

**Список литературы:** 1. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов / М.В. Кулаков. – [3-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с. 2. Деклараційний патент на корисну модель № 20040604482 України, 7 G01N9/14. Радіоізотопний густиномір / Резниченко М.К., Дубовець О.М., Лях Б.Г., Тошинський В.І., Литвиненко І.І.; заявник і патентотримач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № 4574; заявл. 09.06.04; опубл. 17.01.05, Бюл. № 1. 3. Патент на корисну модель № 2008 00040 України, МПК (2006) G01B 15/00. Радіоізотопний густиномір / Дубовець О.М., Тошинський В.І., Литвиненко І.І., Лях Б.Г., Подустов М.О., Кравцов М.К.; заявник і патентотримач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № 32282 G01B 15/00; заявл. 02.01.08; опубл. 12.05.08, Бюл. № 9.

*Поступила в редколлегию 06.04.11*

УДК 661.968

*А.В. ПОПОК*, аспирант, ИПМаш НАН Украины

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТСК В ВОДОРОДНЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМАХ**

Запропоновано використання металогібридного ТСК в установці для реоживлення водню під час його зберігання та транспортування в криогенних резервуарах. Застосування ТСК дозволяє повністю або частково відмовитись від використання електричної енергії, вилучити зі схеми попереднє азотне або гелієве охолодження. Проведено вибір раціонального варіанту схеми без додаткового холододжерела. Показано, що застосування для стиску водню ТСК, що використовує у якості адсорбента  $\text{LaNi}_5$  або  $\text{FeTi}$ , дозволяє знизити витрати первинної енергії на 30 – 40 %.

Предложено использование металлгидридного ТСК в установке для реоживления водорода при его хранении и транспортировании в криогенных резервуарах. Применение ТСК позволяет полностью или частично отказаться от использования электрической энергии, исключить из схемы предварительное азотное или гелиевое охлаждение. Проведен выбор рационального варианта схемы без дополнительного холодоисточника. Показано, что применение для сжатия водорода ТСК, использующего в качестве адсорбента  $\text{LaNi}_5$  или  $\text{FeTi}$ , позволяет снизить затраты первичной энергии на 30 – 40 %.

Proposed the application of a metal-hydride TSC in device for re-fluidization of the hydrogen during storage and transportation in cryogenic tanks. Application of a TSC in whole or in part to renounce the use of electric power to exclude from the scheme prior nitrogen or helium cooling. A selection of the optimal variant of the scheme without further holodoistochnika. It is shown that the application for the compression of hydrogen TSC using as an adsorbent  $\text{LaNi}_5$  or  $\text{FeTi}$ , reduces the cost of primary energy by 30 – 40 %.

**Введение.** Криогенное оборудование обеспечивает охлаждение, хранение и транспортирование жидкого водорода, являющегося топливом для ракетно-космической техники (РКТ), авиации, а в будущем и для автомобильного, железнодорожного и других видов транспорта. Водород служит и важным технологическим сырьем для металлургии, химии, электронной промышленности и т.д. Очевидно, что дальнейшее развитие водородной энергетики потребует создания нового поколения высокоэффективных и надежных криогенных систем и оборудования для охлаждения водорода, его хранения и транспортирования. Одной из важнейших технических характеристик криогенного резервуара является уровень потерь криожидкости от испарения. Данная характеристика определяется эффективностью работы изоляционной системы и задает время хранения криогенного продукта в резервуаре (транспортном или стационарном).

**Анализ результатов последних исследований и публикаций.** В мировой практике накоплен значительный опыт строительства и эксплуатации криогенной техники, однако, при всём совершенстве современных материалов и методов теплоизоляции, хранение жидкого водорода сопровождается неизбежными и значительными потерями. Так современные образцы водородных криоцистерн имеют уровень потерь криожидкости 0,6 – 0,7 % в сутки, при объёме цистерн 100 и 45 м<sup>3</sup> соответственно [1]. Величина потерь значительно снижается при увеличении объёма резервуара, доходя до значений 0,02 – 0,03 % в сутки, но при этом ёмкость исчисляется тысячами кубических метров. В подавляющем большинстве случаев испарившийся водород попросту сбрасывается в атмосферу, поэтому использование металлогидридного термосорбционного компрессора для улавливания и реожиднения испарившегося водорода является необходимым энергетически выгодным направлением повышения эффективности криогенных водородных резервуаров.

**Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы.** Недостатком существующих способов охлаждения водорода является значительное потребление электрической энергии. Известно, что коэффициент охлаждения пропорционален работе, выполненной в цикле сжатым газом, и количеству теплоты, отданному дополнительному холодоисточнику. Основной вклад в энергоёмкость процесса охлаждения водорода вносит процесс его компримирования. Следовательно, экономичность охлаждения можно повысить путём

уменьшения затрат на сжатие газа. Также значительный вклад в энергоёмкость процесса ожижения вносит дополнительное охлаждение жидким азотом.

Применение ТСК, использующего в качестве адсорбента  $\text{LaNi}_5$  или  $\text{FeTi}$ , позволяет повысить эффективность сжатия при отношении входного и выходного давлений более 20 [2].

На рис. 1 приведены зависимости массогабаритных показателей и затрат энергии в форме теплоты от производительности компрессоров при степени сжатия 150 [2].

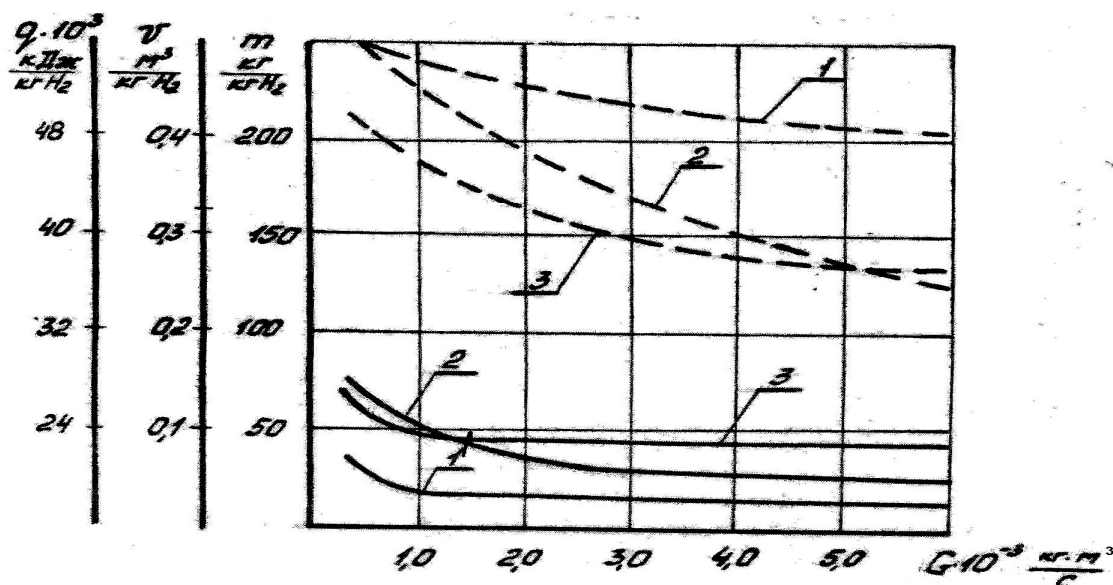


Рис. 1. Технические характеристики водородных компрессоров:  
 - - - механические компрессоры; \_\_\_\_\_ ТСК.

Преимуществом ТСК является, также, использование энергии в виде низкопотенциального тепла, уровень которого при сжатии до давлений около 15 МПа составляет немногим более 200 °С.

**Постановка задачи.** Ввиду высокой термодинамической эффективности термохимического сжатия водорода [3], представляется целесообразным включение металлгидридного термосорбционного компрессора (ТСК) в схемы водородоожижительной установки. Металлогидридный ТСК может служить не только в качестве базового агрегата ожижительной или рефрижераторной установки, но и использоваться в дополнительном холодильном контуре, что позволяет отказаться от использования электрической энергии и исключить из схемы предварительное азотное охлаждение.

**Методика и результаты исследования.** Принципиальная схема водородоожижительной установки с использованием ТСК представлена на рис. 2.

В данной схеме газ, сжатый до необходимого давления и имеющий температуру, соответствующую значению температуры диссоциации гидрида в камере десорбции ТСК, охлаждается в регенеративном теплообменнике  $E_0$  до температуры окружающей среды и поступает в ожижительную схему. В ожижительной схеме происходит охлаждение газа до температуры ожижения в процессах расширения в турбодетандере  $D_1$ , дросселе 6, а также теплообмена встречных потоков газа  $E_1$ ,  $E_3$  и теплообмена с дополнительным холодоисточником  $E_2$ .

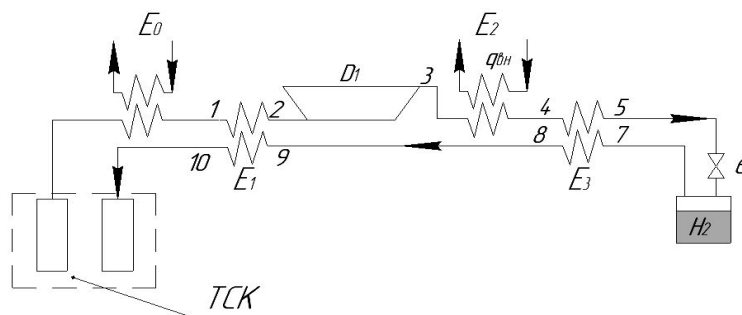


Рис. 2. Принципиальная схема водородоожижительной установки с ТСК

Показателем эффективности схемы является коэффициент ожижения  $x$ . Рассматривая процессы, происходящие в данной схеме, запишем изменение энтальпии газа в каждом, понижающем температуру, устройстве.

$$i_2 = i_1 - (1 - x)(i_{10} - i_9);$$

$$i_3 = i_1 - L_1 = i_1 - (1 - x)(i_{10} - i_9) - L_1;$$

$$i_4 = i_3 - q_{вн} = i_1 - L_1 = i_1 - (1 - x)(i_{10} - i_9) - L_1 - q_{вн};$$

$$i_5 = i_4 - (1 - x)(i_8 - i_7);$$

$$x = (L_1 + q_{вн} - (i_1 - i_{10})) / (i_{10} - i_{ж});$$

где  $(1 - x)$  – доля несконденсировавшегося газа,  $L_1$  – работа, совершенная в детандере,  $q_{вн}$  – количество тепла отданное дополнительному холодоисточнику,  $i_{ж}$  – энтальпия сжиженного водорода.

Последнее уравнение представляет собой выражение для расчета коэф-

фициента ожижения. Из анализа выражения следует:

– коэффициент ожижения пропорционален работе  $L_1$  и количеству тепла  $q_{\text{вн}}$ , переданному дополнительному холодоисточнику;

– коэффициент ожижения обратно пропорционален разности удельной энтальпии газа обратного потока низкого давления, выходящего из теплообменника  $E_1$ , и удельной энтальпии жидкого водорода;

– коэффициент ожижения тем меньше, чем больше разность энтальпий газов высокого и низкого давлений, входящего и выходящего из теплообменника  $E_1$ .

Учитывая значительные затраты при использовании дополнительного холодоисточника является целесообразным исключение данного элемента схемы. Единственным путем увеличения коэффициента ожижения, в данном случае является увеличение работы  $L_1$ , которая при адиабатическом расширении в детандере пропорциональна температуре на входе и перепаду давлений. Но температура на входе и давление на выходе ограничиваются равновесным давлением в термосорбционном компрессоре при температуре сорбции и температурой окружающей среды, что также вызывает необходимость размещения теплообменника  $E_1$  перед детандером.

Перепад давлений ограничивается ростом разности энтальпий  $i_1 - i_{10}$ .

Увеличение работы в данном типе схем может быть получено увеличением количества детандеров; разделением газа высокого давления на холодильный и ожижаемый потоки (так как в данном случае в детандере холодильного контура, газ может расширяться до давления сорбции, совершая больше работы).

В схеме, представленной на рис. 3, для получения максимальной работы количество газа в холодильном контуре должно быть как можно большим, но при этом необходимо учитывать неравенство масс газов высокого и низкого давлений при расчете системы регенерации холода встречного потока.

Возможен, также, следующий конструктивный вариант исполнения усовершенствованной схемы приведенный на рис. 4.

В этом исполнении неожижаемый газ высокого давления расширяется в турбодетандерах холодильных контуров, а ожижаемая часть компрессируется до давления, близкого к критическому, охлаждается до температуры близкой к температуре ожижения и дросселируется.

Расход газа в ожижительном контуре должен быть таким, чтобы обеспечить полную регенерацию холода холодильных контуров.

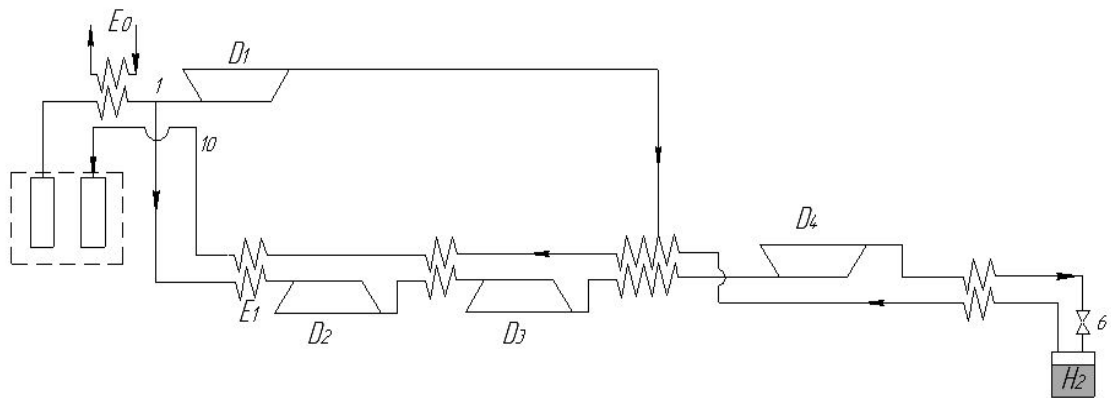


Рис. 3. Усовершенствованная схема

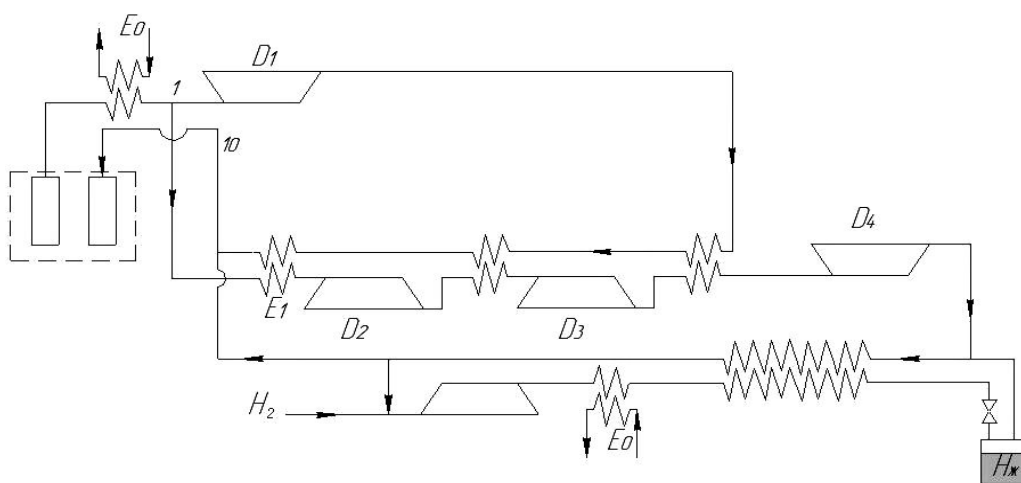


Рис. 4. Вариант конструктивного исполнения усовершенствованной схемы

### Выводы.

Из анализа предложенных схем ожижения следует, что одним из основных путей повышения их эффективности является увеличение работы  $L_1$  в турбодетандере (турбодетандерах).

Для успешного решения данной задачи на стадии проектирования является необходимым проведение выбора рациональной формы проточной части с учетом различных геометрических особенностей, который позволит обеспечить высокую эффективность турбоустановки.

Расчеты трехмерных вязких течений могут быть выполнены с использованием программного комплекса *FlowER* [4], предназначенного для исследования течений в проточных частях турбомашин.

В результате проведенной работы достигнуто снижение потребления электроэнергии за счёт полной или частичной замены механического компрессора термосорбционным – энергозатраты на сжатие водорода снижены

до 40 %; произведен переход на использование низкопотенциальной энергии; исключено из технологии ожижения водорода дополнительное азотное охлаждение; проведено усовершенствование технологической схемы процесса ожижения.

**Список литературы:** 1. Кузьменко И.Ф Опыт создания крупномасштабного оборудования для получения, хранения и транспортирования жидкого водорода / [И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, Г.И. Сайдаля и др.] // Технические газы. – 2009. – № 2. – С. 31 – 37. 2. Соловей В.В. Перспективы применения металлгидридных термосорбционных компрессоров в теплоэнергетических установках / В.В. Соловей // Вопросы атомной науки и техники. – 1985. – Вып. 2. – С. 48 – 49. 3. Шильрайн Э.Э. Введение в водородную энергетику / Э. Э. Шильрайн, С. П. Малышенко, Г. Г. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с. 4. Русанов А.В. Использование современных компьютерных технологий при проектировании проточной части водородной турбины для теплоутилизационных энергоустановок / А.В. Русанов, В.В. Соловей, В.Н. Голощапов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 8 (65). – С. 184 – 189.

*Поступила в редколлегию 15.04.11*

УДК 666.29.022:546.74

**Г.О. ЮРЧЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»,  
**А.М. БУТЕНКО**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

## **ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ НІКЕЛЬ (II) ГІДРОКСИДУ З АМОНІАЧНИХ РОЗЧИНІВ**

Описана технологія отримання нікель (II) гідроксиду із вторинної сировини. Визначені основні кінетичні параметри процесу осадження нікель (II) гідроксиду з амоніачного розчину. Встановлена залежність швидкості реакції від температури й концентрації вихідних і кінцевих речовин. Розраховані термодинамічні показники вказаного процесу.

Описанная технология получения никель (II) гидроксида из вторичного сырья. Определены основные кинетические параметры процесса осаждения никель (II) гидроксида из амониачного раствора. Установленная зависимость скорости реакции от температуры и концентрации исходных и конечных веществ. Рассчитанные термодинамические показатели указанного процесса.

Technology of receipt nickel (II) hydroxide from secondary raw material is described. The basic kinetic parameters of process of besieging are certain nickel (II) hydroxide from ammoniac solution. Dependence of speed of reaction is set on a temperature and concentration of initial and eventual substances. The thermodynamics indexes of the indicated process are expected .