

**THE RISK OF HYDROGEN EXPLOSION IN A SUBMARINE P.I  
CATALYTIC COMBUSTION OF HYDROGEN**

**ZAGROŻENIE WYBUCHEM WODORU NA OKRĘCIE PODWODNYM CZ.I  
KATALITYCZNE DOPALANIE WODORU**

**ОПАСНОСТЬ ВЗРЫВА ВОДОРОДА НА ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ Ч1  
КАТАЛИТИЧЕСКОЕ СЖИГАНИЕ ВОДОРОДА**

**GEFAHR EINER WASSERSTOFFEXPLOSION AUF EINEM U-BOOT, TEL I  
KATALYTISCHE NACHVERBRENNUNG VON WASSERSTOFF**

**RIESGO DE EXPLOSIÓN DE HIDRÓGENO EN SUBMARINOS I, PARTE  
POST-COMBUSTIÓN CATALÍTICA DE HIDRÓGENO**

Ryszard Kłós

Polish Naval Academy, Department of Underwater Work Technology in Gdynia, Poland  
Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

**STRESZCZENIA / ABSTRACTS**

The series of articles discuss issues related to conducting high risk projects on the example of modernisation of hydrogen incinerators on a submarine. The article depicts a technical problem situation connected with catalytic hydrogen combustion on a submarine.

**Key words:** submarine, risk of hydrogen explosion.

W cyklu artykułów przedstawiono problematykę prowadzenia projektu dużego ryzyka na przykładzie modernizacji spalarek wodoru na okręcie podwodnym. W artykule opisano techniczną sytuację problemową związaną z katalitycznym dopalaniem wodoru na okręcie podwodnym.

**Słowa kluczowe:** okręt podwodny, zagrożenie wybuchem wodoru.

В цикле статей представлена проблематика управления проектом высокого риска на примере модернизации сжигателей водорода на подводной лодке. В статье описана проблемная техническая ситуация, связанная с каталитическим сжиганием водорода на подводной лодке.

**Ключевые слова:** подводная лодка, опасность взрыва водорода.

In einer Reihe von Artikeln wird die Problematik der Einführung einer Projekts mit hohem Risiko anhand der Modernisierung der Brennöfen in einem U-Boot. In dem Artikel wird die problematische technische Situation infolge katalytischen Nachbrennens mit Wasserstoff auf einem U-Boot beschrieben.

**Key words:** unterseeboot, wasserstoff-explosionsgefahr.

En este ciclo de artículos se presenta la problemática de la realización de proyectos de alto riesgo, tomando como ejemplo la modernización de incineradores de hidrógeno en submarinos. El artículo describe la problemática técnica que supone la post-combustión catalítica de hidrógeno en el interior de un submarino.

**Palabras clave:** submarino, riesgo de explosión de hidrógeno.

---

ARTICLE INFO

---

PolHypRes 2016 Vol. 56 Issue 3 pp. 7 - 24

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.1515/phr-2016-0015

Pages: 18, figures: 6, tables: 1

page **www** of the periodical: [www.phr.net.pl](http://www.phr.net.pl)

**Typ artykułu: oryginalny**  
**Original article**

**Termin nadesłania:** 02.07.2016r.

**Termin zatwierdzenia do druku:** 15.08.2016r.

**Publisher**

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



## WSTĘP

Sytuacja problemowa dotyczyła możliwości przeprowadzenia modernizacji spalarek wodoru polegającej na zastąpieniu lub regeneracji wkładów katalizatora mając na uwadze:

- rezygnację z dostaw z Rosji,
- ekstremalnie krótki czas realizacji projektu,
- niski budżet projektu,
- presję spowodowaną tym, że projekt był jedynie małym elementem zakresu remontu okrętu podwodnego,
- brak zaplecza do prowadzenia tego rodzaju prac i małe kompetencje w zakresie badań nad katalizą.

Akademia Marynarki Wojennej zawsze podejmowała się rozwiązywania sytuacji problemowych związanych z logistyką i eksploatacją sprzętu i uzbrojenia wojskowego. Pomimo dużego ryzyka projektowego wzięto pod rozwagę utrzymanie dobrej reputacji Akademii, jako ośrodka skupiającego specjalistów od eksploatacji sprzętu wojskowego i uzbrojenia.

Podstawą sukcesu przy wysoko ryzykownych projektach jest posiadanie nie tylko techniki<sup>1</sup> zarządzania oraz koncentracji na celu, lecz przede wszystkim posiadanie zdyscyplinowanego, przeszkolonego, stale uczącego się zespołu specjalistów umiejących pracować grupowo. Zakład Technologii Prac Podwodnych budował swe kompetencje w pracy zespołowej przez dziesięciolecia, podejmując się realizacji ambitnych, lecz co za tym idzie ryzykownych projektów, skupiających w sobie zarówno badania przemysłowe, prace wdrożeniowe jak i eksploatację różnego rodzaju techniki<sup>2</sup>.

Doświadczenia własne w zakresie budowy urządzeń do katalizacyjnego dopalania wodoru zostały opisane wcześniej jako wynik projektu zleconego przez Departament Polityki Zbrojeniowej Ministerstwa Obrony Narodowej p.t.: „Systemy podtrzymania życia na okręcie podwodnym” umowa nr 20/DPZ/3/OTM/S/WR/MON/2002/706 z dn.11.09.2002 [1].

## WPROWADZENIE

Zabezpieczenie przeciwpożarowe na okręcie podwodnym OP który z natury swej misji działa w odosobnieniu, stanowi kluczową sytuację problemową z punktu widzenia bezpieczeństwa załogi i zabezpieczenia misji bojowych. Jednym z czynników stwarzających potencjalne zagrożenie pożarowe i wybuchowe jest wodór, który może być emitowany zawsze, lecz najintensywniej przy ładowaniu integralnego zestawu baterii akumulatorów.

Utrzymywane w szczelności jam akumulatorowych zmniejsza wydatnie emisję wodoru poza ich objętość. Jamy posiadają w tym celu specjalną budowę szczelnych zbiorników a włączy uszczelnienia. Należy jednak liczyć się zawsze z możliwością wycieku wodoru poza jamy ze względu na dużą jego lotność i możliwości penetracyjne.

Okręt podwodny zabezpiecza się przeciw koncentracji wyciekającego z jam wodoru prowadząc monitoring jego stężenia w atmosferze przedziałów oraz wentylację jam akumulatorowych niedopuszczającą do zwiększania się w nich jego zawartości.

Najczęściej realizowany jest wewnętrzny

## INTRODUCTION

The scenario considered in this article concerns the possibility of modernising hydrogen incinerators, the task consisting in the replacement or regeneration of catalyst cartridges, with consideration to the following issues:

- resignation from supplies from Russia,
- an extremely short period of time for project implementation,
- low project budget,
- pressure caused by the fact that the project constituted only a small part in the scope of the renovation works on the submarine,
- lack of infrastructure to conduct this type of works and insufficient competences within research on catalysis.

The *Polish Naval Academy* has always dealt with problems connected with logistics and utilisation of military equipment and arms. Despite the large project risk, keeping the *Academy's* good reputation as a centre for the grouping of specialists in the utilisation of military equipment and arms was taken into account as a crucial condition.

The basis for success in highly risky projects consists not only in applying a proper management technique<sup>1</sup> and being focused on the objective, but firstly in having a disciplined and qualified team of specialists that know how to work together. The *Institute of Underwater Works Technology* has been developing its competences within teamwork for decades, undertaking the implementation of ambitious and therefore risky projects, including industrial research, implementation works and utilisation of various types of techniques<sup>2</sup>.

The organisation's own experiences, within the construction of devices for catalytic hydrogen combustion, have been described previously as an outcome of a project commissioned by the *Armament Policy Department of the Ministry of National Defence* entitled: "Life support systems on submersible vessels" agreement no. 20/DPZ/3/OTM/S/WR/MON/2002/706 of 11.09.2002 [1].

## INTRODUCTION

The fire protection system provided on a submarine, which by the nature of its purpose works independently, constitutes a potential problem from the point of view of the crew's safety and the security of any given combat mission. One of the factors that forms the fire and explosion hazard on board is hydrogen, which can be emitted continuously, however reveals the greatest intensity during charging of the integral battery packs.

Ensuring battery compartments are airtight significantly reduces external hydrogen emission. For this purpose the said compartments are characterised by a special construction of sealed containers with sealed manholes. Nonetheless, we should always take into account the possibility of hydrogen leakage due to its high volatility and penetrative properties.

Submarines are secured against hydrogen leakage from the compartments by monitoring its concentration in the atmosphere of particular compartments and ventilating battery compartments to prevent its accumulation.

monitoring stężenia wodoru w jamach akumulatorowych prowadzony w ramach ogólnokrętowego systemu monitoringu atmosfery. Na niektórych okrętach istnieją także możliwości zassania próbek z jam akumulatorowych przez systemy rurek do poboru próbek i zanalizowania składu atmosfery jam akumulatorowych przy pomocy przenośnego urządzenia analitycznego.

Ostrzeżenie przed niekontrolowanym przeciekami wodoru z jam akumulatorowych na pomieszczenia bytowania załogi najczęściej realizowane jest przez system wyposażony w czujniki umieszczone w pobliżu włazów do jam i w wybranych pomieszczeniach załogi. Pomiary stężenia wodoru w pomieszczeniach bytowania załogi powinny być także realizowane periodycznie przez służbę dyżurną przy wykorzystaniu przenośnych analizatorów.

Wentylacja jam akumulatorowych może być realizowana w systemie otwartym lub z dopalaniem wodoru w systemie zamkniętym. System otwarty wentylacji wykorzystywany jest najczęściej podczas ładowania układów akumulatorów w porcie czy podczas pływania w położeniu nawodnym lub na chrapach. Awaryjnie istnieje zazwyczaj także możliwość wyrzutu powietrza z jam akumulatorowych na duże pomieszczenia. Daje to możliwość rozcieńczenia wodoru w objętości powietrza przedziału. Taki wariant realizowany jest jedynie awaryjnie w sytuacji bojowej, przykładowo podczas szybkiego zanurzania okrętu po forsownym ładowaniu akumulatorów na powierzchni.

Dopalanie wodoru realizowane jest poprzez systemy katalitycznego spalania wodoru w powietrzu. Złoże katalityczne znajduje się w spalarkach wodoru. Zrzut z systemu dopalania realizowany jest do atmosfery okrętu podwodnego. Działanie spalarek jest dopuszczalne jedynie, gdy stężenie wodoru nie przekracza dolnej granicy wybuchowości. Dlatego system dopalania wodoru powinien pracować pod nadzorem.

Z przeprowadzonej analizy kontekstowej metodą SWOT<sup>3</sup> wyciągnięto następujące wnioski:

- Jak na razie nie istnieją na rynku dobre rozwiązania dopalaczy wodoru, którymi można byłoby zastąpić istniejące systemy.
- Badania krajowe doprowadziły do powstania demonstratorów technologii, które dają nadzieję na szybkie opracowanie efektywnych systemów mogących zastąpić istniejące, wypracowane instalacje.
- Posiadana baza laboratoryjna nie jest wyposażona w specjalne stanowiska do badania instalacji dopalania wodoru, dlatego przy podejmowaniu się doraźnych napraw musi być ona budowana doraźnie.
- Posiadane doświadczenie może stanowić przesłankę dającą nadzieję na wykonanie modernizacji systemów dopalania wodoru, choć niesie za sobą ryzyko braku pozytywnych efektów takich działań.

## SYTUACJA PROBLEMOWA

Problematyka utylizacji powstającego w procesie technologicznym wodoru, który stwarza zagrożenie wybuchem, jest spotykana w takich branżach, jak: energetyka jądrowa [2], przemysł kosmiczny [3], petrochemiczny [4] itd. Rozpatrywana sytuacja problemowa wiąże się z powstawaniem wodoru podczas

The most common form of prevention consists of the internal monitoring of hydrogen concentrations in battery compartments conducted as part of the general monitoring of the vessel's atmosphere. On some vessels it is possible to draw atmospheric samples from battery compartments via special sampling pipes, allowing the composition of the battery compartments' atmosphere to be analysed using a portable analytical device.

Alerts, in the event of an uncontrolled hydrogen leakage from battery compartments into the areas accommodated by the crew, are commonly realised by the system of sensors located near the manholes and in selected staff rooms. Even with the automated detection system in service, it is good practice, for an on-duty officer to periodically tour areas accommodated by the crew with a portable analyser, testing for hydrogen concentrations.

Ventilation of battery compartments can be performed in an open-circuit system or with hydrogen combustion in a closed-circuit system. An open ventilation system is most frequently used during battery charging while in a port or floating on the surface in an on-water or semi-submerged position. In case of emergency there is usually a possibility to release the air from battery compartments to larger rooms. This serves to dilute hydrogen in the air volume of the compartment. Such a variant is realised only as an emergency procedure in a combat situation, for instance during a rapid submersion following forced charging of the battery on the surface.

Hydrogen combustion is implemented through catalytic hydrogen combustion in the air. The catalytic bed is located in hydrogen incinerators. Discharge from the combustion system is realised to the atmosphere of the submarine. Incinerator operation is allowable only when hydrogen concentration does not exceed the lower flammability limit. Therefore, the hydrogen combustion system should be operated under supervision.

On the basis of the context analysis conducted according to the SWOT<sup>3</sup> method the following conclusions were drawn:

- For the time being the market does not offer good solutions that would replace the existing hydrogen combustion systems.
- National research led to the development of technology demonstrators that raise hope regarding quick development of effective systems to replace the existing installations.
- The available laboratory base is not equipped with the special test benches needed to inspect hydrogen combustion installations, hence during the performance of minor immediate repairs it is enhanced on an *ad hoc* basis.
- The possessed experience gives hope regarding the performance of modernisation on hydrogen combustion systems although it also entails a certain risk that such activities will not bring the desired effects.

## PROBLEM SITUATION

The problem related to the disposal of hydrogen generated in the technological process, which creates the risk of an explosion, is tackled in such branches as: the nuclear power industry [2], the space [3], the petroleum industry [4], etc. The considered problem situation is

użytkowania akumulatorów na konwencjonalnym okręcie podwodnym.

Najwięcej wodoru może wytwarzać się podczas forsownego ładowania integralnego zestawu akumulatorów w porcie lub podczas misji na morzu. W jednym i drugim przypadku powstający w szczelnych jamach akumulatorowych wodór może osiągnąć stężenie wybuchowe.

W działaniach bojowych konwencjonalnego okrętu podwodnego może zaistnieć potrzeba ładowania integralnego zestawu baterii na morzu. Ładowanie musi odbywać się w położeniu nawodnym lub w zanurzeniu na chrapach w celu dostarczenia powietrza silnikom spalinowym zasilającym agregaty prądotwórcze<sup>4</sup>.

Z reguły ładowania dokonuje się pod osłoną nocy, przy prowadzeniu rozpoznania powierzchniowego i przestrzeni powietrznej. W możliwej bezpośredniej styczności z nieprzyjacielem proces ładowania powinien przebiegać możliwie szybko powodując tym samym istotny wzrost temperatury ogniw. Przy pojawieniu się przeciwnika należy dokonać szybkiego zanurzenia na gorących bateriach.

W takiej sytuacji istnieje ryzyko, że baterie mogą nadal emitować wodór a jamy akumulatorowe muszą przestać być wentylowane w systemie otwartym do atmosfery. Wentylacja jam powietrzem z atmosfery okrętu podwodnego przy wykorzystaniu systemów dopalania wodoru zapobiega kumulacji wodoru w jamach oraz emisji wodoru poza jamy akumulatorowe.

Możliwość powstania atmosfery wybuchowej monitorowana jest przez pomiary stężenia wodoru w jamach akumulatorowych. Okręt podwodny wyposażony jest w system pomiarowy także w części poza jamami akumulatorowymi, zwłaszcza nad włazami do jam akumulatorowych. Przykładowy system monitoringu atmosfery okrętu podwodnego został opisany wcześniej i nie będzie tutaj przedstawiany [1].

Do katalitycznego dopalania wodoru zawartego w powietrzu wykorzystuje się aktywowane chemicznie metale lub mieszaniny metali, jak: *Co, Rh, Ir, Pd, Pt, Ag, Au* itp. [5,3].

Najpowszechniejszym zastosowaniem tego typu katalizatorów są trójdrogowe<sup>5</sup> samochodowe katalizatory dopalania spalin<sup>6</sup>. Także silniki turbinowe wyposażane są w tego typu systemy. Na satelitach, przez wiele lat używane były katalityczne systemy zapłonowe do małych silników służących do korekcji ich pozycji [3]. Obecnie trwają intensywne badania nad systemami katalitycznymi wodorowych ogniw paliwowych [6]. Systemy katalityczne zbudowane na bazie wymienionych metali znajdują wiele zastosowań w szeroko rozumianej ochronie środowiska pracy [7].

Najczęściej katalizatory metaliczne stanowią krystality<sup>7</sup> w matrycach ceramicznych opartej najczęściej na tlenkach: *Si, Mg* i *Al*. Budowa przestrzenna zarówno krystalitów metali szlachetnych jak i tlenkowej matrycy ceramicznej to kluczowe parametry wpływające na wydajność procesu katalizy [3].

Do procesu dopalania wodoru w powietrzu najczęściej stosuje się katalizatory *Pt* i *Pd* lub ich mieszaninę *Pt – Pd* [2]. Patent nr CA1314277 C sugeruje użycie katalizatora na bazie *Pd* zawierającego domieszki *Ni* oraz *Cu*.

connected with hydrogen generation during the use of batteries on a conventional submarine.

The most hydrogen can be generated during forced charging of an integral battery set in a port or during a mission at sea. In both cases the hydrogen generated in the sealed battery compartments can reach an explosive concentration.

During combat activities of a conventional submarine there may be a need to charge of the integral battery set at sea. Charging must be performed on the surface, or in semi-submersion in order to supply air to the combustion engines powering the generators<sup>4</sup>.

Commonly, this is conducted under the cover of night with a threat of discovery by surface and air reconnaissance patrols ever present. In situations where contact with the enemy is possible, the charging process should be as fast as possible, thus causing a significant increase of temperature in the battery cells. In the event of the opponent showing up during charging, it would be required to perform rapid submersion with hot batteries.

Such a situation involves the risk of hydrogen emission by the batteries in to compartments which can no longer be ventilated in an open-circuit system to the atmosphere. Cell ventilation with the air from the atmosphere of a submarine with the use of hydrogen combustion systems prevents hydrogen accumulation in the compartments and its emission outside them.

The possibility of an occurrence of an explosive atmosphere is monitored by measurements of hydrogen concentration in battery compartments. Our submarines are also equipped with a measurement system in the parts beyond the battery compartments, particularly over the manholes to battery rooms. A description of a typical monitoring system onboard a submersible vessel has been described in previous articles and so will not be presented in this paper [1].

Catalytic combustion of hydrogen contained in the air is performed with the use of chemically activated metals or mixes of metals, such as: *Co, Rh, Ir, Pd, Pt, Ag, Au* etc. [5,3].

The most common type of catalysts are three-way<sup>5</sup> car exhaust gas combustion catalysts<sup>6</sup>. Turbine engines are also equipped with systems of this type. Catalyst ignition systems were applied for many years in the small engines of satellites used for the correction of their position [3]. Currently, intensive research into the catalytic systems of hydrogen-based fuel cells is being carried out [6]. Catalytic systems built on the basis of the indicated metals are used in numerous applications for the purpose of work environment protection [7].

Commonly, metallic catalysts are constituted by crystallites<sup>7</sup> in ceramic matrices usually based on oxides of: *Si, Mg* and *Al*. The spacial structure of the crystallites of the noble metals and the oxide ceramic matrix is the key parameter for the efficiency of the processes of catalysis [3].

The process of hydrogen combustion in the air most commonly employs *Pt* and *Pd* catalysts or the mixture of *Pt – Pd* [2]. Patent no. CA1314277 C suggests the use of a catalyst on the basis of *Pd* and an admixture of *Ni* and *Cu*.

## DEFINITION PHASE

The definition phase defines the project scope and confirms the feasibility of its implementation. It defines basic CTQ requirements<sup>8</sup>, critical from the point of view of quality assurance.

## FAZA DEFINIOWANIA

W fazie definiowania ustanowiono zakres

projektu i potwierdzono możliwości jego przeprowadzenia. Zdefiniowano podstawowe wymagania *CTQ*<sup>8</sup>, krytyczne z punktu widzenia zapewnienia jakości.

Podstawowym zadaniem było przywrócenie sprawności reaktora katalitycznego do spalania wodoru w systemie wentylacji jam akumulatorowych zdatnego do:

- wentylacji strumieniem powietrza o przepływie w zakresie od zera do wartości maksymalnej  $\dot{V}_0 \in [0; 150]m^3 \cdot h^{-1} \triangleq [0; 2500]dm^3 \cdot min^{-1}$ ,
- efektywnego spalania wodoru zawartego w ewakuowanym z jam akumulatorowych powietrzu wentylacyjnym w zakresie od zera do maksymalnego strumienia przepływu  $\dot{V}_{H_2} \in [0; 4,5]m^3 \cdot h^{-1} \triangleq [0; 75]dm^3 \cdot min^{-1}$  odpowiednio do strumienia wentylacyjnego tak, aby mieszanina powietrzno-wodorowa nie zawierała wodoru w koncentracji większej niż dolna granica wybuchowości.

Spalarki wodoru powinny zapewnić przynajmniej dziesięciokrotną redukcję stężenia wodoru odniesioną do maksymalnych jego zawartości w mieszaninie powietrzno-wodorowej.

Do realizacji celu głównego należało zrealizować dodatkowo:

- Wykonanie stanowiska pomiarowego zabezpieczającego pomiary w wymaganym zakresie na wymaganym poziomie wiarygodności.
- Wykonanie stanowiska do wytwarzania mieszanin wodorowo-powietrznych z zapewnieniem wymaganego składu na wymaganym poziomie wiarygodności.
- Wytypowanie potencjalnych rodzajów katalizatorów.
- Wykonanie stanowiska i przeprowadzenie badań wytypowanych katalizatorów.
- Wykonanie stanowiska i przeprowadzenie prób zakładowych i zdawczo-odbiorczych spalarek wodoru.

## FAZA POMIARU PROCESU

W fazie pomiaru przeprowadzono powtórnią ewaluację wymagań jakościowych *CTQ*, wykonano wstępną analizę ryzyka i ustalono główną odpowiedź systemu dopalania wodoru dla prób zdawczo-odbiorczych. Zaproponowano i przeprowadzono ocenę systemu pomiarowego do badań i prób. Ustanowiono plan zbierania danych oraz zdefiniowano standardy wydajności procesu pomiarowego.

System pomiarowy składał się z dwóch czujników pellistorowych<sup>9</sup> typu *POLYTRON 2 XP Ex*. Czujniki połączono poprzez przetworniki analogowo-cyfrowe do komputera z dedykowanym oprogramowaniem.

Przepływ przez czujniki analizowanego gazu regulowany był poprzez elektroniczne przepływomierze połączone szeregowo z rotametrem do wizualizacji przepływu poza oprogramowaniem komputerowym. Przeprowadzono badania metrologiczne jak i analizę *R&R*<sup>10</sup> zdolności procesu pomiarowego do monitoringu głównej odpowiedzi systemu. Badania te opisano wcześniej i nie będą one tutaj przedstawiane [8,9].

W tej fazie projektu zdefiniowano krytyczne wymagania jakościowe *CTQ* dla produktów i procesów

The primary task consisted in restoring the efficiency of a catalytic converter for hydrogen combustion in the system of battery facilities ventilation used for:

- air flow ventilation within the range from zero to the maximum value  $\dot{V}_0 \in [0; 150]m^3 \cdot h^{-1} \triangleq [0; 2500]dm^3 \cdot min^{-1}$
- efficient combustion of hydrogen contained in the ventilated air evacuated from the battery facilities, operating in the range from zero to the maximum flow rate  $\dot{V}_{H_2} \in [0; 4,5]m^3 \cdot h^{-1} \triangleq [0; 75]dm^3 \cdot min^{-1}$  suited to the ventilation flow in such a way that the air-hydrogen mixture does not contain hydrogen in a concentration exceeding lower flammability limits. Hydrogen incinerators should ensure

a minimum tenfold reduction of hydrogen concentration related to its maximum concentrations in the air-hydrogen mix.

In addition to the main objective the following tasks were to be implemented:

- Performance of a measurement station ensuring measurements within the required range and reliability level.
- Performance of a station for the production of hydrogen-air mixes guaranteeing the desired composition at the required reliability level.
- Selection of potential catalyst types.
- Performance of a station and conducting tests on selected catalysts.
- Performance of a station and conducting in-house and acceptance tests on hydrogen incinerators.

## PROCESS MEASUREMENT PHASE

The process measurement phase entailed conduction of a repeated evaluation of quality requirements *CTQ*, preliminary risk analysis and determining the main response of the hydrogen combustion system for acceptance tests. The evaluation of the measurement system was proposed and conducted for the planned tests and trials. A data collection plan was established and measurement process efficiency standards were defined.

The measurement system consisted of two pellistor sensors<sup>9</sup> of *POLYTRON 2 XP Ex* type. The sensors were connected with the use of analog-to-digital converters, utilising dedicated software.

The flow of analysed gas through the sensors was regulated with electronic flowmeters connected in series with a rotameter enabling flow visualisation outside the computer software. Metrological tests and analysis of the *R&R*<sup>10</sup> of the efficiency of the measurement system for monitoring the main system response were conducted. The said tests had been previously described and will be omitted in this paper [8,9].

This project phase defines critical quality requirements *CTQ* for the products and processes that support the process of overhaul of the hydrogen incinerators. Nine quality requirements were defined as critical *CTQ*: probity/accuracy, timeliness, adequacy, compatibility, low maintenance, efficiency, reliability, experience and *SOP*, and redundancy. By way of *QFD*<sup>11</sup> analysis, ranking of the three most important quality

wspomagających proces remontu spalarek wodoru. Jako krytyczne przyjęto dziewięć wymagań jakościowych *CTQ*: rzetelność/dokładność, aktualność, adekwatność, kompatybilność, bezobsługowość, wydajność, niezawodność, doświadczenie i *SOP*, oraz redundancję. Na drodze analizy *QFD*<sup>11</sup> ustalono ranking trzech najważniejszych wymagań jakościowych *CTQ*: rzetelność/dokładność, adekwatność, niezawodność.

Ustalono 8 kluczowych produktów pośrednich w postaci systemów: pomiaru zawartości wodoru w powietrzu, pomiaru parametrów spalarki, pomiaru strumienia przepływu powietrza i wodoru, dozowania strumienia wodoru, podawania powietrza, mieszania wodoru z powietrzem, budowy stanowisk do badań i prób zdawczo-odbiorczych.

Określono, że następujące produkty częściowe posiadają kluczowy wpływ na funkcjonalność produktu końcowego: system pomiarów stężenia wodoru, system pomiaru strumienia przepływu, system dozowania wodoru, system mieszania gazów, stanowisko do badania katalizatorów, stanowisko do prób zdawczo-odbiorczych. Umiarkowany wpływ na funkcjonalność produktu końcowego mają systemy: pomiaru temperatury spalarki, podawania strumienia powietrza.

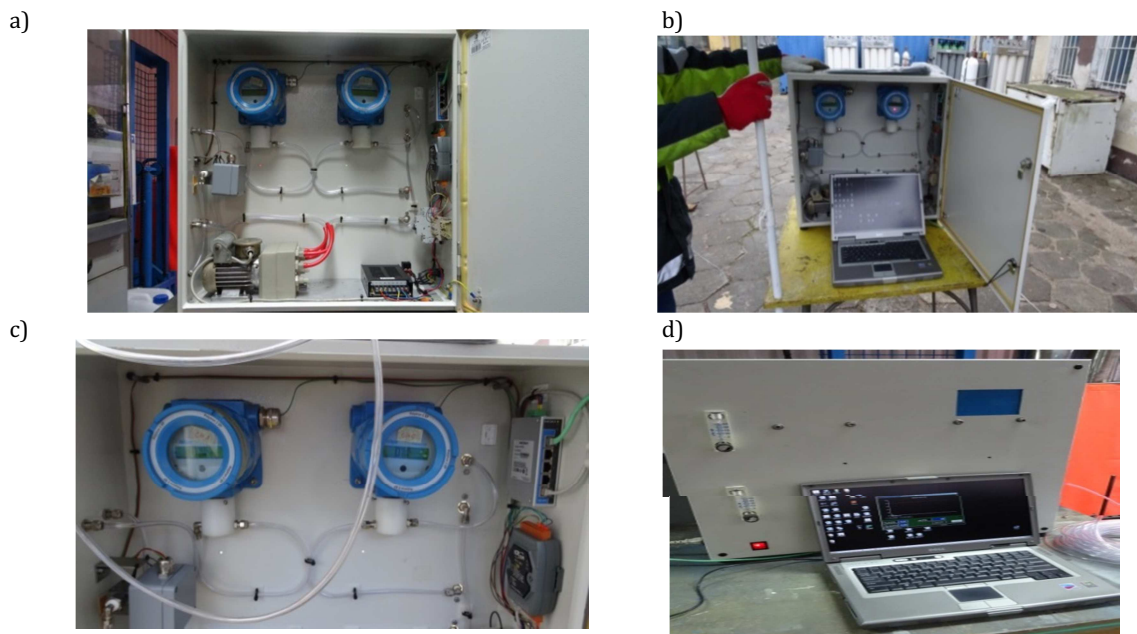
W celach operacyjnych powinno się monitorować dokładne wartości efektów realizowanych procesów poprzez pomiar zawartości wodoru przed i za spalarką. Kluczowe znaczenie dla procesu remontu spalarek wodoru ma proces badania katalizatorów.

requirements for *CTQ* was performed: probity/accuracy, adequacy, reliability.

8 key intermediate products in the form of systems were determined: measurement of hydrogen content in the air, measurement of incinerator parameters, measurement of air and hydrogen flow, hydrogen flow dosage, air supply, hydrogen and air mixing, performance of stations for acceptance tests and trials.

It was determined that the following partial products are crucial for the functionality of the final product: a hydrogen concentration measurements system, a flow measurement system, a hydrogen dosage system, a gas mixing system, a catalyst testing station and an acceptance testing station. The following systems have a moderate effect on the functionality of the final product: incinerator temperature measurement, air stream supply.

The operational objectives should encompass careful monitoring of the values of the implemented processes by measurement of the hydrogen content before and after the incinerator. The catalyst testing process is of key importance for the overhaul process of hydrogen incinerators.



Rys.1. Schemat ukończenia systemu pomiarowego spełniającego wymagania jakościowe *CTQ* procesu realizacji remontu spalarek wodoru: a)widok stanowiska od strony pompy zasilającej, analizatorów, zasilania elektrycznego i elementów transmisji sygnałów b)kompletne stanowisko pomiarowe podczas badań c)widok na analizatory pellistorowe typu POLYTRON 2 XP Ex, na prawej ścianie widoczny moduł do zarządzania komunikacją sieciową, poniżej moduł spełniający rolę przetwornika analogowo-cyfrowego sygnału z analizatorów pellistorowych oraz konwertera do komunikacji sieciowej, na lewej ścianie czujnik różnicy ciśnień d)widok kompletnego stanowiska pomiarowego od strony czołowej wraz z rotametrami i zaworami regulacji przepływu

Fig. 1. Scheme representing a complete measurement system meeting the *CTQ* quality requirements for the overhaul process on hydrogen incinerators: a)station view from the supply pump, analysers, power supply and signal transmission components b)complete measurement station during testing c)view on POLYTRON 2 XP Ex pellistor analysers, on the right wall visible module for network communication management, below – module fulfilling the role of an analog-to-digital signal converter from pellistor analysers and converter to the network communication system, on the left wall pressure differences sensor d) view of a complete measurement station from the front along with rotameters and flow control valves.

## FAZA ANALIZY PROCESU

Podczas przeprowadzonych badań scharakteryzowano zdolność oraz wydajność procesu dopalania wodoru przy zastosowaniu wybranych katalizatorów. Próbowano także zidentyfikować źródła zmienności dla procesu dopalania wodoru.

## PROCESS ANALYSIS PHASE

During the conducted tests, the capacity and efficiency of the hydrogen combustion process was characterised with the use of selected catalysts. Moreover, attempts were made to identify sources of variation in the hydrogen combustion process.

Tab. 1

Podstawowe parametry katalizatorów 0,5%<sub>m</sub>Pt typu GA – 20Pt i 0,5%<sub>m</sub>Pd typ GA – 50Pd.

Basic catalyst parameters for 0.5%<sub>m</sub>Pt type GA – 20Pt and 0.5%<sub>m</sub>Pd type GA – 50Pd.

Parameter	Value
Metal content in matrix $Al_2O_3$	0.5% <sub>m</sub>
Catalytic deposit density	$\varepsilon \cong 50\%$
Bulk density	$d \cong 0.75 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Substitute diameter	$d_s \cong 5 \text{ mm}$
Statistical efficiency of hydrogen oxidation exceeds 100°C	$\cong 100\%$
Catalyst production is based on the use of $Al_2O_3$ pellets with the diameter of $\phi \in [4; 8] \text{ mm}$ , however the share of particular fractions alters between supplies.	

Kluczowym dla przeprowadzenia modernizacji systemu do utylizacji wodoru jest rozwiązanie problemu wymiany wkładów katalizatora. Doboru katalizatora należało dokonać w oparciu o możliwości krajowe, krajów UE lub NATO.

We wcześniej przeprowadzonych badaniach nad tą problematyką wykorzystywano 0,5% platynium on 3 mm alumina pallets type 73, firmy Johnson Matthey PLC Catalyst [1] Po przeprowadzeniu rozpoznania rynku okazało się, że w Polsce istnieje wiarygodny producent katalizatorów – Firma innowacyjno-wdrożeniowa Katalizator Sp. z o.o.

Po wstępnym rozpoznaniu, zaproponowano zastąpienie wypełnień katalizatorem palladowym 0,5%<sub>m</sub> Pd lub platynowym 0,5%<sub>m</sub> Pt dostępnym w dwóch granulacjach,  $\phi \in [2; 3] \text{ mm}$  i  $\phi \in [4; 8] \text{ mm}$ .

Maksymalna temperatura pracy ciągłej katalizatorów to  $t_{max} < 550^\circ\text{C}$ . Ze względu na konieczność desorpcji z powierzchni katalizatora wody, powstającej podczas reakcji, powinien on pracować w temperaturze nie niższej niż  $t_{min} > 200^\circ\text{C}$ .

Od wyboru granulacji katalizatora zależały stawiane przez niego opory przepływu. Ponieważ granulacja katalizatora różniła się znacznie kształtem w kierunku mniejszej jego średnicy zastępczej, to opory stawiane przez złożę będą większe. Zwiększenie oporów przepływu stawianych przez złożę katalizatora grozi zmniejszeniem efektywności wentylacji jam akumulatorów na okręcie podwodnym.

Parametr ten powinien być dochowany, inaczej istnieje ryzyko potrzeby przeprojektowania osprzętu spalarki<sup>12</sup> i przez to podrożenia kosztów modernizacji spalarek. Nie zostało to uwzględnione w zakresie projektu, jego kalkulacji i harmonogramie realizacji projektu. Dlatego przed podjęciem ostatecznej decyzji o zakupie katalizatora, zakupiono próbkę jego bazy stanowiącej granulaturę *aluminy* do badań oporów przepływu. Doświadczalnie stwierdzono, że wzrost oporów przepływu  $\Delta p$  związany z zastosowaniem nowego wypełnienia spowoduje spadek przepływu  $\dot{V}_0$

A key element in carrying out modernisation of the hydrogen disposal system rests in solving the problem of replacement of the catalyst cartridges. Catalyst selection was to be based on national possibilities or those of EU or NATO countries.

The previous studies on this subject matter were performed with the use of 0.5% platinum on 3 mm alumina type 73 pallets manufactured by Johnson Matthey PLC Catalyst [1] Market analysis revealed a reliable catalyst producer operating in Poland – an innovation and implementation company called Katalizator Ltd.

Following an initial study, it was proposed to replace the content with palladium 0.5%<sub>m</sub> Pd or platinum 0.5%<sub>m</sub> Pt catalysts available in two granulation types,  $\phi \in [2; 3] \text{ mm}$  and  $\phi \in [4; 8] \text{ mm}$ .

The maximum temperature for the continuous catalyst operation is equal to  $t_{max} < 550^\circ\text{C}$ . Due to the necessity of desorption of water occurring during the reaction on the catalyst's surface, it should be operated at a temperature lower than  $t_{min} > 200^\circ\text{C}$ .

The choice of catalyst granulation was based on flow resistance. Since catalyst granulation significantly differed in shape in the direction of travel towards the lower substitute diameter, the resistance of the cartridges was stronger. Increasing the flow resistance of catalyst cartridges can reduce the efficiency of battery compartments ventilation on a submarine.

This parameter should be observed, otherwise there is a risk of a need to redesign the incinerator equipment<sup>12</sup> and, thus, increase the cost of modernisation. This had not been considered in the project scope, its calculation and schedule. Therefore, before taking the final decision on catalyst purchase, a sample of its base constituted by the *alumina* granulation was purchased for the purpose of carrying out flow resistance tests. The experiment proved that an increase of flow resistance  $\Delta p$ , connected with the application of a new filling, causes a flow reduction of  $\dot{V}_0$  ventilation air at an acceptable level, guaranteeing the



powietrza wentylacyjnego na poziomie gwarantującym jeszcze zachowanie zdolności do wentylacji przestrzeni jam akumulatorowych na akceptowalnym przez zamawiającego poziomie, przy wykorzystaniu tego samego wentylatora [8]. Wyniki pomiarów przepływów zostały zawarte w drugiej części cyklu artykułów i będą opublikowane później.

Do otrzymywania mieszanin wodorowo-powietrznych wykorzystano układ stało dozujący składający się z dyszy współpracującej z reduktorem dozującym wodór do strumienia przepływającego powietrza. Projektowanie, budowę i próby tego systemu opisano w trzecim artykule w tym cyklu, który będzie opublikowany w późniejszym terminie. Tam też zostały opisane zagadnienia związane z bezpieczeństwem pracy z mieszaninami wodorowo-powietrznymi.

Zgodnie z dokumentacją remontowanej spalarki należało pracować poniżej dolnej granicy wybuchowości mieszaniny wodorowo-powietrznej na poziomie ok.  $C(H_2) \leq 3\%_v$ . Niska temperatura i duża wilgotność powietrza stanowiły dodatkowo sprzyjające warunki dla bezpieczeństwa prowadzonych badań<sup>13</sup>.

Stanowisko pomiarowe ulokowano za drzwiami z pleksiglasu w celach zabezpieczenia obsługi przed skutkami ewentualnej eksplozji – rys. 2d. Całe stanowisko badawcze umieszczono pod namiotem rys. 2c, ulokowanym z dwóch stron pod ścianami budynków w celu ukierunkowania rażenia odłamkami przy ewentualnej eksplozji. Stanowisko butli wodorowych umieszczono za załomem budynku, poza polem rażenia odłamkami.

Podczas badań katalizatorów zastosowano ssanie powietrza przy pomocy wentylatora zdemontowanego z okrętu podwodnego – rys. 2c. W tej konfiguracji dozowany wodór mógł okresywiście uciekać wstecz z reaktora rurowego. Pomimo zastosowania pochylenia czerpni powietrza oraz dołożenia kolanka skierowanego do dołu rys. 2a nie udało się uzyskać stałej zawartości wodoru w zasysanym powietrzu i jego zawartość ulegała fluktuacjom – rys. 2b.

Jednak taką sytuację zaakceptował odbiorca projektu wychodząc z założenia, że bardziej zależy mu na pracy prawie skompletowanego systemu okrętowego niż na stałym składzie podawanej mieszaniny wodorowo-powietrznej, gdyż właśnie taki stan dokładniej odwzorowuje zachowanie systemu w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

maintenance of the ventilation capacity of the battery rooms with the use of the same fan [8]. Flow measurement results have been contained in the second cycle of articles and will be published later.

A permanent dosage system, composed of a nozzle operating in conjunction with a hydrogen dosage regulator into the stream of air, was used to obtain hydrogen-air mixtures. The design, construction and tests performed on this system have been described in the third article of the cycle to be published at a later date. Also there the author describes issues connected with work safety related to handling hydrogen-air mixes.

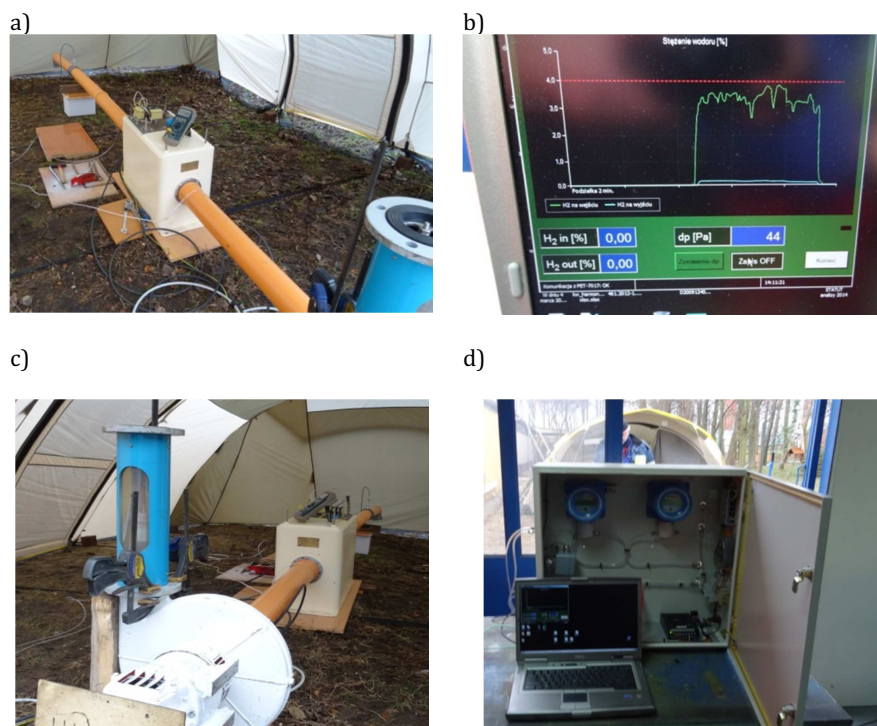
In line with the documentation of the incinerator subjected to modernisation, it was necessary for the device to work below the lower flammability limit of the hydrogen-air mix, at the level of approximately  $C(H_2) \leq 3\%_v$ . Low temperature and high air humidity constituted additional conditions favourable in terms of the safety of the conducted research<sup>13</sup>.

The measurement panel has been located behind a plexiglass door to ensure the safety of the crew in the event of explosion – fig. 2d. The test site was located under the tent visible in fig. 2c, surrounded on two sides by the walls of buildings for the purpose of fragmentation protection in the event of an explosion. The hydrogen cylinder station was located around the corner of the building, outside the fragmentation area.

The catalyst tests were performed with the use of a fan disassembled from a submarine – fig. 2c. In this configuration the supplied hydrogen could periodically return from the pipe reactor. Despite the applied tilting of the air inlet and supplying of an additional elbow pointed downwards, fig. 2a,

it was not possible to obtain constant hydrogen content in the drawn air, its content being subject to fluctuations – fig. 2b. However, this situation was approved by the project holder due to the fact that the priority was to ensure operation of a nearly completed system rather than guarantee permanent composition of the air-hydrogen mix, since such a state more precisely mimics system behaviour under real operating conditions.



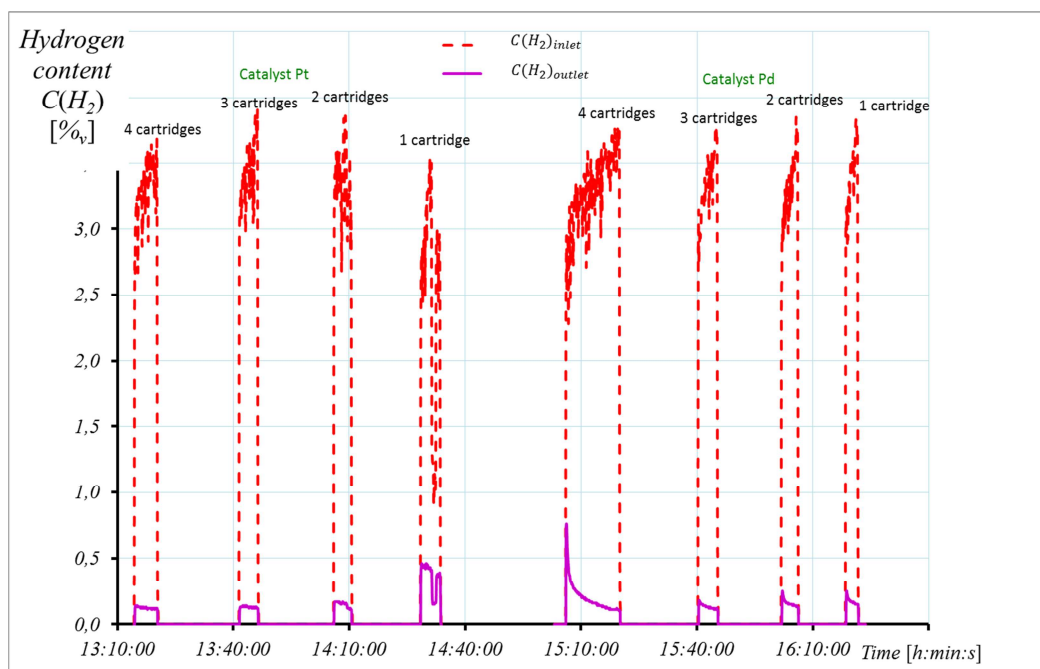


Rys.2. Stanowisko prób katalizatorów: a) stanowisko z podłączonymi drogami analitycznymi, dozowaniem wodoru do linii zasilania spalarki typu PD – 3A oraz podłączeniami termometrycznych czujników platynowych typu PT – 100; b) obrazowanie wyników pomiarów; c) stanowisko badawcze z widocznym na pierwszym planie wentylatorem ssącym i rotametrem; d) stanowisko analityczne za ochronnymi drzwiami.

Fig.2. Catalyst testing station: a) station with connected analytical routes, hydrogen dosing to incinerator power supply type PD – 3A and connections to thermometric platinum sensors type PT – 100; b) measurement results imaging; c) research station with suction fan and rotameter visible in the foreground; d) analytical station behind a protective door.

Mieszanie wodorowo-powietrzną wytwarzano regulując ciśnienie zasilania dyszy dozującej wodór do wcześniej wymuszonego przepływu powietrza. Do badań wstępnych przyjęto wypełnienie spalarki wodoru kasetami z wytypowanym wcześniej katalizatorem platynowym  $0,5\%_m Pt$  typu  $GA - 20Pt$  i palladowym  $0,5\%_m Pd$  typ  $GA - 50Pd$ . Przy czym badania prowadzono przy miąższości złoża na poziomie czterech, trzech, dwóch i jednej kasety z katalizatorem

The hydrogen-air mix was generated by adjusting the pressure in the nozzle dosing the hydrogen to the previously forced air flow. Preliminary tests were conducted on hydrogen incinerators filled with cartridges with the previously selected platinum catalyst  $0.5\%_m Pt$ ,  $GA - 20Pt$  type, and palladium  $0.5\%_m Pd$  catalyst,  $GA - 50Pd$  type. Testing was performed on bed volumes of four, three, two and one cartridge with a catalyst.



Rys.3. Wyniki badań wstępnych aktywności katalizatorów 0,5%<sub>m</sub>Pt typu GA – 20Pt i 0,5%<sub>m</sub>Pd typ GA – 50Pd przy wyborze miąższości złoża na poziomie 1-4 kaset z katalizatorem.

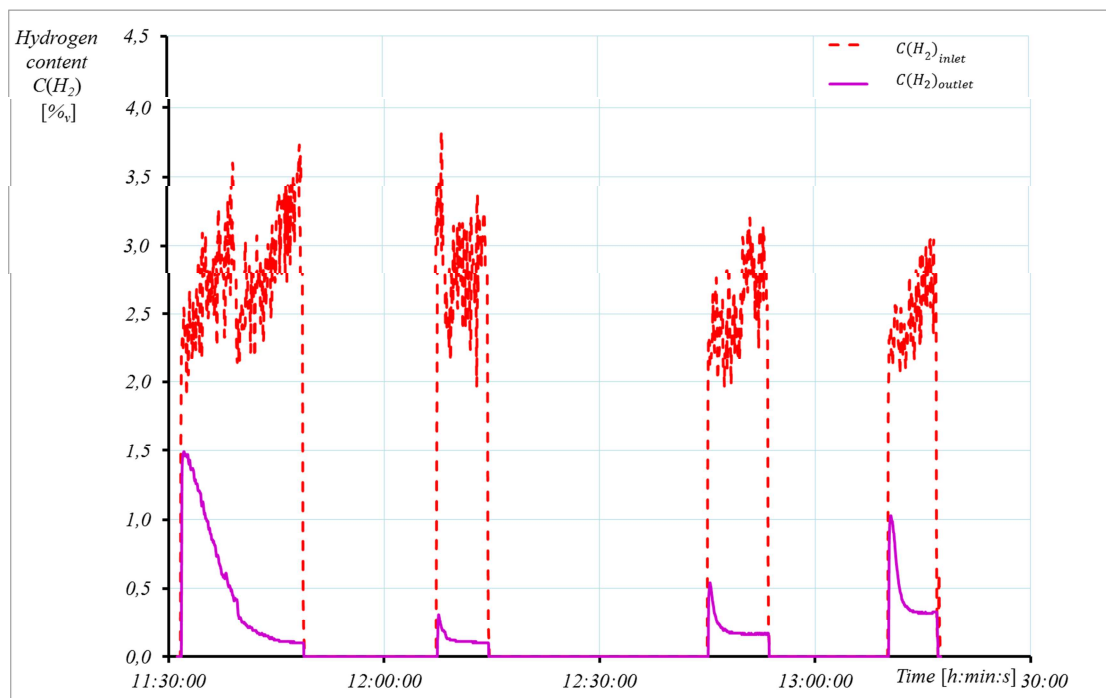
Fig. 3. Preliminary test results for the activity of catalysts: 0.5%<sub>m</sub>Pt, GA – 50Pt type, 0.5%<sub>m</sub>Pd, GA – 50Pd type with bed volumes of 1-4 catalyst cartridges.

Wyniki pomiarów pokazano na rys. 3. Pomiarów wstępnych prowadzono przez stosunkowo krótki okres czasu gdyż zaobserwowano szybki narost temperatury i wydawało się, że dłuższe badania bez jej monitoringu mogły grozić uszkodzeniem spalarki bądź wybuchem cieplnym. Obserwowano także znaczną emisję wilgoci sugerującą, że złożo katalizatora nie jest jeszcze dostatecznie wysuszone i nie wykazuje pełnej aktywności. Pokazują to szczególnie wyniki pomiarów aktywności katalizatora typu GA – 50Pd, gdzie późniejsze pomiary dla pojedynczej kasety wykazywały wyższą aktywność niż wcześniejsze dla czterech kaset.

Wykonano także pomiary dla oryginalnych wypełnień katalitycznych spalarek wodoru, które przedstawiono na rys. 4. Tak samo jak poprzednio wykonano pomiary dla miąższości złoża katalitycznego na poziomie czterech, trzech, dwóch i jednej kasety. Pomimo wysuszenia i dłuższej pracy stare wypełnienia wykazywały podczas prób wstępnych mniejszą aktywność niż nowe. Jednak należy zauważyć, że spełniały wymagania dotyczące wymagań zdawczo-odbiorczych i na dobrą sprawę spalarki mogłyby być dopuszczone do dalszej eksploatacji bez wymiany złoża a jedynie po jego kondycjonowaniu.

Measurement results are presented in fig. 3. Initial measurements were performed over a relatively short period of time due to the observed rapid temperature increase. It seemed that further testing without temperature monitoring could result in incinerator damage or thermal explosion. Moreover, a significant humidity emission was noted which suggested that the catalyst deposit was not yet sufficiently dry and failed to express full activity. This was particularly visible in activity results for catalyst GA – 50Pd where later measurements performed on a single cartridge indicated a higher activity than those conducted previously for four cartridges.

Also, measurements were performed on the original fillings of hydrogen catalyst incinerators which are shown in fig. 4. As before, the measurements were conducted for catalytic deposit volumes of four, three, two and one cartridge. Despite the dryness and longer operation, the old fillings revealed decreased activity as compared to the new ones. However it should be noted that the incinerators met the final acceptance requirements, and in fact, they could be authorised for further operation without the need for bed replacement and merely performing its conditioning.



Rys.4. Wyniki pomiaru przy wykorzystaniu oryginalnych wkładów przy wyborze miąższości złoża na poziomie 1-4 kaset z katalizatorem.

Fig. 4. Measurement results with the use of original fillings and bed density of 1-4 catalyst cartridges.

Wyniki badań wstępnych potwierdziły wystarczającą aktywność wybranych katalizatorów i przez to możliwość spełnienia krytycznych wymagań jakościowych *CTQ* założonych w projekcie. Stwierdzono także, że oryginalne wypełnienia mogłyby spełnić te wymagania po procesie kondycjonowania.

Na podstawie badań wstępnych zdecydowano się podjąć trud doprowadzenia do sytuacji, w której aktywność zastosowanego wypełnienia będzie tak duża, że wychodząca mieszanina wodorowo-powietrzna będzie zawierała jedynie śladowe zawartości wodoru podwyższając tym samym wymagania jakościowe *CTQ* dla procesu remontu spalarek wodoru.

Wyniki badań wstępnych pokazały, że wystarczającym jest zastosowanie dwóch palet z wkładem tradycyjnym, jednej palety z katalizatorem palladowym 0,5%<sub>m</sub> Pd typ *GA-50Pd* i jednej palety z katalizatorem platynowym 0,5%<sub>m</sub> Pt typu *GA-20Pt*. Pozwoliło to na zrealizowanie zakresu projektu, zaoszczędzenie środków na zakupy katalizatorów i zmniejszenie oporów przepływu przez złożo.

Takie skomponowanie złoża przyczyni się także do zebrania wniosków z dalszej eksploatacji wszystkich trzech typów katalizatora, które pozwolą w przyszłości na wybór najlepszego z nich.

Rozpatrywany tutaj system jest dość prosty pod względem modelowym<sup>14</sup> dla założonego zakresu projektu zaś podczas eksploatacji proces spalania wodoru prowadzony będzie przy zapewnieniu stabilnych warunków otoczenia, gwarantowanych automatycznym

The results of the preliminary tests confirmed sufficient activity of the selected catalytic converters, and thus the feasibility of meeting the critical quality requirements *CTQ* assumed in the project. It was also found that the original fillings could meet the said requirements following the conditioning process.

On the basis of the test results it was decided to exert some effort to ensure that the hydrogen-air mix leaving the system would contain only trace hydrogen content, thus increasing the quality requirements *CTQ* imposed with regard to the hydrogen incinerators' overhaul.

The results demonstrated that it is sufficient to utilise two pallets with traditional cartridges, one with a palladium catalytic converter 0.5%<sub>m</sub> Pd, *GA-50Pd* type and one pallet with a platinum catalyst 0.5%<sub>m</sub> Pt, *GA-20Pt* type. This allowed implementation of the entire project scope, saving funds for the purchase of catalysts and reducing flow resistance by the catalyst bed.

Such a bed composition will also allow the drawing of conclusions from the further utilisation of all three catalyst types, which will enable selection of the best of them in the future.

The system in question is quite simple with regard to its model<sup>14</sup> in the assumed project scope, however the hydrogen combustion process during operation will be conducted in stable, ambient conditions, guaranteed by an automatic flow and temperature maintenance by the hydrogen incinerator equipment. On this basis it was decided to holdback from performing

utrzymywaniem przepływów i temperatury przez oprzyrządowanie spalarki wodoru. Na tej podstawie zrezygnowano z analizy korelacyjnej pomiędzy wydajnością procesu spalania wodoru a parametrami środowiskowymi. Także z ograniczeń czasowych nie zdołano wykonać wiarogodnej statystycznie analizy zmienności.

## FAZA ULEPSZANIA/DOSKONALENIA PROCESU

W strategii modernizacji przyjęto jedynie modyfikację konfiguracji złoża z takim wyliczeniem, aby nie były potrzebne żadne zmiany konstrukcyjne spalarki wodoru. Wynikiem projektu miało być także zdobycie informacji na temat typu katalizatora najlepszego z wytypowanych do zastosowania w spalarni. *Know how* nie było przekazane przez producenta, nie pozyskano go także w ramach badań własnych. Konfiguracje złoża sprawdzano podczas przeprowadzonych prób i na tej podstawie uzgodniono program prób zdawczo-odbiorczych.

Przy proponowaniu ostatecznego rozwiązania należało uwzględnić wszystkie ustalone krytyczne wymagania jakościowe *CTQ*, przy uwzględnieniu faktu znacznych ograniczeń finansowych i czasowych. Stąd zakres projektu był realizowany kosztem minimalizacji wymagań jakościowych *CTQ*.

Ze względu na wystarczającą znajomość zachodzących zjawisk deterministycznych w rozwiązywanej sytuacji problemowej zrezygnowano z metod statystycznych modelowania i projektowania eksperymentów *DOE*<sup>15</sup>, a walidacja zastosowanego rozwiązania opierała się jedynie o program prób zdawczo-odbiorczych i ustalenie definicji wady, która uniemożliwiłaby przyjęcie złego rozwiązania.

Ze względów czasowych i rodzaju sytuacji problemowej zdecydowano się prowadzić działania na wymontowanym z okrętu podwodnego prawie rzeczywistym systemie, który różnił się od systemu okrętowego jedynie symulacją komory akumulatorowej modelowanej przez reaktor rurowy do otrzymywania mieszaniny wodorowo-powietrznej. Zatem, badania odbywały się w skali rzeczywistej i stąd ich wyniki nie były przenoszone metodami powiększania skali.

Badania wstępnie zaproponowanej konfiguracji złoża składającego się z czterech palet katalizatora: palladowego 0,5%<sub>m</sub>Pd typu GA – 50Pd, tradycyjnego, platynowego 0,5%<sub>m</sub>Pt typu GA – 20Pt i tradycyjnego przedstawiono na rys.5.

Zgodnie z przewidywaniami próba pokazała, że jest możliwe osiągnięcie praktycznie zerowego poziomu stężenia wodoru w mieszaninie opuszczającej spalarkę po przeprowadzeniu kondycjonowania złoża. Poziom zerowy dla tej konfiguracji złoża osiągany jest w czasie krótszym niż  $t = 5 \text{ min}$ . Dla tak skonfigurowanego złoża możliwe był osiągnięcie strumienia przepływającego powietrza na poziomie  $\dot{V}_0 \cong 140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , co jest prawie zgodne

correlation analysis between the hydrogen combustion process efficiency and environmental parameters. Also, due to time limitations it was not possible to conduct a statistically reliable variability analysis.

## PROCESS IMPROVEMENT PHASE

The modernisation strategy assumes that only the catalyst bed configuration is modified, with a calculation that does not require the introduction of any construction alterations in the hydrogen incinerator. Another project result consisted in collecting of information concerning the best catalyst type among those selected to be used in the incinerator. The *know-how* had not been provided by the manufacturer, nor was it obtained in the course of our own research. Deposit configurations were tested during the conducted tests, which served as the basis for the acceptance trials.

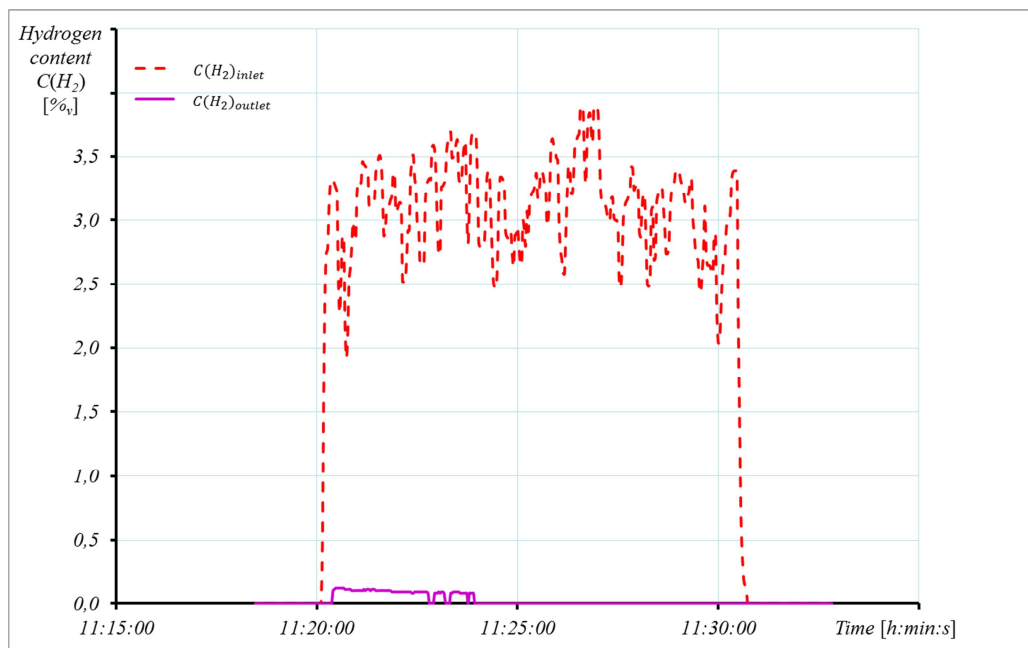
In proposing the final solution it was necessary to consider all the defined critical quality requirements *CTQ* and the significant financial and time constraints. Hence, the project scope was implemented at the expense of the minimisation of the quality requirements *CTQ*.

Due to the possession of sufficient knowledge regarding the occurring deterministic phenomena in the problem in question, it was decided to holdback from performing statistical experiment modelling and *DOE*<sup>15</sup>, with the validation of the adopted solution based solely on the acceptance tests' schedule, and determination of the definition of a defect, to prevent the adoption of the wrong solution.

Due to the imposed time limits and nature of the problem, it was decided to conduct experiments on a similar system which had been extracted from a submarine, differing from the shipboard equipment only by the simulated battery room modelled by a pipe reactor used to obtain the hydrogen-air mix. Therefore, the tests were conducted on a real scale, with the results not being transferred using a scale-up methods.

The tests on the initially proposed deposit configuration composed of four catalyst pallets: palladium 0.5%<sub>m</sub>Pd, GA – 50Pd type, traditional, platinum 0.5%<sub>m</sub>Pt, GA – 20Pt type, and traditional are presented in fig.5.

As predicted, the test showed that it is possible to obtain nearly zero hydrogen concentration in the mix leaving the incinerator following catalyst bed conditioning. The zero level for this configuration is obtained within a time shorter than  $t = 5 \text{ min}$ . In the case of the thus configured bed it was possible to obtain an air flow at the level of  $\dot{V}_0 \cong 140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , which is almost compliant with



Rys.5. Wyniki badania wstępnie zaproponowanej konfiguracji złoża składającego się z palet katalizatora: palladowego 0,5%<sub>m</sub> Pd typu GA – 50Pd, tradycyjnego, platynowego 0,5%<sub>m</sub> Pt typu GA – 20Pt i tradycyjnego.

Fig.5. Test results for the initially proposed deposit configuration composed of four catalyst pallets: palladium 0.5%<sub>m</sub> Pd, GA – 50Pd type, traditional, platinum 0.5%<sub>m</sub> Pt, GA – 20Pt type, and traditional.

z nominalną wartością podawaną przez producenta jako wartość nominalna. Jednak taka konfiguracja powoduje znaczne rozgrzewanie się spalarki miejscowo przekraczające temperaturę  $t > 300^{\circ}\text{C}$ , która spowodowała uszkodzenie elementów systemu pomiaru temperatury.

Wynik tej próby sugerowałby większą aktywność w zdolności do utleniania wodoru dla katalizatora palladowego, dlatego zamieniono miejscami katalizator platynowy z palladowym. Tradycyjne wypełnienia mogą spełniać rolę wypełniacza przy umieszczeniu ich za nowymi katalizatorami, lub wstępnego dopalania przy umieszczeniu ich na początku złoża.

Zdecydowano się zaproponować inne rozmieszczenie palet z wypełnieniami katalitycznymi niż poprzednio: paleta katalizatora platynowego, paleta katalizatora palladowego, dwie palety katalizatora tradycyjnego.

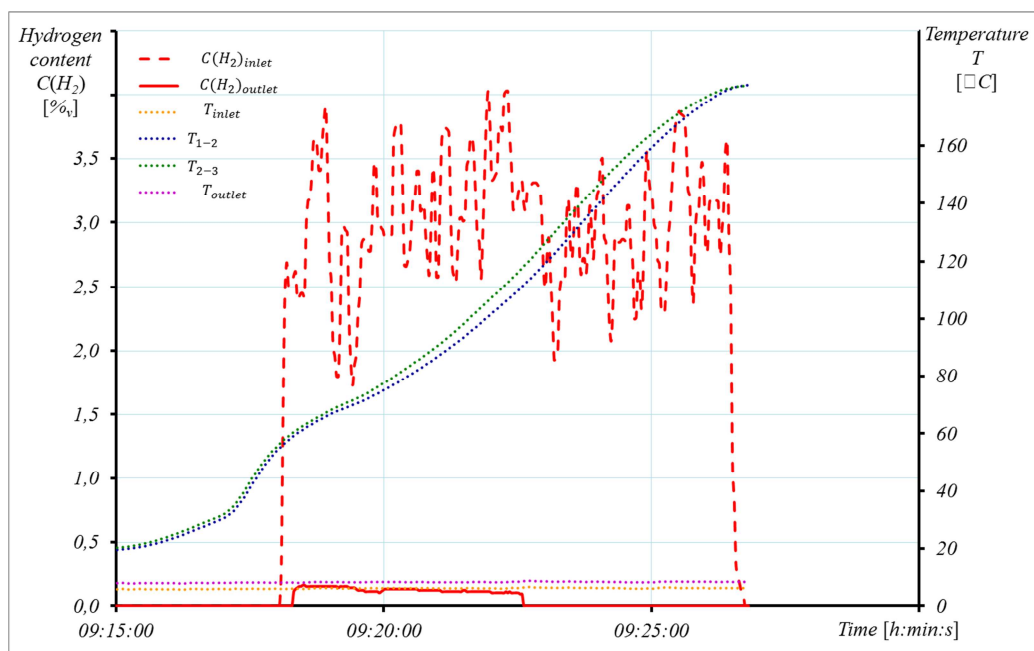
Wyniki pomiarów dla tej konfiguracji złoża katalizatora pokazano na rys.6. Przyjęta konfiguracja złoża powoduje stabilizowanie się temperatury w przestrzeniach między paletami na poziomie poniżej  $t < 200^{\circ}\text{C}$ , co jest temperaturą optymalną dla pracy tego typu katalizatorów. Temperatura na wylocie jedynie nieznacznie przewyższa temperaturę na wlocie spalarki.

the value marked by the manufacturer as nominal. However, this type of configuration causes significant local heating of the incinerator, exceeding a temperature of  $t > 300^{\circ}\text{C}$ , which leads to the damaging of temperature measurement system components.

The result of this test suggests a greater activity in terms of hydrogen oxidation capacity in the case of the palladium catalyst, thus it was decided to swap the places of the platinum and palladium catalysts. Traditional cartridges can fulfil the role of a filler when placed behind the new catalysts, or of initial combustion when placed at the beginning of the catalyst bed.

It was decided to propose a different placement of pallets with the catalytic fillings: platinum catalyst pallet, palladium catalyst pallet, two pallets of traditional catalyst.

Measurement results for this catalyst bed configuration are presented in fig.6. The adopted bed configuration ensures temperature stabilisation in spaces between the pallets at the level below  $t < 200^{\circ}\text{C}$ , which is optimal for the operation of catalysts of this type. Temperature at the outlet only slightly exceeds the temperature at the inlet of the incinerator.



Rys.6. Wyniki badania zaproponowanej ostatecznej konfiguracji złoża składającego się z palet katalizatora: platynowego 0,5%<sub>m</sub> Pt typu GA – 20Pt, palladowego 0,5%<sub>m</sub> Pd typu GA – 50Pd i dwóch palet katalizatora tradycyjnego.

Fig. 6. Test results for the proposed final bed configuration composed of the following catalyst pallets: platinum 0.5%<sub>m</sub> Pt, GA – 20Pt type, palladium 0.5%<sub>m</sub> Pd, GA – 50Pd type and two traditional catalyst pallets.

Istniała techniczna możliwość wykonania badań nad wszystkimi konfiguracjami złoża *FFE*<sup>16</sup>. Taki cykl eksperymentów z powtórzeniami mógłby dać model<sup>17</sup>, dla którego można byłoby znaleźć optymalne rozwiązanie. Jednak nałożone ograniczenia czasowe projektu nie pozwoliły na kompleksowe przeprowadzenie badań konfiguracji złoża. Zmarnowano szansę poznawczą i możliwość zaprojektowania eleganckiego rozwiązania technicznego.

Zgodnie z wcześniejszymi oczekiwaniami wyniki badań wskazują na możliwość utrzymania dotychczasowego rozwiązania konstrukcyjnego spalarek a przy połowicznym wypełnieniu palet nowymi katalizatorami istnieje możliwość utrzymania wentylacji na wymaganym poziomie  $\dot{V}_0 \cong 140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Przy zaproponowanej konfiguracji złoża katalitycznego możliwe jest osiągnięcie praktycznie zerowej wartości stężenia wodoru na wyjściu ze spalarki przy jego stężeniu na wejściu dochodzącym do  $C(\text{H}_2) \cong 3\%_v$ .

Obserwowane niebezpieczeństwo zniszczenia złoża katalizatora i samej spalarki związane z silnym efektem egzotermicznym reakcji katalitycznego spalania wodoru sugeruje modernizację spalarki polegającą na zastosowaniu chłodzenia międzystopniowego. Niektóre rozwiązania chłodzenia testowano już wcześniej z dobrym rezultatem [1]. Jednak sytuacje związane z nagłym dużym wzrostem stężenia wodoru w jamach akumulatorowych przy stosowanym na okręcie monitoringu jego zawartości jest mało prawdopodobne.

Oprócz tego przy uruchomieniu wentylacji następuje natychmiastowy spadek stężenia wodoru, gdyż nie ma powodu do sądu, że emisja wodoru z ogniw może utrzymywać się na znacznym poziomie przez długi okres czasu. Zwiększona, niebezpieczna emisja wodoru może zaistnieć tylko w sytuacji długotrwałego, forsownego ładowania akumulatorów na powierzchni i nagłej konieczności wykonania zanurzenia.

It was technically possible to conduct tests on all bed configurations – *FFE*<sup>16</sup>. Such an experimental cycle with repetitions would be ensured with a model<sup>17</sup> for which an optimal solution could be found. However, the imposed time constraints of the project did not allow for the conduction of complex tests on bed configurations. Thus, the cognitive chance and opportunity to design an intelligent technical solution was wasted.

According to the previous expectations, the test results indicate the possibility of maintaining the thus far applied constructional solution of the incinerators, and the partial filling of the pallets with the new catalysts; in such a scenario it is possible to ensure ventilation at the required level of  $\dot{V}_0 \cong 140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . With the proposed catalytic bed configuration it is possible to obtain a nearly zero hydrogen concentration level at the incinerator outlet, with its inflow concentration reaching  $C(\text{H}_2) \cong 3\%_v$ .

The observed hazard, of damaging the catalyst bed and the incinerator itself connected with the strong exothermic effect of catalytic hydrogen combustion reaction, suggests the need for incinerator modernisation, consisting in the application of interstage cooling. Certain cooling solutions had already been tested with good results [1]. However, situations connected with a sudden increase in hydrogen concentrations in battery compartments, with the hydrogen content monitoring utilised on the vessel, is rather unlikely.

Besides that, ventilation activation causes an immediate decrease in hydrogen concentration, as there is no reason to assume that hydrogen emission from battery cells can remain at a significant level over a long period of time. An elevated and dangerous hydrogen emission may occur only in the case of a long-standing forced battery charge and an urgent necessity to perform immersion. However, such a procedure assumes continuous ventilation of battery compartments during the charging process in an open-circuit system. At the



Taka procedura zakłada jednak ciągłą wentylację jam podczas procesu ładowania w systemie otwartym. Z chwilą podjęcia decyzji o uszczelnieniu okrętu do zanurzenia następuje jedynie przełączenie wentylacji jam akumulatorowych na obieg wewnętrzny poprzez spalarki wodoru. Należy stąd wnosić, że jamy wstępnie są doskonale przewietrzane. W sytuacji szybkiego zanurzenia nie istnieje także konieczność wstrzymania wentylacji, gdyż hałas wytwarzany podczas bojowego zanurzenia i ucieczki z rejonu jest na tyle duży, że dodatkowy, pochodzący od wentylatorów do wentylacji jam, stanowi jedynie znikomy wkład do ogólnie emitowanego poziomu hałasu. Z tych powodów wprowadzanie awaryjnego chłodzenia nie jest bezwzględnie uzasadnione względami taktycznymi i technicznymi.

Osiągany wielokrotnie podczas prób praktyczny poziom zerowy zawartości wodoru na wyjściu spalarki jest wynikiem znacznie przekraczającym początkowe wymagania jakościowe *CTQ* dla prób zdawczych.

Zdecydowano się na pozostawienie ustalonej konfiguracji złoża, choć usytuowanie tradycyjnego katalizatora na początku wydawałoby się lepszym rozwiązaniem. Jednak wariant ten nie był sprawdzony podczas prób zakładowych. Z powodu ograniczeń czasowych i presji *Stoczni* skierowano spalarki wodoru do etapu kontroli procesu, jedynie po skróconej fazie ulepszenia.

## FAZA KONTROLI

Przeprowadzone próby zdawczo-odbiorcze nie odbiegały wynikami od prób wcześniejszych. Przyjęcie efektów przeprowadzonej modernizacji spalarek wodoru bez zastrzeżeń stanowiło przesłankę do powtórnego ich montażu na okręt podwodny. Okręt wraz ze spalarkami został zdany.

Montaż systemu do dopalania wodoru na okręcie podwodnym nie wymagał specjalnych zaleceń ani zastosowania metod przenoszenia skali czy powtórnych prób na obiekcie rzeczywistym ze względu na wykorzystanie w próbach realnej instalacji okrętowej. Różnica polegała jedynie na skróceniu drogi przebiegu mieszaniny wodorowo-powietrznej oraz zasymulowaniu jamy akumulatorowej przez reaktor rurowy do otrzymywania mieszanin wodorowo-powietrznych. Zmiany te mogą jedynie mieć wpływ na zmniejszenie strumienia wentylacyjnego, co zostało zasymulowane w próbach zdawczo-odbiorczych przez obniżenie wartości strumienia do poziomu  $\dot{V}_0 \cong 120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

## ZAKOŃCZENIE

Plan implementacji zmodernizowanych spalarek na okręcie podwodnym uwzględniał kilka poniższych wytycznych dotyczących procesu ich eksploatacji.

Ze względu na teoretycznie istniejące niebezpieczeństwo przegrzania katalizatora, powodujące jego częściową dezaktywację lub zniszczenie, należy unikać długich czasów pracy  $t > 20 \text{ min}$  przy dużych stężeniach wodoru  $C_{H_2} > 2\%_v$ . Sytuacje takie są jednak mało prawdopodobne, gdyż nie ma podstaw do sądenia, że emisja wodoru z ogniw może utrzymywać się na znacznym poziomie długi okres czasu.

Niebezpieczna emisja wodoru może zaistnieć w sytuacji podjęcia decyzji o natychmiastowym

moment of taking the decision regarding the sealing of the vessel prior to immersion, the system of battery compartment ventilation is switched over to an internal circuit by the hydrogen incinerators. Hence, we should assume that the compartments are perfectly ventilated. Also, during fast immersion there is no need to discontinue ventilation as the noise generated during a combat immersion and escape from the region is so considerable that the additional noise of ventilation fans only slightly increases the total noise level. For these reasons the implementation of an emergency cooling system is not justified through tactical and technical considerations.

The zero hydrogen content level obtained repeatedly at the incinerator outlet is a result that significantly exceeds the initial quality requirements *CTQ* for acceptance tests.

It was decided to maintain the already determined bed configuration, although placement of a traditional catalyst at the beginning seems to be a better solution. However, this variant was not tested during factorial trials. Due to the imposed time constraints and pressure of the Shipyard, the hydrogen incinerators were moved to the process inspection phase following a shortened improvement phase.

## PROCESS INSPECTION PHASE

The results of the conducted acceptance tests did not depart from the results of previous tests. Due to the acceptance of the performed modernisation of the hydrogen incinerators the systems were reinstalled on the submarine. The vessel with the installed incinerators was handed over.

The assembly of the hydrogen combustion system on the submarine did not involve any special recommendations or application of scale-up methods, nor did it require repetition of any tests on the actual vessel due to having performed the tests on an actual shipboard installation. The only difference rested in shortening the route of the hydrogen-air mix and simulation of a battery compartment with the use of a pipe reactor to obtain hydrogen-air mixes. These changes could have an effect only on a reduction of the ventilation stream, which was simulated during the acceptance tests by lowering the flow value to the level of  $\dot{V}_0 \cong 120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

## CONCLUSION

The plan for the implementation of modernised incinerators on a submarine encompassed several following guidelines regarding the process of their operation.

Due to the theoretical danger of catalyst overheating, leading to its partial deactivation or damage, it is required to avoid long periods of operation of  $t > 20 \text{ min}$  with high hydrogen concentrations of  $C_{H_2} > 2\%_v$ . However, such situations are not likely, as there is no reason to assume that hydrogen emission from battery cells can remain at a significant level over a long period of time.

Dangerous hydrogen emission may occur in a situation where the decision is taken for an immediate immersion following long-term forced battery charging on the surface. In the course of charging it is required to perform intensive ventilation of battery compartments in

zanurzeniu po długotrwałym, forsownym ładowaniu akumulatorów na powierzchni. Podczas takiego ładowania należy intensywnie wentylować jamy akumulatorowe w systemie otwartym a z chwilą podjęcia decyzji o uszczelnieniu okrętu do zanurzenia należy zmienić obieg wentylacji jam akumulatorowych na wewnętrzny poprzez spalarki wodoru.

Ze względu na zastosowanie nowych typów katalizatorów należy co 3 lata przeprowadzić kontrolę aktywności katalizatora na stanowisku badawczym. Podczas planowania przeglądów należy zaplanować dokończenie badań związanych z optymalizacją konfiguracji złoża.

Należy rozważyć wprowadzenie zmian konstrukcyjnych uwzględniających wprowadzanie awaryjnego chłodzenia oraz monitoringu temperatury między paletami złoża. Badania własne oraz analiza zastosowanych i podobnych rozwiązań pozwalają na stwierdzenie, że proces spalania wodoru będzie pod kontrolą pod warunkiem zachowania właściwego  $SOP^{18}$  na wypadek konieczności długotrwałego spalania mieszaniny wodorowo-powietrznej o dużej zawartości wodoru  $> 2\%_v H_2/powietrze$ .

Warto zastanowić się nad ustanowieniem dodatkowych metod szybkiej detekcji utraty kontroli nad procesem spalania wodoru i efektywnych procedur postępowania celem jej przywrócenia. Szybka, automatyczna detekcja utraty kontroli nad procesem dopalania wodoru wymagałaby dodatkowej modernizacji polegającej na wprowadzeniu pomiarów zawartości wodoru na wlocie i wylocie spalarki, pomiarów temperatury pomiędzy sekcjami palet zawierających katalizator, sprzęgniętego z systemem chłodzenia międzystopniowego.

Pomiary te powinny być wyposażone w elementy umożliwiające zintegrowanie ich z istniejącym systemem pomiarowym. Obecnie o zawartości wodoru w powietrzu wentylacyjnym przed spalarką wodoru można wnioskować z pomiarów jego stężenia w jamach akumulatorowych a za spalarką z pomiarów stężenia wodoru na przedziale, na który kierowany jest strumień powietrza po dopaleniu wodoru.

Obecnie, zabezpieczenie przed przegrzaniem opiera się o  $SOP$  polegający na ustanowieniu odpowiedniego nadzoru. Prostym ułatwieniem takiego nadzoru mogłoby być umieszczenie na obudowie spalarki termometrów ciekłokrystalicznych. Takie termometry można zamówić, jako taśmy przyklepne. Informują one o przekroczeniu pewnych temperatur poprzez zmianę koloru lub odsłonięcie liczby określającej przybliżoną temperaturę.

an open-circuit system and following the decision to seal the vessel for diving, the ventilation circuit is to be switched over to the internal mode by the hydrogen incinerators.

Due to the application of new types of catalysts, it is necessary to conduct catalyst activity inspection at the test bench every 3 years. While planning inspections it is necessary to schedule the completion of tests connected with bed configuration optimisation.

Moreover, an introduction of constructional changes should be considered in order to enable the implementation of an emergency cooling system, and temperature monitoring between bed pallets. Our own studies and analysis of the applied and similar solutions allow to conclude that the hydrogen combustion process will be controlled provided that a proper  $SOP^{18}$  is maintained in the case of a necessity to ensure long-standing combustion of hydrogen-air mix with a high hydrogen content  $> 2\%_v H_2/air$ .

It is worth considering development of additional methods for rapid detection of a control loss over the hydrogen combustion process, and effective control recovery procedures. Quick and automatic detection of control loss over the hydrogen combustion process would require additional modernisation, consisting in the introduction of hydrogen content measurements at the incinerator inlet and outlet, and temperature measurement between sections of pallets containing a catalyst coupled with an interstage cooling system.

The said measurements should be supplied with elements enabling their integration with the existing measurement system. Currently, hydrogen content in the ventilation air before the hydrogen incinerators can be calculated on the basis of its concentration measurements in the battery compartments, and behind the incinerator from hydrogen concentration measurements in the section where the stream of air after hydrogen combustion is directed.

The currently applied protection against overheating is based on  $SOP$  consisting in the establishment of proper supervision. It could be easily facilitated with the placement of liquid crystal thermometers on the incinerator housing. Such thermometers can take the form of an adhesive tape that highlights when certain temperatures have been exceeded by changing colour or showing a number indicating approximate temperature.

## BIBLIOGRAPHY

1. Kłos R. Life sustaining systems in a submarine. Gdynia: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2008. p. 163. ISBN 978-83-924989-4-0;
2. Morfin F., Sabroux J-C, Renouprez A. 2004. Catalytic combustion of hydrogen for mitigating hydrogen risk in case of a severe accident in a nuclear power plant: study of catalysts poisoning in a representative atmosphere. Applied Catalysis B: Environmental. 2004, Vol. 47, pp. 47-58;
3. Amrousse R., Batonneau Y., Kappenstein Ch. 25 - 28 July 2010. Catalytic Combustion of Hydrogen-Oxygen Cryogenic Mixtures over Cellular Ceramic Based-Catalysts. Nashville, TN : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 25 - 28 July 2010. pp. 2010-7055;
4. Krawczyk M., Namiesnik J. 2003. Application of a catalytic combustion sensor (Pellistor) for the monitoring of the explosiveness of a hydrogen-air mixture in the upper explosive limit range. Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. 2003, Vol. 25, 5, pp. 115-122; doi: 10.1155/S1463924603000208;
5. Bond G.C. 1979. Heterogenous catalysis-Basics and applications. Warsaw : Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1979. ISBN 83-01-00087-2;
6. Barbir F. 2005. PEM Fuel Cell - Theory and Practice. London : Elsevier Academic Press, 2005. ISBN-10: 0-12-078142-5; ISBN-13: 978-0-12-078142-3;
7. Kłos R. Removal of oxidable contaminations contained in submarine atmosphere. Polish Maritime Research. 2008, Vol. 57, 3, pp. 67-69;
8. Kłos R. Catalytic combustion of hydrogen in a submarine. Gdynia: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2015. ISBN 978-83-938-322-3-1;
9. Kłos R. Measurement system reliability assessment. Polish Hyperbaric Research. 2015a, Vol. 51, 2.



dr hab. inż. Ryszard Kłos, prof. nadzw.

AMW

Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów

Westerplatte

Zakład Technologii Prac Podwodnych

81 – 103 Gdynia 3, ul. Śmidowicza 69

Tel: +58 626 27 46, Fax: +58 626 27 61

<sup>1</sup> techniki rozumianej tutaj, jako celowego, racjonalnego, opartego na teorii sposobu zarządzania projektami,

<sup>1</sup> technique is understood as a purposeful, rational, theory-based project management,

<sup>2</sup> techniki rozumianej tutaj, jako działu obejmującego środki materialne i umiejętności posługiwania się nimi, umożliwiającymi celową działalność,

<sup>2</sup> technique is understood here as a branch encompassing material measures and skills in their handling that enable undertaking a targeted activity,

<sup>3</sup> ang. *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*,

<sup>3</sup> *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*,

<sup>4</sup> okręty posiadające na burcie ciekły tlen do zasilania silników spalinowych w położeniu podwodnym mogą realizować proces ładowania pod powierzchnią wody, lecz przy braku obserwacji powierzchni morza oraz przestrzeni powietrznej, taki długotrwały manewr jest także niebezpieczny,

<sup>4</sup> vessels equipped with liquid oxygen for powering combustion engines in an underwater position can perform loading under the surface, however the inability to conduct surface and air observation causes that such a long-lasting manoeuvre is also dangerous,

<sup>5</sup> minimalizujące emisję tlenków azotu, tlenku węgla i niespalonych węglowodorów,

<sup>5</sup> minimisation of emission of nitrogen oxides, carbon monoxide and unburned hydrocarbons,

<sup>6</sup> w kopalniach umożliwiają one użycie typowych silników spalinowych do napędzania wielu maszyn, np. samochodów transportowych,

<sup>6</sup> in mines they enable the use of typical combustion engines to power many machines, e.g. transport vehicles,

<sup>7</sup> klastery,

<sup>7</sup> clusters,

<sup>8</sup> ang. *Critical to Quality*,

<sup>8</sup> known as *Critical to Quality*,

<sup>9</sup> pellistory (od ang. słów pellet i resistor) to porowate elementy ceramiczne zawierające odpowiedni materiał katalityczny, w których osadzony jest drut platynowy, przez który przepływa prąd elektryczny wygrzewający całość do temperatury kilkuset stopni Celsjusza. Jeśli wskutek katalitycznego utlenienia wodoru temperatura wzrośnie, to rezystancja drutu powinna proporcjonalnie ulec wzrostowi. Zmiana rezystancji stanowi sygnał analityczny,

<sup>9</sup> pellistors (a combination of words pellet and resistor) are porous ceramic elements containing a particular catalytic material with a platinum wire enabling the flow of electrical current heating the component up to several hundred degrees Celsius. If as a result of catalytic hydrogen oxidation the temperature increases the wire resistance should proportionally increase. Changes in resistance constitute an analytical signal,

<sup>10</sup> ang. *Reliability and Reproducibility*,

<sup>10</sup> known as *Reliability and Reproducibility*,

<sup>11</sup> ang. *Quality Function Deployment*,

<sup>11</sup> known as *Quality Function Deployment*,

<sup>12</sup> przykładowo, podniesienie wydajności wentylatorów,

<sup>12</sup> for example, increasing of fan efficiency,

<sup>13</sup> problematyka bezpieczeństwa została opisana w trzecim w serii cyklu artykułów, który będzie opublikowany w późniejszym terminie,

<sup>13</sup> safety issues have been discussed in the third article in the series that will be published at a later date,

<sup>14</sup> model rozumiany tutaj, jako możliwie najbardziej uproszczony system działający analogicznie do oryginalnego w zakresie interesujących funkcjonalności,

<sup>14</sup> here 'model' is understood as possibly most simplified system operating analogically to the original one in terms of the analysed functionalities,

<sup>15</sup> ang. *Design of Experiment*,

<sup>15</sup> known as *Design of Experiments*,

<sup>16</sup> ang. *Full Factorial Experiment*,

<sup>16</sup> known as *Full Factorial Experiment*,

<sup>17</sup> wielowymiarową przestrzeń odpowiedzi,

<sup>17</sup> multidimensional response space,

<sup>18</sup> ang. *Standard Operational Procedure*,

<sup>18</sup> *Standard Operational Procedure*.

