Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Галинкін Юрій Миколайович

УДК 621.431

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЙНИХ МЕТАЛОГІДРИДНИХ УСТАНОВОК МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2017

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Ткач Михайло Романович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, м. Миколаїв, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Варбанець Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації;

кандидат технічних наук, доцент
Щербак Юрій Георгійович,
Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Міністерство освіти і науки України, доцент кафедри якості, стандартизації і техногенно-екологічної безпеки

Захист відбудеться 27 лютого 2017 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д38.060.01 у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
ауд. 360, просп. Героїв України 9, м. Миколаїв, 54025.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
просп. Героїв Уаїни 9, м. Миколаїв, 54025.

Автореферат розісланий ___ січня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, професор А. П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Обмеженість світових запасів вуглеводневих палив (нафти і газу) змушує постійно вдосконалювати ефективність їх використання. У сучасній українській економіці кількість споживаного палива значно перевищує можливості власного видобутку, тому методи його ефективного використання безпосередньо впливають на енергетичну безпеку держави. Крім того, малоефективне споживання вуглеводневих палив негативно позначається на стані навколишнього середовища через збільшення теплових викидів.

Значна частина споживання вуглеводневого палива припадає на двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Висока надійність та економічність, значний діапазон агрегатної потужності та відпрацьована конструкція забезпечили широке розповсюдження таких двигунів у світі.

Найбільш економічними і енергетично ефективними є малообертові двигуни внутрішнього згоряння (МОД), які найчастіше використовують в якості суднових головних двигунів та у складі стаціонарних дизельних електростанцій. Енергетичну ефективність МОД вимірюють ефективним коефіцієнтом корисної дії (ККД), який у сучасних моделей перевищує 50 %. Ступінь досконалості МОД є майже граничною на існуючому технологічному рівні. Між тим, близько половини енергії палива не використовується корисно, а відводиться у навколишнє середовище у вигляді теплоти вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР): відпрацьованих газів, надувного повітря, охолоджуючої води та масла. Одним з ефективних методів вдосконалення дизельних енергетичних установок є утилізація теплоти ВЕР МОД з отриманням додаткової механічної або електричної потужностей, як найбільш дорогих видів енергії. Відповідно до сучасних МОД, ефективна утилізація теплоти вторинних енергетичних ресурсів ускладнена низьким їх температурним потенціалом. Так, температура відпрацьованих газів сучасних моделей малообертових ДВЗ не перевищує 540 К.

Одним зі шляхів підвищення ефективності утилізації теплоти ВЕР МОД, є застосування утилізаційних металогідридних установок, створення яких базується на значному позитивному досвіді використання металогідридних акумуляторів та термосорбційних компресорів водню.

У вітчизняній та зарубіжній літературі відсутні результати досліджень ефективності утилізаційних металогідридних установок відповідно до параметрів ВЕР сучасних малообертових ДВЗ, хоча важливим аспектам рішення проблеми створення та удосконалення таких установок і пристроїв присвячено дослідження відомих організацій: Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАНУ, НУК ім. адм. Макарова, НИИ НПО «ЛУЧ», Sandia National Laboratories, а також вчених та фахівців: Скороход В.В., Солонін Ю.М., Солонін С. М., Щур Д.В., Загінайченко С.Ю. Соловей В.В., Білогуб О.В., Міщенко А.І., Шмалько Ю. Ф., Яртись В.А., Тимошевський Б.Г., Беляков С.Ю., Ткач М.Р., Соловей О.І., Іжванов Л.О., Alefeld G., Reilly J. J., van Swaaij W. P. M., Visaria M.

Таким чином, науково-прикладна задача, яка вирішується у дисертації – підвищення ефективності утилізації теплоти вторинних енергетичних ресурсів сучасних малообертових ДВЗ шляхом раціональної організації процесів енергоперетворення в їх утилізаційних металогідридних установках – є актуальною та викликає великий практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до тематичного плану фундаментальних, прикладних науково-дослідних держбюджетних та госпрозрахункових робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова:

– № 1813 «Розробка науково-технічних основ створення когенераційних установок на основі водневих термохімічних циклів», ДР № 0111U002313 (2011-2013 рр.);

– № 11.2014/01 «Розробка сонячно-водневої металогідридної установки» (2015 р.);

– № 1995 «Розробка та створення зразку комбінованої системи енергопостачання на базі водневих гідридних технологій», ДР № 0111U000306 (2015-2016 рр.).

У цих роботах здобувач брав участь у якості відповідального виконавця (виконавця) на посаді наукового (молодшого наукового) співробітника.

Метою наукового дослідження є підвищення енергетичної ефективності та потужності енергетичних установок на базі малообертових двигунів внутрішнього згоряння шляхом утилізації теплової енергії їх вторинних енергетичних ресурсів в утилізаційних металогідридних установках.

Основні задачі наукового дослідження:

– розробка способу утилізації теплоти металогідридними установками безперервної дії, схемних і конструктивних рішень, що його реалізують;

– виявлення впливу властивостей робочого тіла на ефективні та енергетичні показники утилізаційної установки відповідно до параметрів МОД;

– встановлення впливу регенерації енергії на енергетичні та ефективні показники утилізаційної установки відповідно до параметрів МОД;

– експериментальне дослідження робочого тіла і фізичних моделей елементів утилізаційних металогідридних установок безперервної дії;

– вироблення рекомендацій щодо вибору металогідридного матеріалу для створення робочого тіла утилізаційної металогідридної установки безперервної дії, з урахуванням температурного режиму роботи установки;

– впровадження результатів дослідження в практику проектування утилізаційних установок сучасних малообертових ДВЗ.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є процеси енергоперетворення в утилізаційних металогідридних установках малообертових двигунів внутрішнього згоряння.

Предметом дослідження є закономірності та параметри процесів енергоперетворення в утилізаційних металогідридних установках малообертових двигунів внутрішнього згоряння.

Методи дослідження. В якості методів дослідження в дисертаційній роботі використовуються методи: *системного підходу* (системного аналізу), при аналізі властивостей утилізаційної установки; *фізичного моделювання*, при створенні фізичних моделей елементів утилізаційної установки; *планування експерименту*, при проведенні експериментального дослідження режимів сорбції суспензії металогідридного матеріалу; *математичного моделювання* на основі фундаментальних рівнянь термодинаміки, при створенні математичних моделей утилізаційної металогідридної установки та її елементів.

Наукові результати, які автор захищає**, та їх новизна:**

Вперше:

– встановлено, що використання металогідридних установок безперервної дії для утилізації тепла ВЕР МОД дозволяє зменшити питому витрату палива енергетичних установок з малообертовими дизелями на 6…20 г/(кВт·год), при використанні в якості компонента робочого тіла матеріалів з питомою ентальпією гідридоутворення ΔH = 30…35 кДж/(мольH_2) та рівноважною температурою при тиску 0,1 МПа T^* = 280…290 К ($V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$, $ZrCrFe_{1,6}$);

– визначено, що коефіцієнт корисної дії утилізаційних металогідридних установок безперервної дії, відповідно до параметрів енергетичних установок з малообертовими дизелями, становить 8…24 %, а питома потужність зазначених установок – 0,7…4,1 МВт/(кг/с);

– запропоновано застосування внутрішньої регенерації енергії в утилізаційних металогідридних установках безперервної дії для умов їх експлуатації з малообертовими дизелями, що дозволяє при регенерації механічної енергії збільшити ККД утилізаційної установки на 1…3 %, а при регенерації теплової енергії – на 6…14 %;

О***тримав подальший розвиток*** підхід до визначення потужності водневої розширювальної машини у складі утилізаційної металогідридної установки, який на відміну від існуючих враховує реальні властивості водню, які розраховані на основі рівняння стану в уточненій формі, що дозволило на 2…8 % підвищити точність визначення її потужності.

Достовірність отриманих у роботі результатів та висновків забезпечена застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних засобів та методів. Достовірність експериментальних даних забезпечена використанням сучасних комп'ютеризованих вимірювальних комплексів та високою точністю вимірювальних приладів (границя основної допустимої похибки перетворювачів тиску та температури 0,5 % і 1 % відповідно). Розрахункові значення параметрів елементів утилізаційної металогідридної установки зіставлялися з їх експериментальними значеннями, які були отримані під час досліджень. Відхилення експериментальних та розрахункових значень складає 9…12 %. Отримані у роботі результати є логічними, не суперечать практиці використання металогідридних установок та даним інших авторів.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблені рекомендації по вибору металогідридних матеріалів для утилізаційних металогідридних установок відповідно до параметрів МОД;

– розроблено та реалізовано програмний пакет розрахунку параметрів та показників утилізаційних металогідридних установок відповідно до параметрів МОД;

– розроблена та створена експериментальна модель металогідридного реактора активного типу;

– модернізовано експериментальний стенд для визначення сорбційних характеристик металогідридних матеріалів;

– розроблена та створена модельна утилізаційна металогідридна установка безперервної дії;

– створена сучасна 24–канальна комп'ютеризована система вимірювань, що дозволяє реєструвати теплотехнічних параметри експериментальних стендів.

Впровадження результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи та методики розрахунку параметрів утилізаційних металогідридних установок використовуються на підприємствах ДП «ПКБ Черноморсуднопроект» та ПАТ «Енерготехнологія» при виконанні проектно-конструкторських робіт, які пов'язані з застосуванням утилізації теплоти ВЕР МОД та проектуванні установок з використанням металогідриду як робочого тіла. Програмний пакет розрахунку та експериментальні стенди використовуються в науковому та навчальному процесі кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при читанні лекцій, на практичних заняттях, у процесах дипломного проектування.

Особистий внесок автора при отриманні наукових результатів полягає в розробці фізичних моделей елементів металогідридної утилізаційної установки та проведенні їх експериментальних досліджень; розробці математичної моделі утилізаційних металогідридних установок; визначенні впливу властивостей робочого тіла на параметри утилізаційної металогідридної установки безперервної дії; удосконаленні методики розрахунку водневих розширювальних машин.

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертації апробовані на науково-практичних семінарах кафедри ДВЗ Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова у 2011–2016 роках та наступних наукових конференціях, де отримали позитивну оцінку наукової спільноти: II-VII Міжнародна науково технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2011-2016 рр.); XVII-XXI Міжнародний конгрес двигунобудівників (Рибаче, Коблево, 2013-2016 рр.); II-IV Міжнародна науково технічна конференція «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2012-2016 рр.); IV, VII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2013, 2016 рр.); V Міжнародна науково технічна конференція «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (Миколаїв, 2013 р.); VI-VII Міжнародні науково-технічні конференції «Судова енергетика: стан та проблеми» (Миколаїв, 2013, 2015 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 20 наукових праць, з них 8 статей у фахових наукових виданнях по технічним наукам, що входять у перелік,

затверджений ДАК МОН України, з яких 7 входять до міжнародних наукометричних баз і 12 тез міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, пяти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 146 сторінок, рисунків – 60, таблиць – 4. Список використаних джерел містить 168 найменувань на 19 сторінках. У додатках наведено акти впровадження результатів досліджень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, викладені наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, зазначений особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи та публікації за темою дослідження.

У **першому розділі** проаналізовані шляхи утилізації теплоти ВЕР МОД для отримання додаткової механічної та електричної потужності, наведено основні напрямки удосконалення МОД, тепловий баланс сучасних моделей таких двигунів та визначено обмеження використання існуючих утилізаційних установок. Показано, що низький температурний потенціал ВЕР сучасних МОД змушує вдосконалювати існуючі та шукати нові способи їх утилізації, одним з яких є застосування новітніх циклів та робочих тіл.

Утилізаційні металогідридні установки основані на ефекті залежності тиску сорбції водню низкою інтерметалідів (з утворенням металогідридів) від рівноважної температури, який супроводжується виділенням теплоти реакції гідридоутворення. Десорбція водню з металогідриду пов’язана з поглинанням теплоти реакції гідридоутворення. Це дає змогу генерації водню високого тиску шляхом підвищення температури металогідриду за рахунок теплової енергії ВЕР ДВЗ. Такий процес супроводжується зниженням концентрації водню у металогідриді. Генерація корисної механічної енергії в утилізаційній металогідридній установці внаслідок перетворення потенційної енергії водню, пов’язана зі зниженням його тиску. Водень низького тиску поглинається металогідридом зі зниженою концентрацією водню, що отримано при генерації водню високого тиску. Цей процес потребує підтримання рівноважної температури металогідриду, що відповідає низькому тиску водню шляхом відведення теплоти реакції гідридоутворення у навколишнє середовище.

Відомі утилізаційні металогідридні установки реалізують циклічний принцип роботи, що пов’язано насамперед з нерухомим станом металогідриду у тепло-масообмінних апаратах (десорбері та сорбері) та призводить до низької ефективності перетворення енергії внаслідок незворотних втрат енергії у процесах нагріву та охолодження цих апаратів.

Безперервний принцип роботи утилізаційної металогідридної установки, що реалізується шляхом використання металогідриду у вигляді суспензії в інертному (до процесу поглинання водню) носії, дає змогу суттєво зменшити незворотні втрати енергії та підвищити ефективність перетворення теплової енергії у механічну.

Переміщення суспензії металогідриду між апаратами такої утилізаційної установки потребує додаткових витрат механічної енергії. Реалізація внутрішньої регенерації енергії додатково зменшує незворотні втрати енергії та ще підвищує ефективність перетворення ВЕР МОД у механічну енергію.

Розгорнутий аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій встановив, що процеси, які протікають в утилізаційних металогідридних установках безперервної дії (далі – утилізаційних металогідридних установках) досліджені в недостатній мірі. Як наслідок, відсутні рекомендації щодо вибору робочих тіл та параметрів таких утилізаційних установок. Тому процеси перетворення енергії ВЕР МОД в утилізаційних металогідридних установках потребують подальшого теоретичного та експериментального дослідження.

У **другому розділі** розроблено технологічну карту наукового дослідження, що дозволило логічно пов’язати запит практики, головну та допоміжні задачі дослідження, основні наукові результати дисертації, практичну цінність та впровадження результатів роботи. Аналіз існуючих теоретичних та експериментальних методів досліджень дозволив сформулювати принципи моделювання процесів, що протікають в утилізаційних металогідридних установках безперервної дії. В процесі експериментальних досліджень використано комп'ютерну систему вимірювань КСВ–24, яка дозволяє: отримувати та обробляти аналоговий сигнал з 24 первинних перетворювачів, перетворювати отриманий сигнал в цифровий формат, відображати в режимі реального часу цифрові значення параметрів та графічне їх представлення на дисплеї комп'ютера, проводити фіксацію отриманих значень. На базі аналізу методичної, систематичної та випадкової складових показано, що максимальне значення похибки вимірювань температури, надлишкового тиску та витрати рідин не перевищує 2,8 %, що дає змогу вважати, що використані методи та засоби експериментальних досліджень відповідають сучасному рівню.

Третій розділ містить в собі результати експериментального вивчення закономірностей та параметрів процесів в елементах утилізаційних металогідридних установок.

Визначення сорбційних характеристик (взаємозалежності рівноважних значень тиску та температури з вмістом водню) елементів робочого тілу установок – металогідридів виконано на стенді циклічної дії *РТС*-1 (рис.1).

Стенд забезпечив виконання необхідних технологічних операцій підготовки (активація, гідрирування, дегідрирування) та дослідження металогідриду при утриманні параметрів елементів у припустимих межах.

Дослідження сорбційних характеристик металогідридів $LaNi_{4,55}Al_{0,45}$, $LaNi_{4,5}Mn_{0,5}$, $LaNi_{4,75}Cu_{0,25}$ та $LaNi_{4,5}Al_{0,5}$, $MmNi_{4,5}Al_{0,}5$ (поставленого Jiangsu University of Science & Technology, КНР) показало, що в діапазоні температур 300…500 К значення рівноважного тиску складає 0,5…5 МПа при максимальній сорбційній ємності за воднем 1,05…1,35 %.

Вивчення характеристик робочого тілу утилізаційних металогідридних установок виконано з використанням суспензії металогідриду $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ у гасі КО 25 ОСТ 38.01407–86 з додаванням стабілізатору – олеїнової кислоти

ГОСТ 7580–91. Дослідження седиментаційної стійкості робочого тіла встановило наявність оптимального, для умов експерименту, значення концентрації стабілізатора – 0,75 %, що забезпечило максимальний час осідання часток металогідриду.

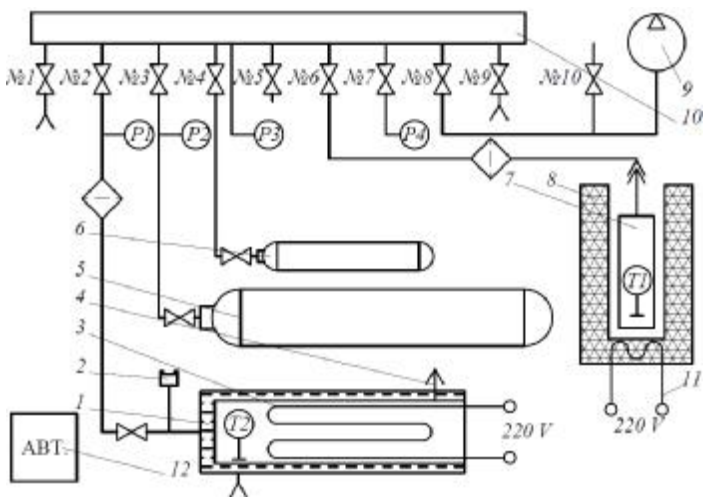
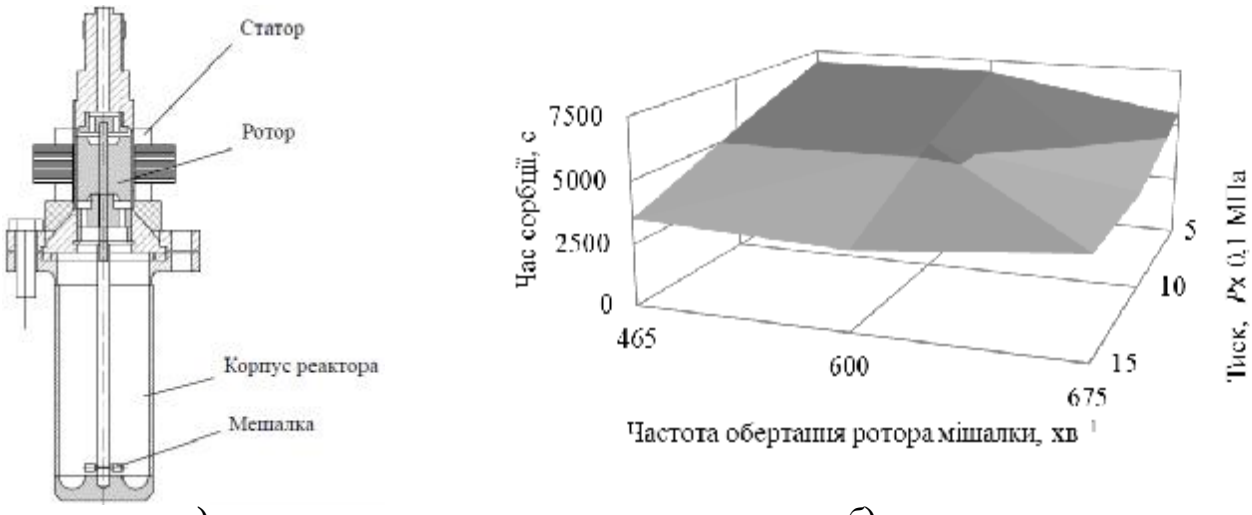


Рис. 1. Схема стенду *РТС*–1:
1 – металогідридний акумулятор-компресор, 2 – запобіжна мембрана, 3 – нагрівальний елемент, 4 – контур охолодження гідридного акумулятора-компресора, 5 – велика вимірювальна ємність, 6 – мала вимірювальна ємність, 7 – реторта, 8–піч, 9 – вакуумний насос, 10 – ресивер, 11 – нагрівальний елемент печі, 12 – блок автоматики

Дослідження сорбційних характеристик робочого тіла виконано з використанням створеного експериментального тепло та масообмінного апарату – реактору активного типу з максимальним робочим тиском 2,5 МПа та внутрішнім об’ємом $0{,}218 \cdot 10^{-3}$ м^3 (рис. 2.а). Дослідження впливу інтенсивності перемішування робочого тіла на його сорбційні характеристики довело, що поглинання водню виявлено лише за наявності механічного перемішування суспензії. Відповідно до діапазону тисків водню 0,5…1,5 МПа, експериментально встановлено, що збільшення частоти обертання із 480 до 680 хв$^{-1}$ дозволяє скоротити час сорбції водню робочим тілом утилізаційної металогідридної установки на 21...27 % (рис. 2.б).



а) *б*)

Рис. 2. Реактор активного типу (а) та залежність часу сорбції водню від частоти обертання ротору активатору та тиску водню (б)

Вивчення параметрів модельної утилізаційної металогідридної установки виконано на стенді УМГУ–3. Генерація водню високого тиску з робочого тіла, яка супроводжується зменшенням його концентрації у металогідридні, здійснюється у десорбері при температурі 350…380 К, а відновлення робочого тіла шляхом поглинання водню низького тиску металогідридом – у сорбері при температурі 290…310 К. Транспортування робочого тіла установки між сорбером та десорбером здійснюється мембранним насосом з пневматичним приводом LGPE-C 3/8 LUTZ-JESCO America Corp. Нагрів робочого тіла до температур 350...370 К здійснюється у теплообміннику, пов'язаному з електричним нагрівачем. Витрата водню визначається за перепадом тиску на вимірювальній ділянці, що складається з двох співвісних каналів діаметром 8 мм, між якими встановлена дросельна шайба з трубками відбору тиску, до яких підключений диференційний манометр. Вимірювальна дільниця тарована індивідуально волюметрічним методом. За результатами досліджень визначені значення температур, тиску та витрат робочого тіла – суспензії металогідриду $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ у гасі КО 25 ОСТ 38.01407–86 та олеїновій кислоті ГОСТ 7580–91 (об'ємні концентрації 0,15; 0,84; 0,0075), водню та енергоносіїв контурів нагріву та охолодження. Визначено теплові баланси елементів та стенду в цілому.

Проведені експериментальні дослідження продемонстрували технічну доцільність створення утилізаційних металогідридних установок з безперервним принципом дії. Отримані характеристики процесів перетворення енергії в таких установках забезпечили базу для їх математичного моделювання.

Четвертий розділ присвячено математичному моделюванню та теоретичним дослідження ефективності використання ВЕР сучасних МОД утилізаційними металогідридними установками.

В процесі математичного моделювання утилізаційна металогідридна установка розглядається як система, що складається з в елементів, які пов'язані потоками маси та енергії, що передаються енергоносіями: водень, суспензія металогідриду, відпрацьовані гази та технічні рідини (рис. 3).

Показником ефективності утилізації теплоти ВЕР МОД є ефективний ККД утилізаційної установки η_e, який визначається як відношення ефективної потужності утилізаційної металогідридної установки N_e до витрат теплоти ВЕР, яка складається з витрат теплоти на підігрів суспензії до температури десорбції – $Q_н$, на забезпечення реакції десорбції водню з суспензії – $Q_д$ та на перегрів водню до температури на вході в водневу розширювальну машину (РМ) T_2 – $Q_п$:

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_н + Q_д + Q_п}. \quad (1)$$

Ефективна потужність утилізаційної металогідридної установки:

$$N_e = N_t - N_n - N_Г - N_Х - N_в \quad (2)$$

де N_t – потужність водневої розширювальної машини, N_n – потужність, живильного насосу, $N_Г$ – потужність насоса контуру нагріву, $N_Х$ – потужність насоса контуру охолодження, $N_в$ – потужність, витрачена на перемішування суспензії в сорбері. Температурні рівні, на яких працює установка обмежуються (з урахуванням відповідних температурних напорів) температурами ВЕР МОД та охолоджуючого

теплоносія (забортної води у судновому варіанті установки) відповідно до процесів десорбції та сорбції.

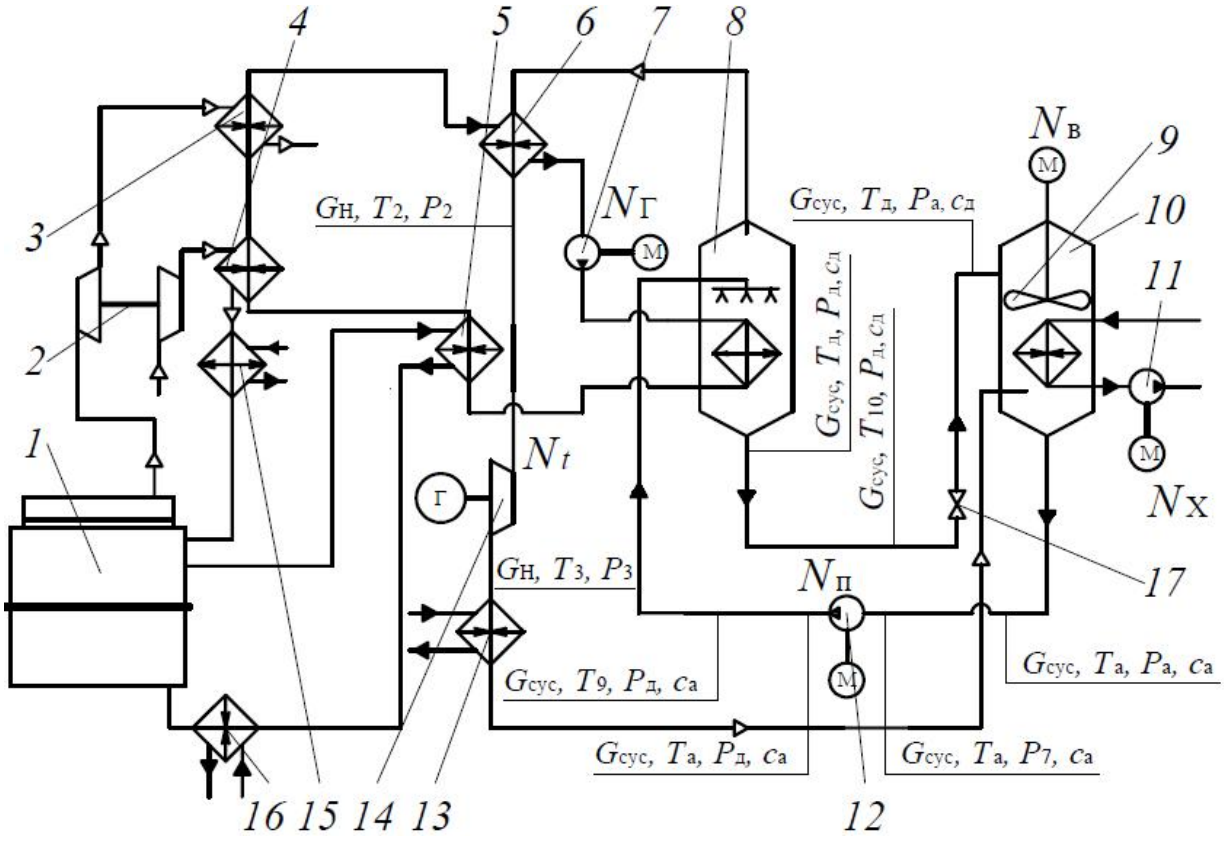


Рис. 3. Розрахункова схема утилізаційної металогідридної установки МОД:
1 – МОД, 2 – турбокомпресор, 3, 4, 5 – утилізаційні теплообмінники відхідних газів, надувного повітря і охолоджуючої рідини, 6 – перегрівач водню, 7 – циркуляційний насос контуру нагріву, 8 – десорбер, 9 – пристрій перемішування, 10 – сорбер, 11 – циркуляційний насос контуру охолодження, 12 – живильний насос, 13 – нагрівач водню, 14 – воднева РМ, 15 – охолоджувач наддувного повітря, 16 – охолоджувач води зарубашкового простору; 17 – дросельний пристрій

Потужність N_t водневої РМ, визначається витратою водню G_H і наявним ізоентропійним теплоперепадом водню ΔH_{H2}, з урахуванням ККД водневої РМ η_O:

$$N_t = G_H \Delta H_{H2} \eta_O = G_H K_{neid} \Delta H_{IG} \eta_O . \quad (3)$$

Процеси сорбції/десорбції водню реалізуються в широкому діапазоні значень тиску та температури в залежності від властивостей металогідриду та зовнішніх умов, тому при визначені потужності водневої РМ, водень розглядається як реальний газ. Співвідношення наявних ізоентропійних теплоперепадів водню, при моделюванні його як реального та як ідеального газу враховано коефіцієнтом неідеальності K_{neid}:

$$K_{neid} = \Delta H_{H2} / \Delta H_{IG} , \ \Delta H_{IG} = c_P T_2 (1 - (\frac{P_2}{P_3})^{-m}) , \ m = (k-1)/k , \quad (5)$$

де c_P=14300 Дж/(кг·К) , k=1,404.

Властивості водню за моделлю реального газу розраховано з використанням рівняння стану в уточненій формі (Leachem, J.W. та співавт.).

Як свідчать отримані результати, в діапазоні параметрів на вході в водневу РМ тиску P_2 = 5…35 МПа та тиску на виході з водневої РМ P_3 = 0,5…2,0 МПа значення

коефіцієнта неідеальності K_{neid} , змінюється в діапазоні 1,02…1,08 (рис. 4). Варіювання (за умов постійних значень P_2 та P_3) температури на вході у РМ у діапазоні T_2 = 400…500 К призводить до зміни значення K_{neid}, не більш ніж 0,8 %.

Потужність, що витрачена на перекачування суспензії з сорбера в десорбер – потужність живильного насосу:

$$N_{\text{П}} = Q_C (P_{\text{д}} - P_{\text{а}}) / \eta_{\text{П}}, \tag{6}$$

$$Q_{\text{С}} = Q_{\text{НОС}} + Q_{\text{МГ}} = \frac{Q_{\text{МГ}}}{c_{\text{МГ}}} + Q_{\text{МГ}} = (\frac{1}{c_{\text{МГ}}} + 1) Q_{\text{МГ}}, \tag{7}$$

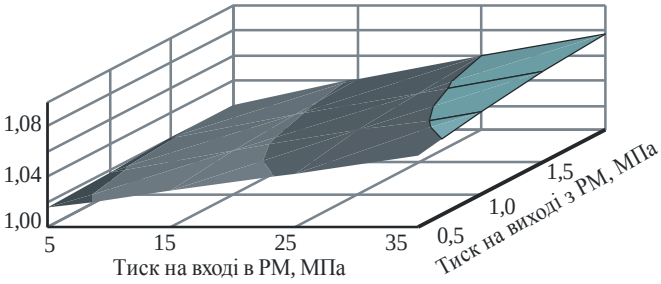


Рис. 4 Залежність коефіцієнту неідеальності K_{neid} від параметрів РМ (при T_2=500 К)

де $Q_{\text{С}}$ – об'ємна витрата суспензії, що перекачується, $Q_{\text{НОС}}$ – об'ємна витрата носія, $Q_{\text{МГ}}$ – об'ємна витрати металогідриду, $\eta_{\text{П}}$ – ККД живильного насосу, $c_{\text{МГ}}$ – об'ємна концентрація металогідриду носії.

Об'ємна витрата металогідриду $Q_{\text{МГ}}$:

$$Q_{\text{МГ}} = G_{\text{МГ}} / \rho_{\text{МГ}}, \tag{8}$$

де $\rho_{\text{МГ}}$ – густина металогідриду.

Масова витрата гідридоутворюючого матеріалу, $G_{\text{МГ}}$ залежить від сорбційної ємності гідридоутворюючого матеріалу c і масової витрати водню G_H:

$$G_{\text{МГ}} = G_H / c, \; c = c_{\text{а}} - c_{\text{д}}, \tag{9}$$

де $c_{\text{а}}$, $c_{\text{д}}$ – сорбційна ємність металогідриду на виході з сорберу та десорберу.

Потужність насосів контурів нагріву та охолодження, визначена виходячи з об'ємних витрат теплоносіїв та гідравлічного опору відповідних контурів:

$$N_{\Gamma} = \Delta V_{\Gamma\text{Т}} \Delta P_{\Gamma} / \eta_{\Gamma}; \; N_{\text{Х}} = \Delta V_{\text{ХТ}} \Delta P_{\text{Х}} \eta_{\text{Х}}, \tag{10}$$

де ΔP_{Γ} , $\Delta P_{\text{Х}}$ – втрати тиску внаслідок гідравлічного опору теплообмінників і трубопроводів контурів нагріву та охолодження; $\Delta V_{\Gamma\text{Т}}$,$\Delta V_{\text{ХТ}}$ – об'ємні витрати теплоносіїв контурів; η_{Γ}, $\eta_{\text{Х}}$ – ККД циркуляційних насосів контурів.

Температура на вході в водневу розширювальну машину T_2 визначається температурою ВЕР двигуна, зменшеною на величину необхідного температурного напору ΔT_2. Тиск перед розширювальною машиною P_2 визначається тиском десорбції $P_{\text{д}}$, з урахуванням гідравлічного опору перегрівача водню і трубопроводів, що з'єднують десорбер, перегрівач водню і розширювальну машину,

$$P_2 = P_{\text{д}} \nu_2, \tag{11}$$

де $P_{\text{д}}$ – тиск десорбції, ν_2 – коефіцієнт відновлення повного тиску ділянки перед водневою РМ.

Тиск за водневою розширювальною машиною визначається тиском сорбції $P_{\text{а}}$, з урахування гідравлічного опору системи між РМ та сорбером

$$P_3 = P_{\text{а}} / \nu_5, \tag{12}$$

де P_3 – тиск після розширювальної машини, ν_5 – коефіцієнт відновлення повного тиску ділянки після водневої РМ.

Величини рівноважних тисків десорбції та сорбції визначаються у вигляді співвідношень Вант-Гоффа (13) для металогідриду. Так, тиск десорбції $P_д$ визначається температурою десорбції $T_д$ та термодинамічними властивостями металогідриду (питомі значеннями ентальпії ΔH та ентропії ΔS гідридоутворення):

$$\lg P_д = \frac{\Delta H}{T_д R} - \frac{\Delta S}{R}, \qquad (13)$$

де $P_д$ – тиск десорбції, 0,1·МПа, R = 8,314 кДж/(моль·К) – універсальна газова стала.

Значення тиску сорбції $P_а$ визначається за залежністю (13) температурою сорбції $T_а$ з врахуванням коефіцієнту гістерезису тисків сорбції та десорбції.

Властивості металогідриду зручно характеризувати рівноважною температурою при тиску 0,1 МПа – T^*, яка дорівнює відношенню питомих значень його ентальпії ΔH та ентропії ΔS гідридоутворення:

$$T^* = \Delta H / \Delta S . \qquad (14)$$

Витрати теплоти на підігрів суспензії до температури десорбції:

$$Q_н = G_C c_p^C (T_д - T_а), \qquad (15)$$

де c_P^C – питома масова теплоємність суспензії.

Витрати теплоти на забезпечення реакції десорбції водню з суспензії:

$$Q_д = \Delta H \cdot G_H . \qquad (16)$$

Витрати теплоти на перегрів водню до температури на вході в водневу РМ – T_2 :

$$Q_П = G_H c_p^H (T_2 - T_д), \qquad (17)$$

де c_P^H – питома теплоємність водню в діапазоні температур $T_д ... T_2$.

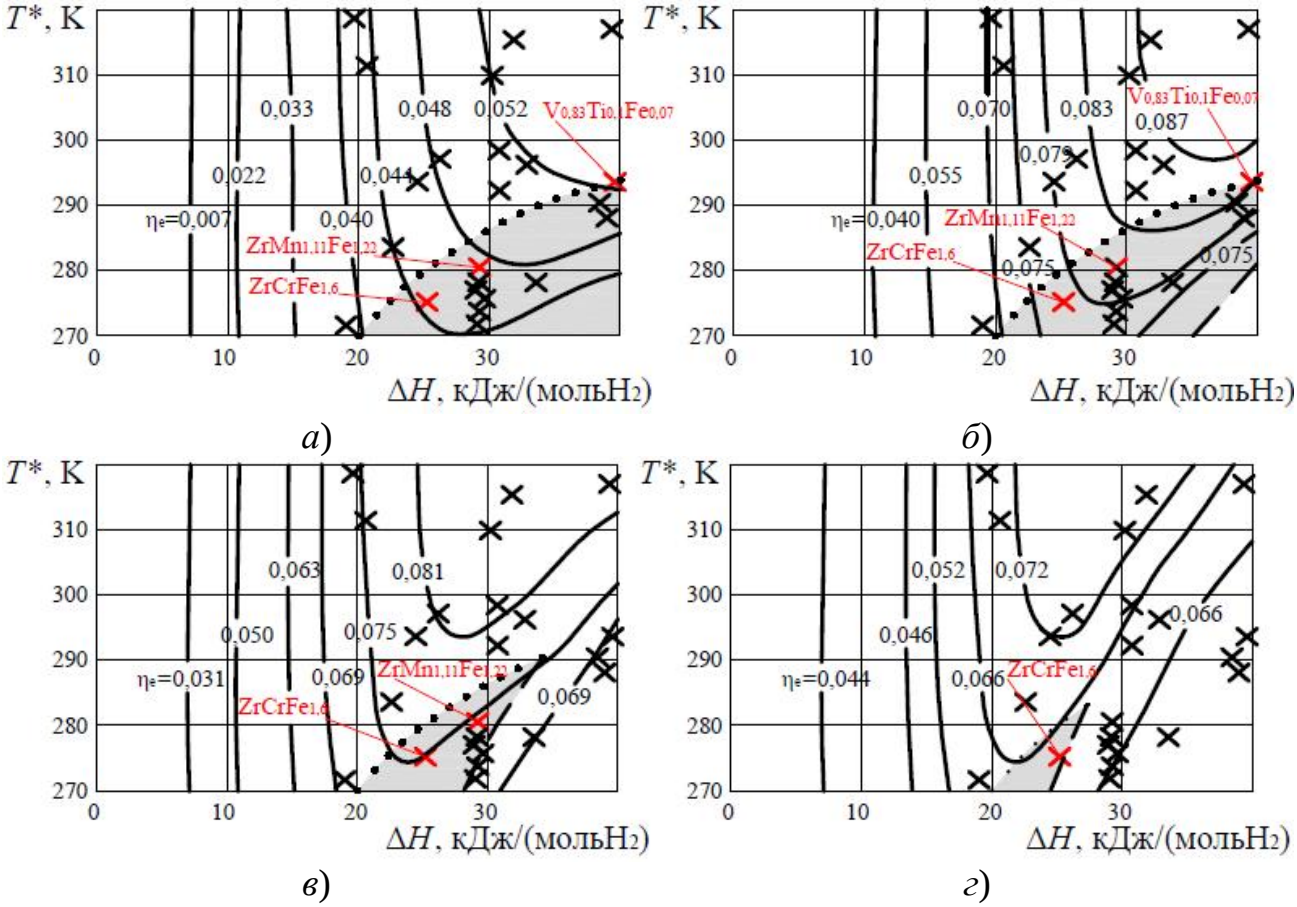
Верифікацію математичної моделі проведено шляхом порівняння експериментальних даних, отриманих на стенді УМГУ–3, з результатами тестових розрахунків за математичною моделлю. Максимальне відхилення розрахункових та експериментальних значень теплових потужностей сорбера, десорбера, регенераційного теплообмінника складає 9…12 %.

Вплив властивостей робочого тіла утилізаційної металогідридної установки на показники її ефективності вивчено відповідно до металогідридів, внесених до бази даних, яка створена в НУК та містить в собі 250 матеріалів з ΔH від 5 кДж/(мольH_2) до 60 кДж/(мольH_2) та T^* від 250 К до 350 К. Термодинамічні характеристики металогідридів (ΔH та T^*) визначаються, як правило, експериментально та відносяться до величин, що змінюються дискретно. В процесі математичного моделювання ефективності утилізаційних металогідридних установок доцільно прийняти параметри ΔH та T^* такими, що змінюються безперервно, а при аналізі ефективності використання конкретних матеріалів – застосовувати дискретні їх значення.

Визначення ефективності утилізаційних металогідридних установок проведено у діапазоні температур десорбції $T_д$ = 350…500 К відповідно до параметрів ВЕР сучасних МОД. З урахуванням необхідних температурних напорів діапазон зміни температур водню на вході в РМ T_2 = 400…500 К, та температур десорбції – $T_д$ = 350…500 К. Прийняті властивості металогідриду: $\rho_{МГ}$ = 8000 кг/м^3,

$c_P^{МГ}$ = 480 Дж/(кг·К), c = 1 %, $c_{МГ}$ = 15 % (за об'ємом); ККД насосів – 0,9. Властивості рідини-носія: $\rho_{НОС}$ = 800кг/м^3, $c_P^{НОС}$ = 2100 Дж/(кг·К).

Результати дослідження ефективності утилізаційних металогідридних установок представлені у вигляді ізоліній постійних значень їх ефективного ККД в залежності від термодинамічних характеристик металогідридів – ΔH та T^* (рис. 5). Прийнято, що з урахуванням умов експлуатації максимальний допустимий тиск водню дорівнює P_{max} = 15 МПа, а мінімальний допустимий тиск – P_{min} = 0,5 МПа. Залежність максимального допустимого тиску P_{max} водню від термодинамічних характеристик металогідридів – ΔH та T^* показано на рис.5 штриховою лінією, а мінімального допустимого – P_{min} – точковою. Область раціональних значень тиску водню обмежена лініями максимального та мінімального допустимих значень тиску водню та позначена сірим кольором.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 5. Ефективний ККД металогідридної утилізаційної установки η_e в залежності від властивостей металогідриду при температурах десорбції:
а) $T_д$ = 350 К, *б*) $T_д$ =400 К, *в*) $T_д$ =450 К, *г*) $T_д$ =500 К

× – властивості існуючих металогідридів;
— — – максимальний допустимий тиск водню P_{max} = 15 МПа;
• • • • • – мінімальний допустимий тиск водню P_{min} = 0,5 МПа;
▒ – область раціональних значень тиску водню

Термодинамічні характеристики низки відомих металогідридів (ΔH та T^*) ідентифіковано хрестоподібними маркерами, що відображає ККД утилізаційних металогідридних установок, створених на їх основі (див. рис. 5). Як свідчать

результати, що отримано, в умовах, що розглянуто, значення ККД утилізаційних металогідридних установок, близьке до найбільшого, складає 8,3%...8,4% та досягається при температурі десорбції порядку $T_д$ = 400 K, ΔH =30..35 кДж/(мольH_2) та T^* = 280…290 K. Для досягнення зазначеної ефективності раціонально використовувати, наприклад, металогідрид $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ з T^*= 293,93 K і ΔH = = 39,68 кДж/(мольH_2). Близькі значення ефективності утилізаційної металогідридної установки реалізуються за умови використання металогідриду $ZrMn_{1,22}Fe_{1,11}$ – 4,6...8,1%, проте діапазон раціональних температур десорбції при цьому знаходиться в більш широкому інтервалі 350…450 K. При використанні матеріалу $ZrCrFe_{1,6}$ в діапазоні температур десорбції $T_д$ = 400…450 K ККД утилізаційної установки досягає 7,5...6,4%.

Визначення питомої (при масовій витраті водню 1 кг/с) потужності утилізаційних металогідридних установок – $N_{уд}$ в умовах, що наведено вище, свідчить, що її значення змінюється від 0,5 МВт/(кг/с) до 4,3 МВт/(кг/с) . Як свідчать данні, що отримано, більші значення $N_{уд}$ відповідають більш високим температурам десорбції. Так, при температурі десорбції $T_д$ = 350K в залежності від властивостей металогідриду питома потужність утилізаційної установки складає $N_{уд}$ = 0,47...1,37 МВт/(кг/с), збільшуючись при підвищенні величини ΔH. Підвищення температури десорбції до $T_д$ = 400 K, збільшує значення питомої потужності утилізаційної установки до $N_{уд}$ = 1,74...3,32 МВт/(кг/с). Подальше підвищення температури десорбції до $T_д$ = 450…500 K призводить до подальшого збільшення значення – $N_{уд}$ = 2,4... 4,3 МВт/(кг/с).

Відповідно до наведених вище металогідридів значення питомої потужності утилізаційної металогідридної установки 0,76…4,11 МВт/(кг/с). Так, в діапазоні температур десорбції $T_д$ = 350…500 K для матеріалу $ZrCrFe_{1,6}$, питома потужність складає 0,75…4,10 МВт/(кг/с). В діапазоні температур десорбції $T_д$ = 350…450 K для металогідриду $ZrMn_{1,11}Fe_{1,22}$ $N_{уд}$ = 1,01...3,72 МВт/(кг/с), а для $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ $N_{уд}$ = = 1,38…3,36 МВт/(кг/с)

Аналіз потоків енергії між елементами утилізаційної металогідридної установки дозволив визначити шляхи підвищення її ефективності за рахунок регенерації енергії – механічної та теплової. Регенерація механічної енергії реалізована шляхом перетворення потенційної енергії суспензії високого тиску на виході з десорберу 8 для підвищення тиску суспензії низького тиску на виході з сорберу 10, та здійснюється у турбонасосному агрегаті (ТНА) 18 (рис. 6).

Регенерація теплової енергії забезпечує у регенеративному теплообміннику 17 підігрів суспензії на вході до десорберу 8 за рахунок охолодження її на виході з десорберу.

Потужність турбінної секції ТНА:

$$N^{P}_{РМ} = Q_C(P_д - P_а)\eta^{P}_{РМ}, \qquad (18)$$

де $\eta^{P}_{РМ}$ – ККД турбінної секції турбонасосного агрегату.

Потужність насосної секції ТНА :

$$N^{P}_{Н} = N^{P}_{РМ}\eta^{P}_{Н} = Q_C(P_д - P_а)\eta^{P}_{РМ}\eta^{P}_{Н} = Q_C(P_д - P_а)\eta^{P}_{ТНА},$$

$$\eta^{\text{P}}_{\text{THA}} = \eta^{\text{P}}_{\text{PM}}\eta^{\text{P}}_{\text{H}}, \qquad (19)$$

де $\eta^{\text{P}}_{\text{H}}$ – ККД насосної секції о турбонасосного агрегату, $\eta^{\text{P}}_{\text{THA}}$ – ККД ТНА.

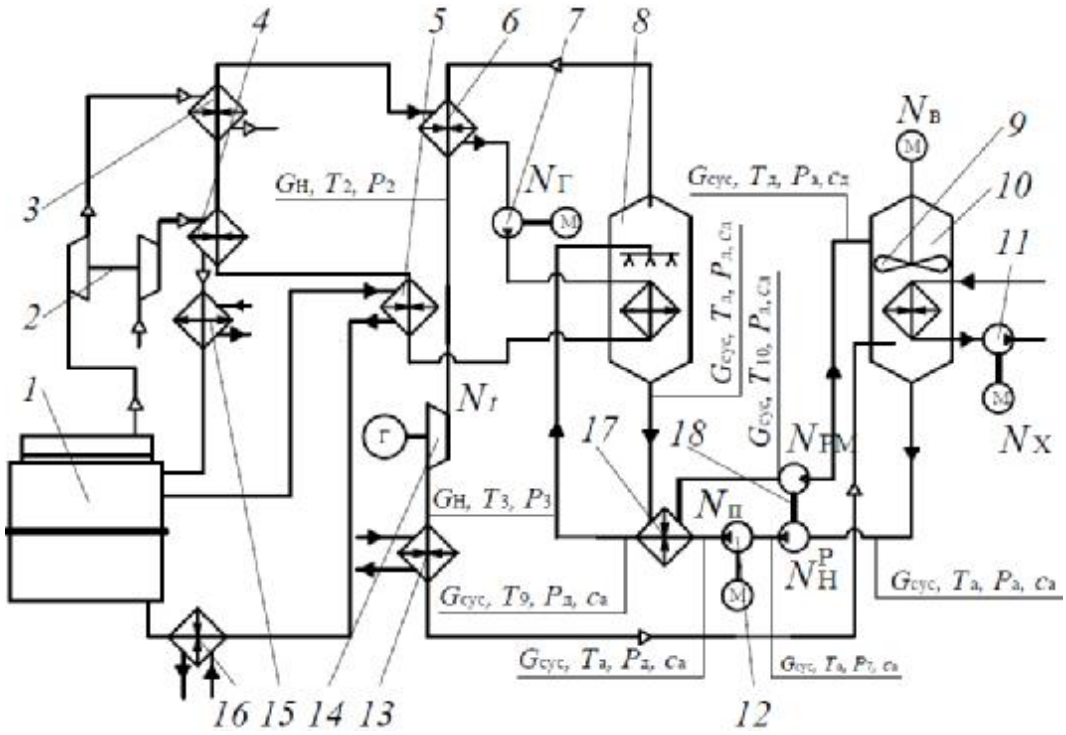


Рис. 6. Утилізаційна металогідридна установка з регенерацією енергії для малообертового ДВЗ: 1 …16 – відповідають рис.3, 17 – регенераційний теплообмінник, 18 – турбонасосний агрегат

З урахуванням регенерації механічної енергії, потужність живильного насосу утилізаційної металогідридної установки з регенерацією енергії:

$$N_{\text{П}} = Q_C(P_{\text{д}} - P_{\text{a}})/\eta_{\text{П}} - N^{\text{P}}_{\text{H}}. \qquad (20)$$

Ефективність регенерації теплової енергії в утилізаційній металогідридній установки враховано ступенем регенерації теплової енергії r_t:

$$r_t = (T_9 - T_a)/(T_{\text{д}} - T_{\text{a}}). \qquad (21)$$

З урахуванням регенерації теплової енергії, витрата теплоти на підігрів суспензії до температури десорбції $Q_{\text{н}}$ утилізаційної металогідридної установки з регенерацією енергії:

$$Q_{\text{H}} = G_{\text{C}}c^{\text{C}}_p(T_{\text{д}} - T_{\text{a}})\cdot(1 - r_t). \qquad (22)$$

Визначення ефективного ККД η_{e} утилізаційної металогідридної установки з регенерацією енергії виконано по залежностям (1) – (6), (10) – (14), (16), (17) з урахуванням (20) та (22).

Вплив ступеню регенерації енергії на ефективність утилізаційної металогідридної установки з регенерацією енергії визначено для металогідридів з ΔH = 10…40 кДж/(мольН$_2$) та T^* = 270…320 К, в діапазонах температур десорбції – $T_{\text{д}}$ = 350…500 К та температур на вході в РМ T_2=400…500 К при: $\rho_{\text{МГ}}$ =8000 кг/м^3, $c_{\text{P}}^{\text{МГ}}$ = 480 Дж/(кг·К), c = 1 %, $c_{\text{МГ}}$ = 15 % (за об’ємом), $\eta_{\text{Г}} = \eta_{\text{X}}$ = 0,9, $\rho_{\text{НОС}}$ = 800 кг/м^3, $c_{\text{P}}^{\text{НОС}}$ = 2100 Дж/(кг·К). Діапазон варіювання величини ступеню регенерації теплової енергії прийнятий r_t = 0…0,9, з урахуванням необхідного температурного напору у регенераційному теплообміннику, а діапазон значень коефіцієнту корисної дії ТНА – $\eta^{\text{P}}_{\text{THA}}$ = 0...0,9.

Для утилізаційної металогідридної установки з регенерацією енергії, відповідно до параметрів МОД найкращі значення ККД забезпечуються використанням робочого тіла на базі металогідриду, який характеризується комплексом показників: ентальпією гідридоутворення ΔH = 25...30 кДж/(мольH_2), температурою при тиску 0,1 МПа – T*= 270..280 K, найбільш високою зворотною сорбційною ємністю та мінімальним значенням коефіцієнта гістерезису.

Як свідчать результати, що отримано, для металогідриду з ΔH = = 26,6 кДж/(мольH_2) та T* = 274 K, вплив ступеню регенерації теплової енергії на ефективність утилізаційної металогідридної установки більш істотний, ніж регенерації механічної енергії (рис. 7). Так, при температурах десорбції 450…500 K , підвищення значення ступеню регенерації з r_t = 0,1 до r_t = 0,9 призводить до збільшення ККД утилізаційної металогідридної установки з 0,11 до 0,24. В тих же умовах, варіювання значення ККД турбонасосного агрегату у діапазоні $\eta^{P}_{\text{ТНА}}$ = 0…0,9 призводить до збільшення ККД утилізаційної металогідридної установки на 1…3 % в залежності від температури десорбції.

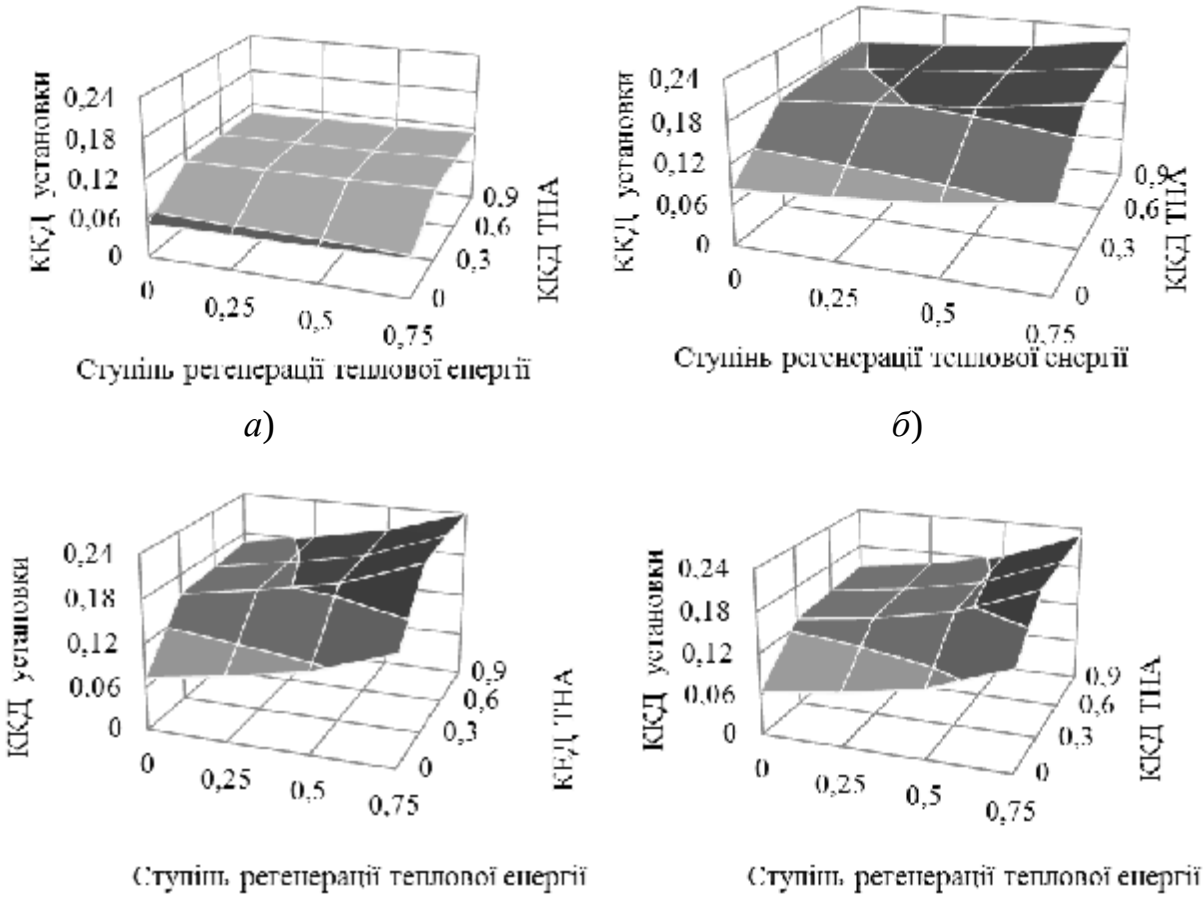


Рис. 7. Ефективність металогідридної утилізаційної установки з регенерацією енергії при температурах десорбції $T_д$ (ΔH = 26,6 кДж/мольH_2, T* = 274 K):
а) $T_д$ = 350 K, *б*) $T_д$ = 400 K, *в*) $T_д$ = 450 K, *г*) $T_д$ = 500 K

В умовах заданої потужності утилізаційної металогідридної установки МОД, використання матеріалу з більшим значенням зворотної сорбційної ємності *с*

призводить до підвищення ККД установки, внаслідок зменшення масових витрат металогідриду і рідини-носія (при фіксованій масовій концентрації металогідриду в носії). З існуючих матеріалів, до зазначених вимог наближаються наступні металогідриди: $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$, $ZrMn_{1,11}Fe_{1,22}$, $ZrCr_{Fe1,6}$, $LaNi_5$, $LaNi_{4,5}Al_{0,5}$, $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$. Так для металогідриду $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ підвищення значення c з 0,8% до 1,0% призводить до зростання ККД утилізаційної металогідридної установки (r_t=0,44, η^P_{THA} =0,6) з 12,6 до 14,0 %, в залежності від температури десорбції.

Порівняння визначених значень ефективного ККД утилізаційних металогідридних установок свідчить, що, відповідно до параметрів малообертових ДВЗ, регенерація енергії дозволила суттєво підвищити їх ефективність та у декілька разів перевищити ККД утилізаційних металогідридних установок циклічної дії (рис. 8).

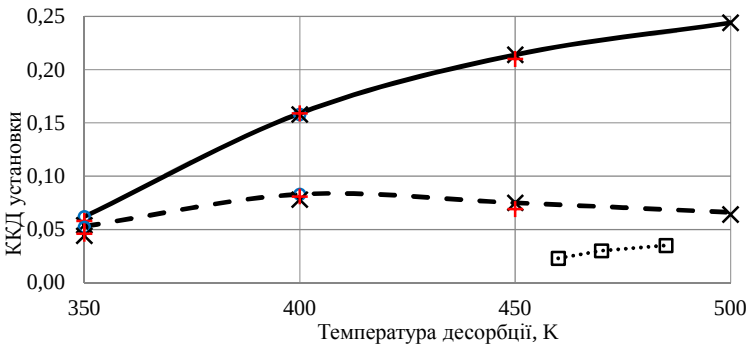


Рис. 8. Ефективність утилізаційних металогідридних установок МОД:
——— – з регенерацією енергії (r_t=0,9, η^P_{THA}=0,9);
- - - - –без регенерації енергії;
…… – циклічної дії

Металогідриди: □ – TiFe; ○ – $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$; × $ZrCrFe_{1,6}$; + $ZrMn_{1,1}Fe_{1,22}$

У п’ятому розділі розглянуто використання науково-прикладних результатів, що отримано, для обґрунтування прийняття схем вибору параметрів утилізаційних металогідридних установок на етапах передпроектних проробок та проектних робіт. Результати досліджень впроваджені на ДП «ПКБ Черноморсудопроект» у вигляді розробки проекту утилізаційної металогідридної установки для суднового двигуна MAN 9G80ME-C9.2-TII (9ДКРН 80/372, 43,3 МВт, 72 хв$^{-1}$ на режимі MCR). Доведено, що використання запропонованих технічних рішень, дозволяє отримати додаткову потужність 3,0…3,2 МВт, при цьому маса апаратів утилізаційної металогідридної установки не перевищує 5,4 % маси МОД. На вимогу ПАТ «Енерготехнологія» виконано передпроектну проробку утилізаційної металогідридної установки відповідно до малообертового двигуна 12K90MC-S (12ДКРН 90/230, 54,8 МВт, 104 хв$^{-1}$ на режимі MCR) стаціонарної електростанції. Результати, що отримано, вказують на можливість підвищення потужності електростанції на 4…5 МВт, при цьому підвищення питомої вартості 1 кВт встановленої потужності складає 10,7…23,6 % .

Теоретичні та експериментальні результати дисертаційних досліджень та створена експериментальна база використані при реалізації проекту «Сонячно-воднева металогідридна установка» за замовленням Jiangsu University of Science & Technology. Показано, що в кліматичних умовах півдня КНР отримання водню (чистотою 99,9%) потребує питомої площі сонячних панелей 55…60 м^2/кгH_2.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено спосіб утилізації теплоти вторинних енергетичних ресурсів сучасних МОД ($T_{ВГ}$ = 510…550 К) та схемні рішення, що їх реалізують. При цьому схемні рішення містять десорбер, сорбер, перегрівач водню, регенераційний теплообмінний апарат, водневу розширювальну машину, живильний насос та турбонасосний агрегат. Робочими тілами таких установок є водень та суспензія металогідриду в інертній до процесу поглинення водню рідині.

2. Встановлено, що при використанні металогідридів з характерною рівноважною температурою (при рівноважному тиску 0,1 МПа) T^* = 280...290 К та питомою ентальпією гідрідоутворення ΔH = 30...35 кДж/(мольН$_2$) (наприклад $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ і $ZrCrFe_{1,6}$) у якості компонента робочого тіла металогідридної установки безперервної дії, значення ККД установки відповідно до сучасних моделей МОД досягає 7,3…8,5 %.

3. Визначено, що використання регенерації механічної енергії в утилізаційних металогідридних установках дозволяє збільшити значення їх ККД на 1…3 %, а регенерація теплової енергії – на 6…14 %. При цьому ступінь регенерації теплової енергії обмежена температурним напором регенераційного теплообмінного $\Delta T_{рег}$ = 10 К, що відповідає ступені регенерації теплової енергії r_t = 0,9.

4. Показано, що ККД утилізаційної металогідридної установки при використанні гідридоутворюючого матеріалу $ZrCrFe_{1,6}$, регенерації механічної та теплової енергії ($\eta^{P}_{ТНА}$ = 0,95, r_t = 0,9) досягає значень 22…24 %.

5. Розроблено та реалізовано підхід до визначення потужності водневої розширювальної машини, що враховує реальні властивості водню та визначено що відношення її потужностей, при розгляданні водню як реального та ідеального газів становить 1,02…1,08 для температури на вході 400…500 К, тиску на вході 5…35 МПа та тиску на виході 0,5…2 МПа.

6. Встановлено, що питома потужність утилізаційної металогідридної установки становить 1,8…4,1 МВт/(кг/с) при ступенях розширення водню у водневій РМ 5...32, температурі водню на вході 350...500 К та тиску на виході 0,5...15 МПа

7. Визначено, що інтенсивність процесу сорбції водню робочим тілом утилізаційної металогідридної установки забезпечується наявністю механічного активатора; відповідно до суспензії металогідриду $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ в інертній рідини (гас КО 25) збільшення частоти обертання ротору активатора з 480 до 680 хв$^{-1}$ веде до скорочення часу сорбції на 19…24 % та відповідному зменшенню розмірів масообмінних апаратів установки.

8. Встановлено, що параметром, який характеризує розподіл енергії в утилізаційних металогідридних установках, є температура десорбції та визначено що її раціональні значення для металогідридів з параметрами ΔH=30...35 кДж/(мольН$_2$) та T^*= 280...290 К в умовах прийнятих обмежень (P_{min} = 0,5 МПа, P_{max} = 15 МПа, $\eta^{P}_{ТНА}$ = 0,9, r_t = 0,9) складають 350...400 К ($V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$) та $T_д$ = 400...450 К ($ZrCrFe_{1,6}$).

9. Використання теплоти вторинних енергетичних ресурсів суднового малообертового двигуна MAN 9G80ME C9.2 (42,3 МВт, 72 об/хв) утилізаційною металогідридною установкою забезпечує збільшення механічної потужності енергетичної установки на 3,0…3,2 МВт. Утилізація теплоти вторинних енергетичних ресурсів малообертового двигуна MAN 12K90MC-S (54,84 МВт, 104 об/хв) стаціонарної електростанції, при використанні робочого тіла на основі металогідридного матеріалу $ZrCrFe_{1,2}$, забезпечує вироблення додаткової механічної потужності 1,4...5,2 МВт.

10. Основні результати дисертаційної роботи використані в ДП «ПКБ Черноморсудопроект» та ПАТ «Енерготехнологія» при проектуванні суднових та стаціонарних енергетичних установок на базі малообертових двигунів внутрішнього згоряння з утилізаційними металогідридними установками, при створенні сонячно-водневої металогідридної установки та використовуються у навчальному процесі Національного університету кораблебудування при виконанні дипломного проектування та у магістерських роботах за спеціальністю «Двигуни внутрішнього згоряння».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації, які опубліковано в наукових **фахових виданнях:**

1. Утилизация низкопотенциального тепла малооборотных ДВС на базе гидридных технологий / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Авиационно-космическая техника и технология, 2013. – № 8(105). – С. 61-66.

2. Утилизация низкопотенциального тепла ДВЗ 9G80 ME металогидридной установкой непрерывного действия/ М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – № 1. – С. 35–41.

3. Эффективность утилизации низкопотенциального тепла металлогидридными установками непрерывного действия / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Авиационно-космическая техника и технология – 2014. –№ 9(116). – С. 39–44

4. Влияние регенерации энергии на эффективность утилизации низкопотенциального тепла металлогидридной установкой непрерывного действия / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Двигатели внутреннего сгорания – 2014. –№ 2. – С. 57–62.

5. Характеристики рабочего тела металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Авиационно-космическая техника и технология – 2015. –№ 9 (126). – С. 123–128.

6. Удельная мощность металлогидридных утилизационных установок непрерывного действия М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Авиационно-космическая техника и технология – 2015. –№ 10 (127). – С. 106–110.

7. Галынкин, Ю.Н. Экспериментальное исследование компонентов рабочего тела металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия [Текст] / Ю. Н. Галынкин // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 4 (460). – С. 30 – 33

8. Утилизация тепла вторичных энергоресурсов малооборотных двигателей стационарных электростанций металлогидридными установками непрерывного действия / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Вестник двигателестроения – 2016. –№ 2. – С. 31–35.

Публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

9. Ткач, М. Р. Создание экспериментального стенда для исследования утилизация тепла ДВС гидридной машиной непрерывного действия [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, Ю.Н.

Галынкин // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції: – Миколаїв:НУК, 2011. –С. 250-253.

10. Экспериментальная утилизационная металлогидридная установка непрерывного действия [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин // XVII - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2012. –С. 95.

11. Термохімічна система утилізації низькопотенційного тепла на базі металогідридної технології [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин, Д.О. Цимбал, М.Н. Бобров // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції: – Миколаїв:НУК, 2012. – С. 237-238.

12. Гидридные системы утилизации тепла малооборотных ДВС [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали міжнародної конференції. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 118-121.

13. Эффективность утилизации тепла .ДВС 9G80 на основе гидридной технологии [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: Матеріали п’ятої міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 168-169.

14. Ткач, М. Р. Експериментальне дослідження гідридного реактору для утилізації тепла малообертових ДВЗ [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, Ю.М. Галинкін // Всеукраїнська науково-практична конференція Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування Всеукраїнська науково-практична конференція. 2013, – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2013. – С. 160-161.

15. Ткач, М. Р. Дослідження гідридної суспензії для гідридних теплоутилізаційних установок [Текст] / М. Р. Ткач Б. Г. Тимошевський, Ю.М. Галинкін // Судова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції студентів, асірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв, НУК, 2013. – С. 163-165.

16. Ткач, М. Р. Вплив параметрів робочого тіла металогідридної установки безперервної дії на ефективність утилізації тепла малообертових ДВЗ [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Ю.М. Галинкін // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції: – Миколаїв:НУК, 2014. – С. 226-229.

17. Ткач, М. Р. Определение удельной мощности утилизационных металлогидридных установок непрерывного действия [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Ю.Н. Галынкин // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали міжнародної конференції, Миколаїв: НУК, 2014. – С. 8-10.

18. Ткач, М. Р. Розрахунок водневого детандеру як елемента утилізаційної металогідридної установки безперервної дії [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Ю.М. Галинкін // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 95-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала макарова. – Миколаїв:НУК, 2015. – С. 203-206.

19. Ткач, М. Р. Масогабаритні показники металогідридної установки безперервної дії, утилізуючої тепло стаціонарних малообертових двигунів [Текст] / М. Р. Ткач Б. Г. Тимошевський, Ю.М. Галинкін // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції: – Миколаїв:НУК, 2016. – С. 149-151.

20. Особливості розрахунку водневих розширювальних машин [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.М. Галинкін // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. 7-ма Міжнародна науково-практична конференція. 2013, – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 85-86.

АНОТАЦІЯ

Галинкін Ю. М. Підвищення ефективності утилізаційних металогідридних установок малообертових дизелів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв, 2016.

Дисертацію присвячено вирішенню завдання підвищення ефективності утилізації теплоти вторинних енергетичних ресурсів малообертових двигунів внутрішнього згоряння шляхом використання установок, створених на основі утилізаційних металогідридних неперервних циклів.

Проаналізовано та визначено існуючі найбільш перспективні шляхи утилізації низько потенційного теплоти малообертових двигунів. Встановлено, що для підвищення ефективності утилізації необхідно використовувати робоче тіло, у якого робочий температурний діапазон відповідає робочому температурному діапазону малооообертових двигунів. Таке робоче тіло створено на основі гідридоутворюючого матеріалу і інертної до процесу поглинання водню рідини, отримана таким чином гідридна суспензія разом з воднем дає можливість організації безперервної роботи металогідридного циклу.

Розроблені методики отримання суспензії гідридоутворюючого матеріалу та експериментально підтверджена можливість використання такої суспензії у якості робочого тіла установок для утилізації низькопотенційної теплоти.

Розроблено математичну модель утилізаційної металогідридної установки безперервної дії. Вироблені рекомендації щодо вибору металогідридних матеріалів виходячи з умов досягнення найбільшого ККД установки і питомої потужності. Досліджено вплив регенерації механічної і теплової енергії на ККД утилізаційної установки для температур десорбції 350...500 К.

ККД утилізаційної металлогидридной установки безперервної дії при використанні гідрідоутворюючого матеріалу $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ становить 8,3 %, при використанні $ZrCrFe_{1,6}$ – 7,5 %. Використання регенерації енергії (η_{THA}^{P} = 0,9, r_t = 0,9) при використанні матеріалу $ZrCrFe_{1,6}$ дозволяє досягти значень ККД утилізаційної установки 24%.

Ключові слова: утилізація, водень, металогідрид, суспензія, малообертовий двигун внутрішнього згоряння, вторинні енергетичні ресурси.

АННОТАЦИЯ

Галынкин Ю. Н. Повышение эффективности утилизационных металлогидридных установок малооборотных дизелей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова. – Николаев, 2016.

Диссертация посвящена решению задачи повышения эффективности утилизации теплоты, созданных на основе утилизационных металлогидридных непрерывных циклов.

Проанализированы и определены существующие наиболее перспективные пути утилизации низкопотенциального теплоты малооборотных двигателей. Установлено, что для повышения эффективности утилизации необходимо использовать рабочее тело, свойства которого позволяют реализовать рабочий процесс преобразования энергии в температурном диапазоне вторичных энергоресурсов малооборотных двигателей. Такое рабочее тело создано на основе суспензии гидридообразующего материала в инертной органической жидкости. Такое рабочее тело позволяет организации непрерывной рабочий цикл утилизационной установки.

Разработаны методики получения суспензии гидридообразующего материала и экспериментально подтверждена возможность использования этой суспензии в качестве рабочего тела установок для утилизации низкопотенциальной теплоты.

Экспериментальные определены свойства рабочего тела на основе суспензии металлогидридного материала $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ и керосина КО 25 для металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия. Установлено влияние давления и частоты вращения активатора на скорость поглощения водорода суспензией.

Разработана математическая модель металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия. Определён КПД и удельная мощность утилизационной установки в

условиях ограничения по максимальному и минимальному давлениях. Установлено влияние концентрации гидридообразующего материала в носителе, сорбционной ёмкости водорода, температуры десорбции на КПД и удельную мощность. Выработаны рекомендации по выбору металлогидридных материалов исходя из условий достижения наибольшего КПД установки и удельной мощности. Исследовано влияние регенерации механической и тепловой энергии на КПД утилизационной установки.

Установлено, что КПД утилизационной металлогидридной установки непрерывного действия при использовании гидридообразующий материалов $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ составляет 8,3%, при использовании $ZrCrFe_{1,6}$ – 7,5%. Использование регенерации энергии (η_{THA}^{P} = 0,9, r_t = 0,9) при использовании материала $ZrCrFe_{1,6}$ позволяет достичь значений КПД утилизационной установки 24%.

Определены параметры утилизационных металлогидридных установок непрерывного действия применительно к конкретным моделям современных малооборотных двигателей, выполнена проработка массогабаритных показателей аппаратов утилизационных установок.

Ключевые слова: утилизация, водород, суспензия, металлогидрид, малооборотный двигатель внутреннего сгорания, вторичные энергетические ресурсы.

ABSTRACT

Halynkin Y. M. Increased efficiency the utilization metal hydride plants of low speed diesel engines. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of the technical sciences, specialty 05.05.03 – engines and power plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding. – Mykolaiv, 2016.

Dissertation is devoted to solving problem for the increasing efficiency of the secondary low-grade heat energy from low-speed engines due to usage of the metal hydride continuous operation cycles.

Analyze and determine the most efficient ways for low-grade heat utilization from low-speed engines. It was found that improving of the utilization efficiency can be reached due to usage of the metal-hydride slurry as working fluid. It's properties allow to implement the operation process of the energy conversion in the temperature range of the secondary energy from the low-speed engines. This operation substance is created on the base of the slurry of hydride-forming material in inert organic liquid. This operation substance enables to implement the continuous duty cycle of the plants for low-grade heat utilization.

It is experimentally elaborated the methodic for the metal-hydride slurry production and experimentally confirmed the possibility of this suspension usage as the operation substance for low-grade heat recycling.

Experimentally determine the properties of the operation substance of the metal-hydride slurry based on $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ and kerosene KO 25 for the continuous operation utilization plants. Established the activation effect from pressure and rotation frequency on the absorption rate of hydrogen slurry.

A mathematical model of metal hydride utilization plant of the continuous operation, recommendations on the choice of metal-hydride materials on the basis of conditions to achieve maximum plant efficiency and specific power. The effect of the recovery of mechanical the desorption temperature of 350 ... 500 K.

The utilization efficiency of the installation of a continuous metal hydride using a hydride-forming materials $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ is 8.3%, when using $ZrCrFe_{1,6}$ – 7,5%. Use of energy recovery (η_{THA}^{P} = 0,9, r_t = 0,9) using $ZrCrFe_{1,6}$ – 7,5%. material achieves efficiency values of 24% of the utilization installation.

Keywords: waste heat recovery systems, hydrogen, metal hydride material, suspension, low-speed internal combustion engine.