 1,5 м). Средняя часть труб выполняет функцию теплоизоляции. Заслонки на низкотемпературном сорбере служат для переключения режимов его работы с фазы выработки холода на перезарядку и т.д. Вентиляторы обеспечивают подачу воздуха в режимах перезарядки и работы на генерацию холода. Контур с холодильной камерой (объем около 100 л, протяженность 1,5 м) является имитатором охлаждаемого объема.

Для интенсификации теплообмена между воздушной струей и металлгидридом сорберы имеют снаружи квадратные медные ребра толщиной 0,15—0,2 мм, расположенные с шагом 2 мм. Для исключения попадания воздуха из окружающей среды в холодильную камеру при перезарядке сорберов установлены заслонки.

Воздух в камере охлаждается до 0 ± -2 °С. Средняя холодопроизводительность насоса в режиме охлаждения воздуха в камере равна 550 Вт. Минимальная температура низкотемпературного сорбера и ребер при отсутствии внешнего обдува составляет от –20 до –25 °С.

Использование только одной пары металлгидридов определяет ее работу в периодическом режиме, что из-за значительной тепловой инерционности системы увеличивает продолжительность циклов. Испытания ма-

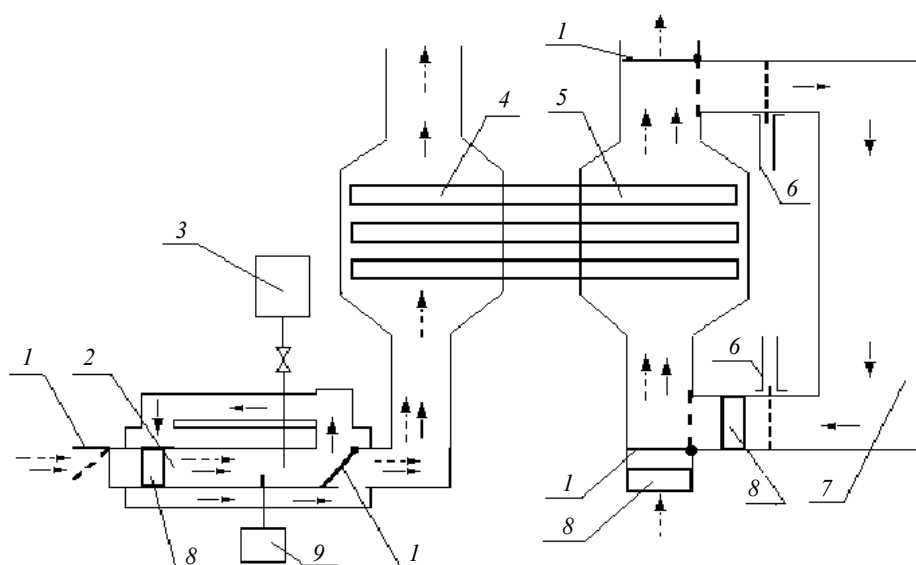


Рис. 7. Схема установки для охлаждения воздуха с использованием в качестве источника энергии тепла выхлопных газов:

1 — заслонки; 2 — подогреватель воздуха ОВ-95; 3 — топливный бак; 4, 5 — высоко- и низкотемпературные части модуля; 6 — дополнительные деревянные шиберы; 7 — холодильная камера; 8 — вентиляторы; 9 — блок зажигания. Сплошными стрелками показано движение газообразных продуктов сгорания; пунктирными стрелками — движение потока воздуха

кетного устройства показали, что для достижения гарантированного уровня температуры ниже 0 °С необходима организация его работы в непрерывном режиме.

Установка для нагревания жидкостей до 110 °С с использованием в качестве источника энергии сбросного тепла с температурой до 90 °С

Еще одним реализованным нами техническим решением использования гидридного теплового насоса является установка для генерации тепла. Выработка тепла осуществляется за счет перегрева воды до температуры не менее 110 °С с использованием в качестве источника энергии сбросного тепла — горячей воды с температурой 80—90 °С. Охлаждающей средой в нашем варианте служила водопроводная вода с температурой 10—20 °С. Рабочей системой теплового насоса являются гидриды пары интерметаллидов $ZrCrFe_{1,2}-LaNi_5$.

Установка включает два блока гидридных тепловых насосов, состоящих из высокотемпературного и низкотемпературного сорберов. Работа блоков в противофазе обеспечивает квазинепрерывную выработку тепла. На установке были испытаны два варианта конструкции сорберов: модульный и моноблочный.

В сорберы загружают 18,06 кг гидридов (в низкотемпературный модульный — 5,9 кг, низкотемпературный моноблочный — 4,9 кг, высокотемпературный модульный — 4,0 кг, высокотемпературный моноблочный — 3,26 кг). Емкость бака для перегретой жидкости равна 5 л. Режим работы блоков (последовательность включения и выключения запорных устройств) аналогичны принятым для установки охлаждения воды. Длительность циклов генерации тепла в каждом из блоков составляет 7 мин. Подогрев воды в баке и контуре перегреваемой жидкости от 90 °С до 110 °С происходит за пять последовательных фаз сорбции водорода в высокотемпературном сорбере. После первого цикла температура в баке для перегрева воды повышается с 90 °С до 101 °С, за последующие четыре цикла до 110—

111 °С и далее поддерживается на этом уровне. Рабочее давление водорода в сорберах колеблется в пределах 0,3—1,4 МПа в моноблочном и 0,3—1,1 МПа в модульных устройствах. При выходе на стационарный режим температура перегретой жидкости составляет 110—111,5 °С.

Оценка эффективности работы моноблочных и модульных сорберов показала, что продолжительность сорбционных процессов в паре модульных сорберов меньше, чем в паре моноблочных. Так, оптимальные фазы генерации тепла и перезарядки для модульных сорберов составляют соответственно 4—5 и 6—7 мин, а для моноблочных соответственно 5—6 и 8—12 мин. Такое различие, по-видимому, вызвано тем, что поверхность теплообмена у модульных сорберов почти в три раза больше, чем у моноблочных. Полезная мощность, реализуемая в первом цикле и равная 1890 Вт, обеспечивает постоянно температуры при стационарном режиме работы установки.

Возможности совершенствования гидридных тепловых насосов

Описанные выше технические решения выполнены по схеме, в которой генерация тепла и холода, соответственно сорбция и десорбция водорода, происходят попеременно в одном и том же рабочем объеме в зависимости от направления потока водорода. Такая схема общепринята в гидридных тепловых насосах. Ее достоинством является отсутствие движущихся частей, недостатком — необходимость в значительном количестве вентилях или клапанов в системе управления. В нашей работе опробован гидридный тепловой насос с возвратно-поступательным движением сорберов, в котором сорбция и десорбция водорода осуществляется в разных температурных зонах, что позволяет исключить клапаны в системе управления сорберов.

В установку загружают по 20 г гидридов LaNi_5 (высокотемпературный) и $\text{MmNi}_{4,15}\text{Fe}_{0,85}$ (низкотемпературный). Время цикла 7 мин, режим работы полностью автоматический с контролем минимальной и максимальной температур в гидридной системе t_h , t_m и температуры окружающей среды t_i . При $t_h = 90^\circ\text{C}$, $t_m = 12^\circ\text{C}$ достигается температура $t_i = 3\text{—}6^\circ\text{C}$.

Температурные возможности гидридных тепловых насосов могут быть существенно расширены за счет использования двух и более ступенчатых систем [9, 11].

Другим резервом повышения температурных возможностей и производительности является совершенствование конструкции, а также увеличение эффективной теплопроводности гидридной системы.

Авторы выражают благодарность за участие в выполнении отдельных разделов работы и обсуждении ее результатов Б.А. Астахову, В.А. Афанасьеву, Е.Б. Бойко, С.Ю. Бокало, Н.А. Ландину, А.А. Лысенко, В.П. Попову, В.Н. Фадееву, Э.М. Федорову, В.П. Фролову, Ю.И. Шанину.

Работа выполнена по программе МНТЦ (проект № 058) и финансировалась Японией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ижванов Л.А., Соловей А.И., Фролов В.П. и др.* Int. J. Hydrogen Energy, 1996, v. 21, № 11/12, p. 1033—1038.
2. *Suda S., Sndrock G. Z.* Phys. Chem. NF, 1994, Bd. 183, S. 149—156.
3. *Федоров Э.М., Шанин Ю.И., Ижванов Л.А.* Докл. на 5-ой Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов». Украина, Ялта, 2—8 сент., 1997.
4. *Dantzer P., Orgaz E.* Int. J. Hydrogen Energy, 1986, v. 11, p. 797.
5. *Orgaz E., Dantzer P.* J. Less-Common Met, 1984, v. 131, p. 385.
6. *Dantzer P., Meuner F.* What materials to use in hydride chemical heat Pumps. Mater. Science Forum, 1988, v. 31, p. 1.
7. *Шанин Ю.И., Шанин О.И., Ижванов Л.А. и др.* Сб. тр. 3-го Межд. форума «Тепломассообмен-ММФ-96. Тепломассообмен в химико-технологических устройствах». Минск: АНК ИТМО им. А.В. Лыкова АНБ, 1996, с. 129—135.
8. *Астахов Б.А., Фадеев В.Н., Ижванов Л.А. и др.* Докл. на 5-ой Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов». Украина, Ялта, 2—8 сент., 1997.
9. *Шанин Ю.И.* Докл. на 5-ой Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов». Украина, Ялта, 2—8 сент., 1997.
10. *Ron M. A.* J. Less-Common Met., 1984, v. 104, p. 259—278.
11. *Suda Seijirau, Komazaki Yoshio, Narasaki Hiroshi e. a.* J. Less-Common Met., 1991, v. 172—174, p. 1092—1110.