

- сбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2007. — № 3. — С. 20–31.
5. Безродный М.К., Куделя П.П., Дроздова О.И. Порівняльний ексергетичний аналіз теплонасосних та традиційних систем опалення // Техн. теплофізика и пром. теплоенергетика. — 2010. — № 2. — С. 22–34.
  6. Безродный М.К., Пригула Н.О. Про оптимальну роботу теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти зовнішнього повітря // Там же. — 2011. — № 3.
  7. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. — Одесса : Студия «Негоциант», 2006. — 712 с.
  8. Некрасова О.А., Синяк Ю.В. Исследование теплонасосных систем отопления (модельный подход) // Теплоэнергетика. — 1986. — № 11. — С. 30–34.
  9. Шубин Е.П. Основные вопросы проектирования систем теплоснабжения городов. — М. : Энергия, 1979. — 359 с.
  10. Система «Теплый пол» // <http://gilius.lv/pdf/gilius-floors-tech.pdf>.

Поступила в редакцию 28.03.11

## The Energy Efficiency of Low-Temperature Water Heating and Ventilation System with Recuperative Heat Pumping

**Bezrodny M.K., Prytula N.O.**

*National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev*

The principle scheme of low-temperature heat pumping and recuperative water heating system «warm floor» and ventilation are considered. The results of the system energy efficiency analysis taking into account and ignoring energy loss for air transportation through heat pump evaporator are obtained. It is displayed that the system energy efficiency is higher than corresponding heating system (without ventilation) by heat streams for ventilation and heating relation  $m > 0,5$  also the system energy efficiency increases with  $m$  value increase. The effective operation conditions of the corresponding heating and ventilation system are analysed.

**Key words:** low-temperature heating systems, ventilation, thermal pump, warm floor, recuperator.

Received March 28, 2011

УДК 541.44: 546.11

## Разработка металлгидридной технологии утилизации низкопотенциальных тепловых выбросов промышленных предприятий

**Кошельник А.В., Черная Н.А.**

*Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков*

Определены структура и основные этапы разработки металлгидридных технологий для систем утилизации низкопотенциальных тепловых выбросов промышленных предприятий. Представлена структура математической модели взаимодействия водорода с металлгидридами в установках на базе термосорбционных компрессоров. Это дает возможность провести расчеты работы системы и полностью определить комплекс конструктивных и режимных параметров, которые характеризуют ее общую эффективность.

**Ключевые слова:** металлгидридная технология, тепловые выбросы, утилизация теплоты.

Визначено структуру та основні етапи розробки металогідридних технологій для систем утилізації низькопотенційних теплових викидів промислових підприємств. Представлено структуру математичної моделі взаємодії водню з металогідрідами в установках на базі термосорбційних компресорів. Це дає можливість провести розрахунки роботи системи та повністю визначити комплекс конструктивних та режимних параметрів, які характеризують її загальну ефективність.

**Ключові слова:** металогідридна технологія, теплові викиди, утилізація теплоти.

Энергосберегающий потенциал промышленности Украины составляет 35–45 % всего объема потребляемых топливно-энергетических ресурсов [1]. Поэтому вопросы повышения энергоэффективности на всех этапах производства и потребления энергии являются важным фактором дальнейшего развития экономики и обеспечения энергетической безопасности государства. Промышленные комплексы и системы, в которых реализуются высокотемпературные тепло-технологические процессы, формируют техническую базу таких энергоемких областей, как черная и цветная металлургия, химическая и строительная промышленность. На большинстве предприятий Украины выпуск продукции в этих отраслях осуществляется с повышенными удельными затратами энергоресурсов и характеризуется интенсивным загрязнением окружающей среды. Так, теплота отходящих газов регенеративных воздухонагревателей доменных печей составляет 15–20 % от затраты теплоты на подогрев дутья. Здесь температура газов на выходе из теплообменников колеблется в пределах 200–400 °С. В стекольной промышленности, несмотря на применение многоступенчатых систем утилизации теплоты дымовых газов плавильных печей, температура отходящих газов может составлять 200–450 °С. В тепловом балансе печей потери с отходящими газами составляют до 40 % внесенной теплоты в рабочее пространство [2]. Учитывая значительные объемы вторичных энергоресурсов на таких предприятиях, актуальной является проблема утилизации низкотемпературной теплоты при уровне температур 150–250 °С, что требует установки дополнительного теплоутилизационного оборудования. Одним из перспективных направлений использования этой теплоты является применение в данных схемах металлогидридных энергопреобразующих установок, в которых в качестве рабочего тела выступает экологически чистый энергоноситель — водород [3].

Теплоиспользующие установки на базе термосорбционных компрессоров (ТСК) находят все более широкое применение на практике, что свидетельствует о наличии технико-экономической целесообразности осуществления термодинамических энергосберегающих технологий в про-

мышленных масштабах. Существенным преимуществом термодинамического способа сжатия водорода в термосорбционных компрессорах является потребление низкопотенциальной тепловой энергии, поэтому применение термосорбционных теплоэнергетических установок открывает принципиально новый путь в технологии компримирования водорода, исключаяющей использование электрической и механической энергии. Энергопреобразующие системы с ТСК по своей термодинамической сущности являются теплоэнергетическими агрегатами, в которых в результате теплового взаимодействия металлогидрида с внешней средой осуществляется преобразование теплоты низкого температурного потенциала в энергию сжатого водорода [4, 5].

Разработка и реализация технологии утилизации низкопотенциальных тепловых выбросов промышленных предприятий с использованием водородных энергопреобразующих установок связана со значительными трудностями, вызванными прежде всего необходимостью учета взаимосвязи сложных физико-химических процессов в элементах системы. Эта проблема требует создания общей методики разработки теплоиспользующих металлогидридных систем для проведения значительных объемов исследовательских работ и моделирования работы элементов утилизационной системы. Реализация этой задачи позволит с незначительными затратами оперативно решить вопрос разработки таких систем и определить наиболее благоприятные условия их работы.

Цель данной работы — разработка общей методики создания и исследования металлогидридных систем для утилизации низкопотенциальной теплоты промышленных теплотехнологических комплексов с помощью обобщения информации, полученной при проведении расчетно-теоретических и экспериментальных исследований термосорбционных процессов.

На рис.1 представлена тепловая схема высокотемпературной установки (ВТУ) с интеграцией утилизационной системы, в состав которой входит термосорбционная компрессорная установка с системой регенерации теплоты переходных процессов. Схема работает следующим образом. Отходящие дымовые газы с температу-

рой  $t_{r1}$  после ВТУ 1 поступают в регенеративный теплообменник 2б, где охлаждаются до  $t_{r2}$  с одновременным нагревом насадки. Часть газов после теплообменника попадает в боковой отвод газохода и подается в блок генераторов-сорберов 3б, где используется в качестве источника теплоты. После них установлен регенератор 4, в котором происходит процесс аккумуляции теплоты, отводимой в процессе десорбции. Дымовые газы с температурой  $t_{r3}$  поступают далее в основной газоход, где смешиваются с потоком газов, имеющих температуру  $t_{r2}$ , и после этого с температурой  $t_{r4}$  поступают в дымоход. В то же время холодный теплоноситель (воздух) с температурой  $t_{в031}$ , равной температуре окружающей среды, подается в генератор 3а, где используется как охлаждающая среда с целью обеспечения температурного уровня, необходимого для осуществления процесса сорбции водорода. Воздух после генератора 3а с температурой  $t_{в032}$  смешивается с основным потоком воздуха с температурой  $t_{в031}$ . Этот поток с температурой  $t_{в033}$  поступает в регенеративный теплообменник 2а, работающей в цикле нагрева воздуха горения. Воздух, подогретый до  $t_{в034}$ , подается в горелочное устройство высокотемпературной установки.

При разработке общей структуры методики исследования металлгидридных утилизационных систем низкопотенциальной теплоты промышленных теплотехнологических комплексов можно выделить ряд взаимосвязанных модулей, которые отображают основные этапы создания металлгидридных систем и определения параметров их работы.

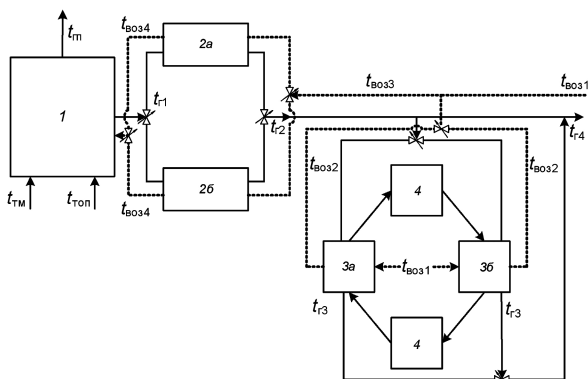


Рис. 1. Тепловая схема высокотемпературного теплотехнологического комплекса с интеграцией ТСК: 1 – ВТУ; 2 – регенеративные теплообменники для подогрева воздуха горения; 3 – генераторы-адсорберы; 4 – регенеративные ТО для использования теплоты переходных процессов;  $t_{tm}$  – температура технологических материалов;  $t_{top}$  – температура готового продукта;  $t_{тон}$  – температура топлива, подаваемого в ВТУ.

В первую очередь необходимо определить количество генераторов-сорберов для термосорбционного компрессора. Основным требованием при этом является обеспечение непрерывной подачи водорода потребителю в заданном объеме. Осуществление непрерывной подачи рабочего тела потребителю системой, состоящей из ряда элементов (источников рабочего тела), которые генерируют его периодически, может быть обеспечено в случае непрерывного прохождения одного за другим процессов генерации. Подобной системой является термосорбционный компрессор, который состоит из нескольких генераторов-сорберов (ГС), работа которых организована таким образом, что фазы нагнетания водорода каждого из них, чередуясь во времени, объединяются в непрерывный процесс подачи сжатого водорода в магистраль высокого давления компрессора.

Далее выбирается тип временного цикла работы генератора-сорбера. Выбор типа циклов зависит от продолжительности процессов подвода и нагнетания, а также мощности подвода и отвода теплоты. При работе ТСК наиболее приемлемым является симметричный цикл, что показано в работе [6]. Условием реализации данного цикла есть равенство мощностей подвода и отвода теплоты. Важным этапом проектирования металлгидридных систем является определение параметров работы и характеристик генераторов-сорберов. При этом следует учитывать, что режим работы генераторов-сорберов должен удовлетворять условию непрерывности подачи водорода и условию обеспечения наибольшего КПД. Это приводит к необходимости определения ключевых параметров, которые характеризуют энергетическую эффективность работы компрессора: давления нагнетания, степени сжатия, продолжительности циклов и др.

Одним из основных этапов здесь является модуль, в котором осуществляется расчет процессов теплопереноса в слое металлгидрида. Вследствие сложности процессов, которые проходят в металлгидридном слое, и существенного влияния на них конструктивных и технологических параметров ГС наиболее эффективным средством решения этой задачи являются методы математического моделирования.

Металлогидридный элемент представляет собой сложный физический объект, в котором проходят следующие процессы: перенос теплоты, фазовый переход водорода из химически связанного состояния в свободномолекулярное и фильтрация водорода через пористую матрицу гидрида. Учет фазовых и химических превращений в таком элементе значительно услож-

няет задачу. Схема взаимодействия металлгибрида с водородом представлена на рис.2.

При построении математической модели, учитывающей все эти процессы, исходили из законов сохранения массы, сохранения энергии и уравнения химической кинетики реакции десорбции водорода. При этом были сделаны следующие допущения: 1) режим фильтрации водорода вязкостный; 2) механизм переноса тепла обусловлен теплопроводностью, конвекцией, фильтрацией свободного водорода в порах гидрида; 3) массоперенос происходит по нормали к греющей поверхности; 4) коэффициент сжимаемости газа  $\xi = 1,0$ ; 5) диффузионная составляющая массопереноса отсутствует.

Соответствующая математическая модель была разработана в отделе водородной энергетики Института проблем машиностроения НАН Украины [6, 7]. Базовыми уравнениями, описывающие процесс взаимодействия водорода с металлгидридами, являются уравнения теплопроводности, теплового баланса, неразрывности и описывающее связь между давлением, температурой фазового перехода и массосодержанием водорода.

Для повышения степени адекватности математической модели процесса нестационарного тепломассопереноса в металлгидридах необходимо учитывать кинетику термосорбционных процессов, которая содержит физическую сорбцию на поверхности сорбента, хемосорбцию водорода на поверхности сорбента, которая происходит на активных центрах и завершается диссоциацией молекул водорода на атомы, диффузионные процессы в кристаллической структуре металлгидрида и микрокинетику взаимодействия единичных атомов и молекул водорода с кристаллической структурой металлгидрида.

Поскольку на сегодня не установлен детальный механизм описания реакции взаимодействия металлгидрида с водородом, было использовано уравнение, качественно описываю-

щее основные закономерности процесса. Однако, здесь наблюдается изменение константы скорости реакции на протяжении первых нескольких циклов процесса. При этом значение константы скорости увеличивается с каждым последующим циклом по линейному закону. Далее константа приближается к постоянному значению. Количество необходимых циклов для достижения постоянного значения константы скорости зависит от вида интерметаллидного соединения и условий, при которых происходит процесс гидрирования. Так, для соединений  $\text{LaNi}_5$  и  $\text{LaNi}_{4,9}\text{Al}_{0,1}$  постоянство значений скорости реакции достигается после 29-го цикла. На основании анализа литературных данных об особенностях протекания процесса термосорбционного взаимодействия металлгидрида с водородом для повышения адекватности математической модели необходимо учесть влияние кинетического фактора в начальной стадии процесса. Для этого в математическую модель предлагается ввести дополнительный модуль, который учитывает данный фактор.

Таким образом, в математической модели на первых циклах расчета используется уравнение скорости реакции взаимодействия металлгидрида с водородом:

$$1 - (1 - \chi/\chi_\infty)^{1/3} = k_1 \tau / a_1,$$

где  $\chi$ ,  $\chi_\infty$  — удельное и максимальное содержание водорода в металлгидриде;  $k_1$  — константа скорости реакции взаимодействия металлгидрида с водородом;  $\tau$  — время;  $a_1 = (d/d\tau)(\chi/\chi_\infty)$ .

В том случае, когда константа скорости реакции достигает постоянного значения, кривые десорбции могут быть описаны таким уравнением:

$$-\lg(1 - \chi/\chi_\infty)^{1/3} = k \tau,$$

из которого видно, что скорость десорбции водорода пропорциональна количеству неразложившегося гидридного материала. Константа скорости реакции для рассмотренного класса гидридов определялась из соотношения  $k = f(p, T)$ .

Модель процесса тепломассопереноса в металлгидридах состоит из отдельных взаимозависимых блоков, которые отображают конструктивные параметры и теплофизические характеристики слоя, а также их реальную связь, а именно блоки: исходных данных; краевых условий; определения теплофизических свойств и расчета вспомогательных коэффициентов; реализующий алгоритм расчета температурных полей; реализующий алгоритм расчета полей давления; реализующий алгоритм расчета полей массосодержания водорода; учитывающий химическую кинетику процесса; проверки сходимости балансов в циклах и опреде-

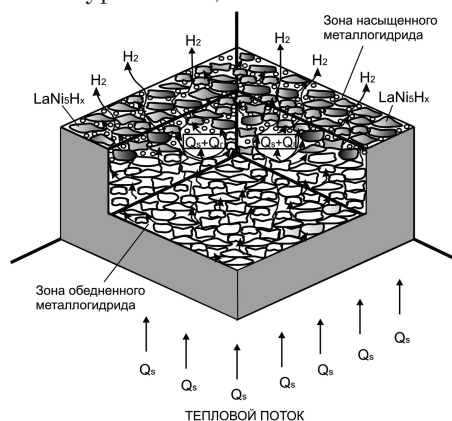


Рис.2. Схема взаимодействия металлгидрида с водородом.

ления времени процесса теплообмена; обработки и вывода результатов расчетов.

В случае применения системы регенерации теплоты переходных процессов ТСК с целью уменьшения затрат энергии и повышения КПД термосорбционных компрессорных установок дополнительно возникает необходимость решения таких задач: выбор регенеративных теплообменных аппаратов, промежуточного теплоносителя, теплоаккумулирующих элементов, согласование режимов работы генераторов-сорберов и регенераторов. Для использования в таких системах были предложены регенеративные теплообменные аппараты с теплоаккумулирующей матрицей, выполненной из материалов с фазовым переходом. Теплообменники данной конструкции имеют незначительные габариты при использовании в качестве насадки недорогих химических соединений, серийно выпускаемых промышленностью [8].

Последним этапом исследований является определение гидравлических характеристик металлгидридных систем с целью минимизации общего гидравлического сопротивления генераторов-сорберов, фильтров и газораспределительного механизма металлгидридной установки и уменьшения затрат энергии на их преодоление.

### Выводы

Разработана общая методика создания и исследования металлгидридных систем утилизации низкопотенциальных тепловых выбросов промышленных предприятий, которая учитывает взаимосвязь физико-химических процессов и особенности работы каждого элемента системы. Определена структура и основные этапы разработки металлгидридных технологий для систем утилизации теплоты, что дает возможность провести расчеты работы системы и полностью

определить комплекс конструктивных и режимных параметров, характеризующих ее общую эффективность.

### Список литературы

1. Стратегія енергозбереження в Україні : Аналіт.-довід. матеріали / За ред. В.А.Жовтянського, М.М.Кулика, Б.С.Стогнія. — Київ : Академперіодика, 2006. — Т. 1: Загальні засади енергозбереження. — 510 с.
2. Ключников А.Д., Кузьмин В.Н., Попов С.К. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.
3. Соловей В.В., Кошельник В.М., Шмалько Ю.Ф., Кошельник А.В. Развитие водородгидридной техники и технологии // Экологическая и ресурсосбережение. — 2006. — № 1. — С. 31–37.
4. Соловей В.В., Ивановский А.И., Черная Н.А. Энергосберегающие технологии генерации и энерготехнологической переработки водорода // Компрессор. и энергет. машиностроение. — 2010. — № 2. — С. 21–24.
5. Соловей В.В., Ивановский А.И., Черная Н.А. Применение термосорбционных компрессоров для компримирования водорода // Сб. материалов и документов Междунар. симпоз. «ВЭБ-МПП-2009» (Москва, 5–6 нояб. 2009 г.). — М., 2009. — С. 79–92.
6. Мацевитый Ю.М., Соловей В.В., Черная Н.А. Повышение эффективности металлгидридных элементов теплоиспользующих установок // Пробл. машиностроения. — 2006. — Т. 9, № 2. — С. 85–93.
7. Соловей В.В., Черная Н.А. Использование математического моделирования для разработки и создания эффективной конструкции металлгидридного аккумулятора водорода // Сб. материалов и документов Междунар. симпоз. «ВЭБ-МПП-2008» (Москва, 4–5 июня 2008 г.). — М., 2008. — С. 244–252.
8. Кошельник О.В. Розробка енергоефективних термосорбційних компресорів з системою регенерації теплоти перехідних процесів. // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Темат. вип. Хімія, хім. технологія та екологія. — 2010. — № 52. — С. 16–20.

Поступила в редакцию 08.08.11

## The Development of Metal and Hydride Technology for Low-Potential Heat Emission of Industrial Enterprises Utilization

*Koshelnik A. V., Chernaya N. A.*

*Institute for Machine Building Problems of NASU, Kharkov*

The structure and the main development stages of metal-hydride technologies for systems of industrial enterprises low-potential heat emission utilization are determined. The mathematical model structure of hydrogen and metal-hydrides interaction in heat utilizing units based on thermal sorption compressors is introduced. It enables to carry out calculations of system operation and to determine completely a complex of structural and operating parameters. The structural and operating parameters characterize the system general efficiency.

**Key words:** metal-hydride technology, heat utilization, heat emission.

Received August 8, 2011