

Mining

INFORMATICS AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL



INFORMATICS
INFORMATYKA

ELECTRICAL ENGINEERING
ELEKTRONIKA

AUTOMATION
AUTOMATYKA

CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING
TECHNICAL IT AND TELECOMMUNICATIONS
ENVIROMENTAL ENGINEERING, MINING AND ENERGY TECHNOLOGY
MATERIALS ENGINEERING
QUALITY MENAGEMENT

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ENERGOTECHNIKA
INŻYNIERIA MECHANICZNA
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI

MINING – INFORMATICS, AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
Published since 1962

DOI: <https://doi.org/10.7494/miag>

Chairman of the Scientific Board/Przewodniczący Rady Naukowej:
Grzegorz Cieplik, AGH University of Science and Technology, Kraków (Poland)

Secretary of the Scientific Board/Sekretarz Rady Naukowej:
Krzysztof Kotwica, AGH University of Science and Technology, Kraków (Poland)

Members of the Scientific Board/ Członkowie Rady Naukowej:
Dariusz Andriukaitis, Kaunas University of Technology, Kaunas (Lithuania)
Naj Aziz, University of Wollongong, Wollongong (Australia)
Edward Chlebus, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)
George L. Danko, University of Nevada, Reno (USA)
Krzysztof Filipowicz, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Jiří Fries, Technical University of Ostrava, Ostrava (Czech Republic)
Leonel Heradia, EAFIT University, Medellín (Columbia)
Arkadiusz Mężyk, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Josph Molnar, University of Miskolc, Miskolc (Hungary)
Jacek Paraszcza, Laval University, Quebec (Canada)
Sorin Mihai Radu, University of Petrosani, Petrosani (Romania)
Yuan Shujie, Anhui University of Science and Technology, Huainan (China)
Marek Sikora, Institute of Innovative Technologies EMAG, Katowice (Poland)
Radosław Zimroz, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)
Nenad Zrnić, University of Belgrade, Belgrade (Serbia)

Editorial staff/ Redakcja czasopisma:
Editor in Chief/ Redaktor naczelny – *Krzysztof Krauze*
Deputy Editor in Chief/ Zastępca redaktora naczelnego – *Jacek Korsi*
Managing Editor/ Kierownik redakcji – *Kamil Mucha*
Manuscript Editor/ Redaktor techniczny – *Tomasz Wydro*
Web Editor/ Redaktor strony internetowej – *Marcin Nawrocki*

Associate editors/ Redaktorzy tematyczni:
Jarosław Joostberens (automation and robotics/ automatyka i robotyka)
Tomasz Siostrzonek (electrical engineering/ elektronika i energotechnika)
Tomasz Machniewicz (mechanical engineering/ inżynieria mechaniczna)
Ryszard Klempka (technical IT/ informatyka techniczna)
Antoni Wojaczek (telecommunications/ telekomunikacja)
Waldemar Korzeniowski (environmental engineering, mining and energy technology/ inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka)
Kazimierz Drozd (materials engineering/ inżynieria materiałowa)
Patrycja Hąbek (quality management/ nauki o zarządzaniu i jakości)

PUBLISHER

Linguistic Corrector/ Korekta językowa: *Aedden Shaw* (English/ język angielski), *Kamila Zimnicka* (Polish/ język polski)

Desktop Publishing/ Skład komputerowy: *Andre*

Cover Design/ Projekt okładki i strony tytułowej: *ROMEDIA-ART*

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2021, Creative Commons CC-BY 4.0 License

ISSN 2449-6421 (online)
ISSN 2450-7326 (printed)

The electronic version of the journal is the primary one.
Number of copies: 50

Wydawnictwa AGH (AGH University Press)
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
www.wydawnictwo.agh.edu.pl

Table of Contents

Sławomir Straszak, Artur Wiktor

Sheave axles of mine shaft hoists – difficulties and limitations in assessing their technical condition during in-service tests	7
Osie kół linowych górniczych wyciągów szybowych – trudności i ograniczenia w ocenie stanu technicznego podczas badań eksploatacyjnych	14

Bronisław Biel

Innovative hydromechanical cleaning of mine water sedimentation tanks in underground headings	21
Innowacyjne rozwiązanie hydromechanicznego czyszczenia osadników wód dołowych w podziemnych wyrobiskach górniczych	26

Paweł Madejski, Sławomir Różycki, Marian Banaś, Tadeusz Paják

Selected aspects of coal gasification for application in low-emission energy technologies	31
Wybrane aspekty zgazowania węgla do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych	40

Władysław Celebański, Piotr Piechota

Methods for adjusting the braking force of winders with a traction sheave to prevent the risk of wire rope slippage	49
Metody regulacji siły hamowania maszyn wyciągowych z kołem pędnym chroniące przed ryzykiem wystąpienia poślizgu lin	56

ABSTRACTS

ŚLAWOMIR STRASZAK
ARTUR WIKTOR

SHEAVE AXLES OF MINE SHAFT HOISTS – DIFFICULTIES AND LIMITATIONS IN ASSESSING THEIR TECHNICAL CONDITION DURING IN-SERVICE TESTS

The paper discusses the difficulties and limitations in the possibility of assessing the technical condition of sheave axles during in-service tests resulting from the lack of access to many areas of the outer surface of the axle due to built-in bearings and mounted sheaves, as well as from the complex shape of some types of axles. Examples of in-service axle failures are given and the causes are discussed. In addition, information on the legal basis for performing non-destructive testing of sheave axles in service, technical requirements for sheave axles, critical areas found in axles, theoretical basis for ultrasonic testing, and testing techniques including the latest phased array method is presented.

BRONISŁAW BIEL

INNOVATIVE HYDROMECHANICAL CLEANING OF MINE WATER SEDIMENTATION TANKS IN UNDERGROUND HEADINGS

In mines, water from natural inflows as well as process water from fire protection systems is usually stored in sedimentation tanks, located primarily at the lowest level of the mine. Such water usually contains mechanical contaminants, undergoing the process of sedimentation.

The article presents a method enabling the cleaning of mine water sedimentation tanks. The method involves jet mining, hydrotransport and segregation into sediment (i.e. the solid fraction) and water. The consistence of sediment obtained after segregation makes the former transportable (e.g. using an appropriate conveyor/feeder), whereas water can be reused subsequently in the jet mining of sediment. One of the solutions enabling the performance of the above-named process is a ZEKO series system.

PAWEŁ MADEJSKI
ŚLAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJĄK

SELECTED ASPECTS OF COAL GASIFICATION FOR APPLICATION IN LOW-EMISSION ENERGY TECHNOLOGIES

Solid fuel electricity generation has been known and used for many years. The combustion of solid fuels is a complex process that requires proper preparation of the fuel, carrying out the combustion process, as well as the removal of harmful substances in the form of dust and gaseous pollutants (NO_x, SO_x, CO) from exhaust gases emitted into the environment. For decades, the gaseous form has been considered the noblest form of fuel. Gaseous fuels can be easily transported over long distances, are immediately ready for combustion and the composition of the fuel mixture can be freely adjusted. The constant pursuit to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions require the use of low-emission and zero-emission energy generation technologies. In the case of coal, this will mean a shift from direct combustion to more ad-

STRESZCZENIA

ŚLAWOMIR STRASZAK
ARTUR WIKTOR

OSIE KÓŁ LINOWYCH GÓRNICZYCH WYCIĄGÓW SZYBOWYCH – TRUDNOŚCI I OGRANICZENIA W OCENIE STANU TECHNICZNEGO PODZAS BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

W artykule omówiono trudności i ograniczenia w możliwości oceny stanu technicznego osi kół linowych podczas badań w eksploatacji wynikające z braku dostępu do wielu obszarów powierzchni zewnętrznej osi ze względu na zabudowane łożyska i osadzone koła linowe, a także ze skomplikowanego kształtu niektórych typów osi. Podano przykłady eksploatacyjnych uszkodzeń osi i omówiono przyczyny ich powstawania. Dodatkowo przedstawiono informacje dotyczące podstaw prawnych wykonywania badań nieniszczących osi kół linowych w czasie eksploatacji; wymagań technicznych dla osi kół linowych; obszarów krytycznych występujących w osiach; teoretycznych podstaw badań ultradźwiękowych oraz technik prowadzenia badań wraz z najnowszą metodą *phased array*.

BRONISŁAW BIEL

INNOWACYJNE ROZWIĄZANIE HYDROMECHANICZNEGO CZYSZCZENIA OSADNIKÓW WÓD DOŁOWYCH W PODZIEMNYCH WYROBISKACH GÓRNICZYCH

W kopalniach podziemnych woda pochodząca z naturalnych dopływów oraz woda technologiczna pochodząca głównie z sieci rurociągów przeciwpożarowych gromadzona jest w osadnikach znajdujących się najczęściej na najniższym poziomie kopalni. Zwykle jest to woda zanieczyszczona mechanicznie. Gromadzenie się osadu odbywa się na zasadzie sedymentacji.

W artykule przedstawiono metodę oczyszczania osadników wód kopalnianych opartą na zasadzie hydrouwabiania i hydrotransportu oraz sposób segregacji na część stałą, czyli osad, i wodę. Konsystencja otrzymanego osadu pozwala na jego transport, np. za pomocą przenośnika, a woda może być ponownie wykorzystana w procesie hydrouwabiania osadu. Do tego celu stosuje się urządzenia z serii ZEKO.

PAWEŁ MADEJSKI
ŚLAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJĄK

WYBRANE ASPEKTY ZGAZOWANIA WĘGLA DO ZASTOSOWANIA W NISKOEMISYJNYCH TECHNOLOGIACH ENERGETYCZNYCH

Wytwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw stałych jest znane i stosowane od wielu lat. Spalanie paliw stałych jest procesem złożonym, wymagającym odpowiedniego przygotowania paliwa, przeprowadzenia procesu spalania, jak również pozbawienia spalin szkodliwych substancji emitowanych do środowiska w postaci pyłu oraz zanieczyszczeń gazowych (NO_x, SO_x, CO). Od dekad jako najszlachetniejszą postać paliwa uznaje się postać gazową. Paliwa gazowe mogą być łatwo transportowane na duże odległości, są od razu gotowe do spalania, a skład mieszanki można dowolnie regulować. Ciągłe dążenie do ograniczenia antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych wiąże się z koniecznością stosowania niskoemisyjnych i zeroemisyjnych technologii wytwarzania energii. W przypadku węgla oznaczać to będzie konieczność

vanced systems powered by gaseous fuel. The paper presents an overview of the available techniques and technologies of solid fuel gasification aimed at the production of gaseous fuels, which can be used in low-emission energy technologies. The computational methods of the gasification process are also presented, which allow the selection of the best technology and operating parameters of individual reactors.

WŁADYSŁAW CELEBAŃSKI
PIOTR PIECHOTA

METHODS
FOR ADJUSTING THE BRAKING FORCE OF WINDERS
WITH A TRACTION SHEAVE TO PREVENT THE RISK OF
WIRE ROPE SLIPPAGE

In Koeppel winders, the emergency braking deceleration values must be higher than the values required by mining regulations and lower than the critical deceleration values due to the risk of hoisting rope slippage. Slippage of suspension ropes can lead to damage to the traction sheave lining and, in extreme conditions, serious damage to the shaft hoist. In order to limit the braking force to a safe value, the air or hydraulic oil pressure in the braking systems of winders is regulated during braking.

This paper presents methods for adjusting pressure in braking systems during braking and their influence on: the risk of slippage of the suspension ropes, the dynamics of the driving system and the dynamics of the skips themselves. Particular attention was paid to the solution in which the braking force varies during the braking process which can cause large changes in the value of the force acting on the winder.

odchodzenia od technologii bezpośredniego spalania na rzecz bardziej zaawansowanych układów zasilanych paliwem w postaci gazowej. W artykule przedstawiono przegląd dostępnych technik i technologii zgazowania paliw stałych ukierunkowanych na produkcję paliw gazowych, możliwych do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych. Przedstawione zostały także metody obliczeniowe procesu zgazowania mające umożliwić dobór najlepszej technologii oraz parametrów pracy poszczególnych reaktorów.

WŁADYSŁAW CELEBAŃSKI
PIOTR PIECHOTA

METODY REGULACJI SIŁY HAMOWANIA
MASZYN WYCIĄGOWYCH Z KOŁEM PĘDNYM
CHRONIĄCE PRZED RYZYKIEM
WYSTĄPIENIA POŚLIZGU LIN

W maszynach wyciągowych z kołem Koeppel wartości opóźnień hamowania awaryjnego muszą być większe od wartości wymaganych przepisami górniczymi oraz ze względu na ryzyko wystąpienia poślizgu lin nośnych muszą być mniejsze od wartości opóźnień krytycznych. Poślizg lin nośnych może doprowadzić do uszkodzenia wykładziny koła napędowego, a w skrajnych warunkach do poważnego uszkodzenia wyciągu szybowego. W celu ograniczenia siły hamującej do wartości bezpiecznej ciśnienie powietrza lub oleju hydraulicznego w układach hamulcowych maszyn wyciągowych w czasie hamowania jest regulowane.

W artykule przedstawiono sposoby regulacji ciśnienia w układach hamulcowych podczas hamowania i ich wpływ na ryzyko wystąpienia poślizgu lin nośnych, dynamikę układu napędowego oraz dynamikę samych naczyń wyciągowych. Szczególną uwagę zwrócono na rozwiązanie, w którym siła hamowania jest zmienna w czasie procesu hamowania, co może powodować duże zmiany wartości siły działającej na naczynia wyciągowe.

SŁAWOMIR STRASZAK

ARTUR WIKTOR

Sheave axles of mine shaft hoists – difficulties and limitations in assessing their technical condition during in-service tests

The paper discusses the difficulties and limitations in the possibility of assessing the technical condition of sheave axles during in-service tests resulting from the lack of access to many areas of the outer surface of the axle due to built-in bearings and mounted sheaves, as well as from the complex shape of some types of axles. Examples of in-service axle failures are given and the causes are discussed. In addition, information on the legal basis for performing non-destructive testing of sheave axles in service, technical requirements for sheave axles, critical areas found in axles, theoretical basis for ultrasonic testing, and testing techniques including the latest phased array method is presented.

Key words: ultrasonic testing, UT probe, anomalies, sheave axles, cracks, difficulties and limitations

1. INTRODUCTION

Periodic testing of sheave axles as an element of the shaft hoist, for which a particularly high degree of safety is required, has been carried out in hard coal mining for more than thirty years.

Non-destructive testing is primarily used to evaluate the technical condition of sheave axles. These tests are conducted using the following methods:

- visual testing (VT),
- ultrasonic testing (UT),
- magnetic particle testing (MT).

The non-destructive character of testing, i.e. not limiting the further usefulness of an element, not causing its damage, is particularly useful for testing sheave axles.

When an axle is in operation, ultrasonic testing is most often used to avoid disassembly for testing. It is a method that in most cases gives a qualitative result, i.e. it allows to obtain information as to the loca-

tion of the discontinuity, its approximate size, and sometimes even as to its type (service crack, material defect, etc.) [1]. The obtained test results can be the basis for assessing the suitability of axles for continued use in terms of their strength and technological properties. Systematic, periodic inspection makes it possible to detect potential operating defects of an axle at an early stage, to follow their development, i.e. the so-called crack propagation process during operation, thus extending its service life. Detecting in-service cracks at an early stage of formation, monitoring their propagation, also gives the right amount of time to replace the axle.

This paper focuses on the difficulties and limitations in assessing the technical condition of axles during in-service testing, discusses the origins and legal basis for axle testing, presents the current quality requirements for axles, outlines various ultrasonic testing techniques, and describes abnormalities detected in axles during testing.

2. THE GENESIS AND LEGAL BASIS FOR TESTING SHEAVE AXLES

Following the failure consisting in fatigue fracture of the sheave axle of the winding gear installed in the „Jan Henryk” shaft of the Lenin Coal Mine, which took place in 1985, the Coal Mining Department of the Polish Ministry of Economy and Energy, in its letter of 1 April 1985, no. GW4.11/209/85 and Communication no. 4/85 of 14 May 1985, determined the scope of ad hoc preventive measures, including:

- extraordinary ultrasonic testing of sheave axles and assessment of their construction in winding gears in service,
- the obligation of systematic non-destructive testing of sheave axles in periods not exceeding 5 years.

The tests mentioned above were commissioned to Central Research Laboratory of “Ziemowit” Coal Mine, the precursor of the current Research and Supervisory Centre of Underground Mining (CBiDGP).

Currently, the testing of sheave axles in mining plants is governed by sec. 3.12.6.5 of Appendix No. 4 to the Polish Regulation of the Minister of Energy of 23 November 2016, as amended, on detailed requirements for conducting underground mining operations [2].

At CBiDGP – ORiP, as an expert body performing, among others, the 3-year testing of rope sheaves, the issue of axle tests is governed by the relevant test methods and instructions [3, 4].

3. MANDATORY REQUIREMENTS FOR SHEAVE AXLES

The sheave axles for use in mine winding gears are made of steel forgings with multiple steps, supported in two places.

According to the Polish standard PN-G-46203:1996 “Górnictwo wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące.

Wymagania i badania” [Mining shaft hoists. Guide sheaves. Requirements and testing] axles should be manufactured as open-die forgings of type A, category RR, from steel in the normalized state, in the quality class of the forgings no worse than 3 according to BN-86/0601-09 “Stal. Badania nieniszczące wyrobów hutniczych. Badania odkuwek metodą ultradźwiękową” [Steel. Non-destructive testing of metallurgical products. Ultrasonic testing of forgings] [5]. This standard has now been withdrawn and replaced by PN-EN 10228-3:2016-07, which introduces four quality classes for forgings [6]. As a general rule, it should be assumed that the requirements for the quality class of the forging intended for the axle manufacture are to be specified by the design engineer stating which standard the requirements must be met. The forging quality class is determined by ultrasonic testing. Most commonly, forgings of quality class 3 and 4 are used for sheave axles.

To avoid the notch effect, the joints between axle steps are rounded with relatively large radii. The height of the offsets, for strength reasons, should generally not exceed $h \leq 0.1d$, where d is the axle diameter [7]. Both ends of the axle are free. The sheave axles are mounted in roller or plain bearings.

4. CRITICAL LOCATIONS IN THE AXLES

The axles of the sheaves are mainly subjected to alternating bending loads on both sides. Load distribution in the sheave axles is uneven. This is due to the nature of the load and the shape of the axle being adapted to work with sheaves. Therefore, locations more susceptible to cracking can be identified. These areas are called critical locations (Fig. 1) [7]. Critical locations in axles are as follows:

- in the offset area of the bearing journals (1, 2),
- in the area of the sheave seating edge (3, 4, 5, 6),
- in other offsets determined by the mounting design (7, 8).

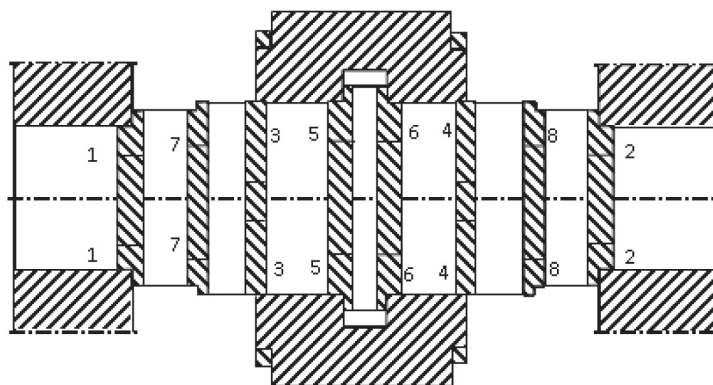


Fig. 1. Layout of critical locations in the sheave axle

The dimensions of critical locations should be determined according to the diameter of the axle in the critical location zone. For cylindrical profile parts, this dimension is 0.25 of the diameter dimension [7].

5. THEORETICAL BASIS OF ULTRASONIC TESTING

Ultrasonic testing involves the use of the interaction between ultrasonic waves and the object being tested. The method enables the detection of discontinuities both inside and on the surface of the test piece.

Many techniques (echo, resonance, transmission, phased array, etc.) are used in ultrasonic testing, but the most popular is the so-called echo technique, which is also used for testing sheave axles.

The principle of the echo method is to transmit ultrasonic waves and receive them after reflection from discontinuities in the material or reflection from boundary surfaces.

Transmission of pulses of ultrasonic waves takes place by means of a probe with a specific transducer frequency and dimensions.

The ultrasonic wave generated by the probe propagates through the tested material and reflects off flaws, discontinuities or boundary surfaces of the tested object. The ultrasound wave, after reflection, returns to the transducer in the probe and stimulates it to vibrate. These vibrations are converted into electric impulses which, after appropriate processing in the electronic system of the flaw detector, give us the image on the screen in the form of a peak (echo) [1].

By measuring the transit time of the ultrasonic wave and knowing the speed of the wave propagation in a given material, it is possible to localize the detected discontinuities.

Single and dual longitudinal wave probes, as well as oblique, angled transverse wave probes, where the ultrasonic wave is introduced into the material at an appropriate angle, are typically used to test sheave axles. Depending on the structure of the tested material (granularity, attenuation), probes with frequencies from 1 MHz to 4 MHz are most commonly used.

A specific variation of the oblique probe is the surface wave probe, in case of which the ultrasound wave is introduced at an angle of 90°. Such probes are particularly useful for testing sheave axles cooperating with sliding bearings, allowing the detection of cracks or tears in the offset zone, which in practice eliminates the need for magnetic particle testing.

6. DIFFICULTIES AND LIMITATIONS IN CONDUCTING THE NONDESTRUCTIVE TESTING OF SHEAVE AXLES

The ultrasonic method is used as the basic method to evaluate the technical condition of sheave axles. Ultrasonic testing of sheave axles during operation can only be performed to a limited extent due to the lack of access to the entire surface of the tested axle, which is largely covered by the sheaves and bearings mounted on the axle, usually impossible to remove under operating conditions.

In addition to the limited access to many parts of the external surface of the axle, additional difficulties in testing are posed by surface irregularities (scratches, corrosion) and internal defects (manufacturing, metallurgical – applies to axles manufactured before the introduction of quality standards)

Ultrasonic testing is always preceded by a preliminary visual inspection of the axle in the condition prepared for testing.

In the case of axles with roller bearings, these will be the exposed two faces of the axle, and for axles with plain bearings, additionally the exposed sliding surfaces of the bearing journals after removal of the upper covers and half-shells.

Hence, a distinction can be made between the following basic cases for conducting the test:

- from both end faces and partially from the side face in the journal areas – the axles mating with the plain bearings (Fig. 2),
- sheave axles with roller bearings from both end faces with complete inaccessibility of the side faces.

For axles with plain bearings, the basic test is the inspection from the lateral surface with transverse wave probes (T) with angles of refraction of 45°, 60° and surface wave probes of 90°. In addition, a test with longitudinal wave normal probes (L) is performed from both faces (Fig. 2). In the case of echoes on the flaw detector screen suggesting the presence of cracks in the axle, the defective areas are subjected to magnetic particle inspection (provided that the places of possible cracks are visible and not covered by structural elements cooperating with the axle) for final verification of indications.

The testing of axles with rolling bearings is only carried out from both end faces, in several phases, using longitudinal and possibly transverse waves. Initially, high energy normal probes are used to penetrate the full length of the axle material with waves. In the front part of the axle, echoes from cracks

appearing mainly in areas of section changes or under the edges of mating parts (bearings, pulley hubs) are looked for. Offset echoes are observed at the rear of the axle, the presence of which is of control significance.

The next phase, if necessary, is a detailed testing using oblique probes. This allows the ultrasonic wave

beam to be directed into the corner that the hypothetical crack forms with the lateral surface of the axle (Fig. 2).

In the third stage, explaining tests are conducted to avoid the misinterpretation of the inspection results. Angled probes are used, mainly with an angle of refraction of 45° .

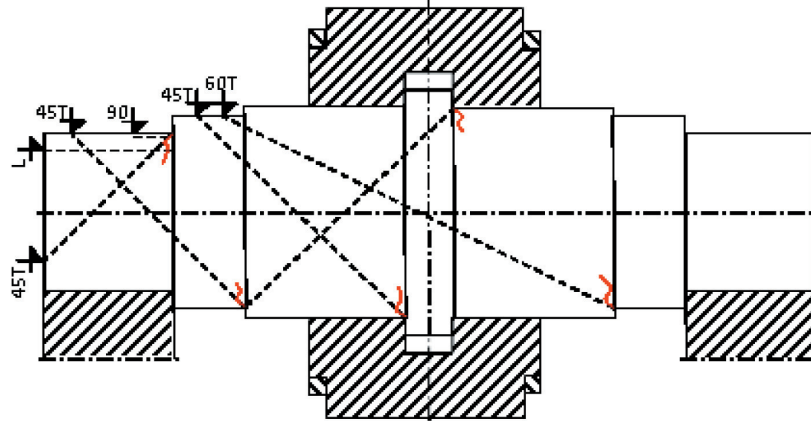


Fig. 2. Ultrasonic testing of sheave axle with plain bearings

One such case is the distinction of ultrasonic wave reflections originating either from the edge of a rolling bearing withdrawal sleeve or from fatigue cracks originating in the axle under that edge. As a result of the good adhesion of the sleeve to the axle and the

filling of the gap with grease, the ultrasonic waves penetrate the contact surface between the components and are reflected by the edge of the sleeve. The location of the wave reflection is identified by the position of the probe on the axle face (Fig. 3) [8].

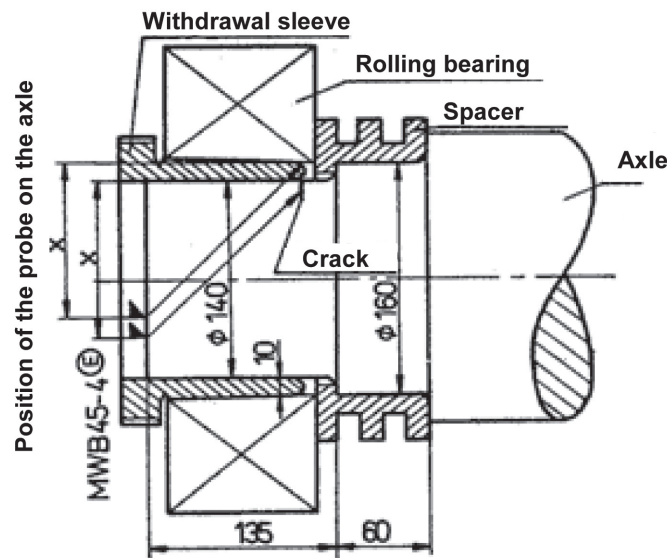


Fig. 3. Distinguishing the edge echo of rolling bearing sleeve from the axle fatigue fracture [8]

A major complication of ultrasonic inspection of sheave axles is the significant variation in their shapes and dimensions (Fig. 4 and 5).

This results in a number of apparent indications on the flaw detector screen. These are the echoes:

- associated with the flaw detector-probe system,
- arising from the transformation of ultrasonic waves at offsets, keys, etc.

Therefore, an accurate interpretation of the indications is only possible with detailed drawings of the axles and the extensive experience of the staff carrying out the inspection.

The phased array ultrasonic method offers great potential for early detection of sheave axle cracks. In this technique, phase-controlled multi-transducer (mosaic) probes cooperating with multi-channel flaw

detectors are used. If during the tests performed with a standard flaw detector the occurrence of in-service fatigue cracks is suspected, the results obtained can be verified by means of the phased array technique.

The advantage of this technique over the conventional method is that having only one probe, it is possible to shape the ultrasound beam by stimulating the transducers at the right time (change the beam introduction angles and focus the beam). This allows for the selection of optimal beam insertion angles relative to the detected discontinuity (e.g., 18°). When testing with a standard flaw detector, several probes and many angle pads with different, unusual angle values would be needed.

Application of phased array technology for axle and shaft testing:

- increases the effectiveness of the test – allows for detection of in-service fatigue cracks in the initial stage of their formation (scanning in the full range of useful angles, and not only a few as in the case of ordinary ultrasound testing),
- allows to shorten the test time – lesser number of probes used (flaw detector settings),
- facilitates the interpretation of the results (easy change of beam introduction angles – it is possible to determine at what angle the signal from a possible crack is the strongest, presentation of the indication e.g. on S-scan) (Fig. 6).

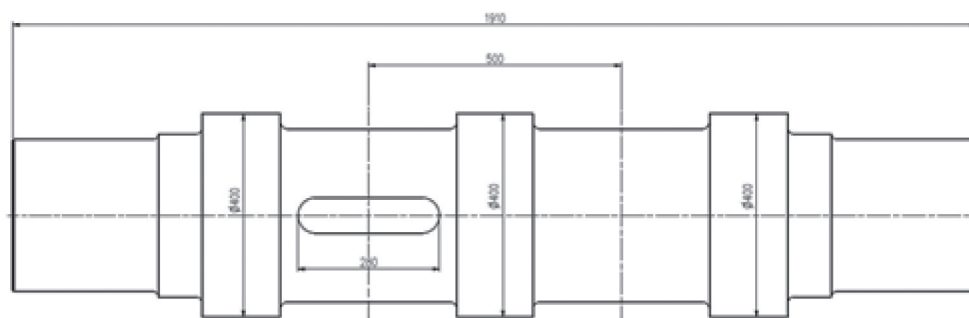


Fig. 4. Example of double-groove sheave axle

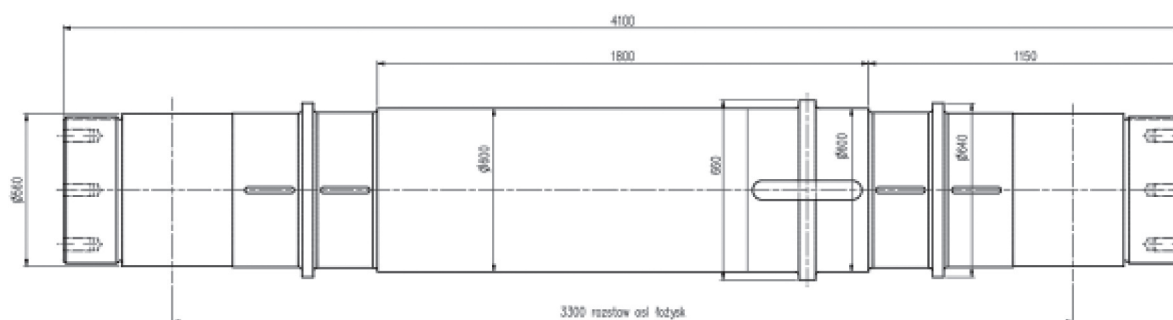


Fig. 5. Example of four-groove sheave axle

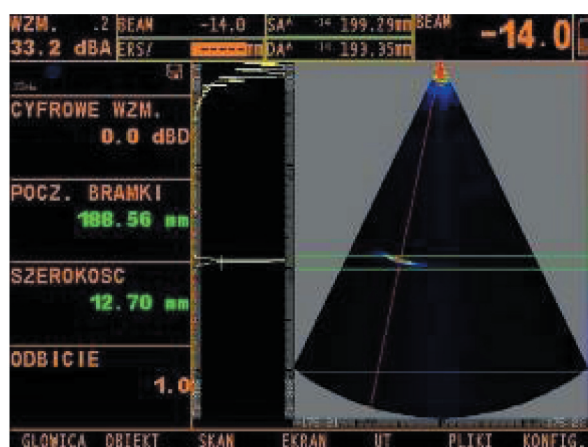


Fig. 6. Phased array imaging of a fatigue crack in the single-groove sheave axle

(B2SPA16 16-element 2 MHz probe, $\pm 30^\circ$ maximum crack indication was obtained for beam insertion angle of 14°)

7. DETECTED IRREGULARITIES IN THE SHEAVE AXLES

During tests of sheave axles, many irregularities are found in the technical condition of the axles themselves, bearing nodes and sheave hub and axle connections, which reduce the service life of the axles or even preclude their operation.

Ultrasonic detected flaws:

- Fatigue cracks. Usually caused by incorrectly manufactured axles, i.e., too small transition radii between successive offsets, resulting in a notch effect in critical areas of the axles, or too large diameter steps causing excessive stress accumulation in these areas. This is mainly the case for axles in double groove designs (Fig. 6 and 7). Sometimes fatigue cracks are initiated by corrosion pitting, often occurring at the axle-sheave hub contact surface.
- Excessive internal defectivity (i.e., excessive size and severity of defects of metallurgical origin) in critical locations. This mainly concerns the axles of old shaft hoists. These defects do not pose a direct threat to the safe operation of the axles, but under certain circumstances (stress concentration in these areas due to overloading or failure of the hoisting plant) they can cause cracks to appear.

Irregularities found during visual inspection of axles with roller bearings: the irregularities concern rather the bearings themselves and the axle to sheave hub connection.

Irregularities of axles with plain bearings:

- sharp, deep (up to about 2 mm) circumferential indentation caused by excessive wear of the bottom shell, which results in axle settling and rubbing against the bearing housing (Fig. 8),
- circumferential cracks on the sliding surface of the journals caused by contaminants getting into the oil (Fig. 8),
- corrosion spots and scuffs on the sliding surface of the journals caused by improper lubrication,
- mild, shallow, circumferential abrasion caused by the felt seal on the bearing housings,
- loose grease rings.

Axles with fatigue cracks should be replaced with new axles as soon as technically feasible, and until their replacement, crack propagation should be monitored by ultrasonic testing over a sufficiently short period of time. Remaining anomalies require immediate remediation of their causes, and axle damage should be controlled during subsequent non-destructive periodic inspections.

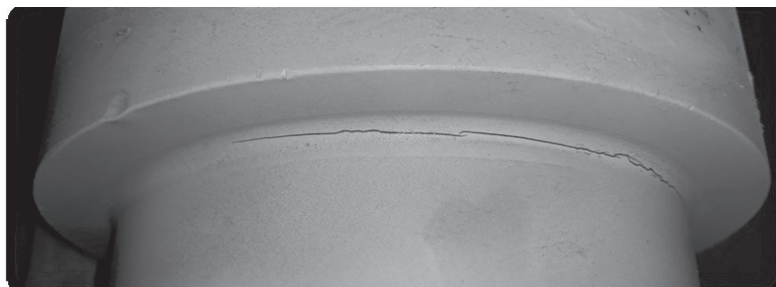


Fig. 7. Fatigue cracks detected during ultrasonic testing of single groove sheave axle (at second offset) – imaging using the magnetic particle testing (MT) method



Fig. 8. Circumferential scratches on the axle journal surface

8. SUMMARY

Despite the difficulties and limitations in testing sheave axles, having appropriate testing equipment and certified personnel with many years of experience in ultrasonic testing, it is possible to correctly assess the technical condition of axles during operation.

Early detection of in-service fatigue cracks gives the user adequate time to prepare for axle replacement while ensuring safe operation.

Periodic non-destructive testing of sheave axles prevents the occurrence of emergency conditions while also contributing to the extension of the period of the safe operation of sheaves in mine shaft hoists.

References

- [1] Pawłowski Z.: *Badania nieniszczące. Metody ultradźwiękowe*. PWN, Warszawa 1976.
- [2] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. z późniejszymi zmianami w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych: Załącznik nr 4. Dz.U. 2017, poz. 1118.*
- [3] *Metodyka postępowania rzeczoznawcy ds. badań nieniszczących materiałów i urządzeń górniczych No.: DM/MRS/40 [unpublished].*
- [4] *Technical Instruction DM/MRS/40-2 “Wykonywanie badań defektoskopowych osi kół linowych i odciskowych” – CBiDGP Issue II – August 2006 [unpublished].*
- [5] PN-G-46203:1996. *Górnice wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. Wymagania i badania*. 24.10.1996.
- [6] PN-EN 10228-3:2016-07. *Badania nieniszczące odkuwek stalowych. Część 3: Badanie ultradźwiękowe odkuwek ze stali ferrytycznych lub martenzytycznych*. 22.07.2016.
- [7] Antoniuk J.: *Maszyny górnicze. Część III. Transport kopalniany*, Wydawnictwo “Śląsk”, Katowice 1980.
- [8] Skorupa A., Jędrzejczak Z., Hyrnik E., Kucowicz E.: *Badania ultradźwiękowe elementów urządzeń wyciągowych*. Zeszyty Naukowe AGH No. 1273. Mechanika Vol. 21, Kraków 1989: 51–60.

SŁAWOMIR STRASZAK, M.Sc., Eng.

ARTUR WIKTOR, M.Sc., Eng.

Research and Supervisory Centre of Underground

Mining in Łędziny

Centre for Expert Assessment and Measurements

in Mysłowice

Centre for Expert Assessment and Supervising

the Mining Equipment

{a.wiktor; s.straszak}@cbidgp.pl

SŁAWOMIR STRASZAK
ARTUR WIKTOR

Osie kół linowych górniczych wyciągów szybowych – trudności i ograniczenia w ocenie stanu technicznego podczas badań eksploatacyjnych

W artykule omówiono trudności i ograniczenia w możliwości oceny stanu technicznego osi kół linowych podczas badań w eksploatacji wynikające z braku dostępu do wielu obszarów powierzchni zewnętrznej osi ze względu na zabudowane łożyska i osadzone koła linowe, jak i wynikające ze skomplikowanego kształtu niektórych typów osi. Podano przykłady eksploatacyjnych uszkodzeń osi i omówiono przyczyny ich powstawania. Dodatkowo przedstawiono informacje dotyczące podstaw prawnych wykonywania badań nieniszczących osi kół linowych w czasie eksploatacji; wymagań technicznych dla osi kół linowych; obszarów krytycznych występujących w osiach; teoretycznych podstaw badań ultradźwiękowych oraz technik prowadzenia badań wraz z najnowszą metodą phased array.

Słowa kluczowe: badania ultradźwiękowe, głowica ultradźwiękowa, nieprawidłowości, osie kół linowych, pęknięcia, trudności i ograniczenia

1. WSTĘP

Okresowe badania osi kół linowych jako elementu wyciągu szybowego, dla którego wymagany jest szczególnie wysoki stopień bezpieczeństwa, prowadzone są w górnictwie węgla kamiennego już od ponad trzydziestu lat.

Do oceny stanu technicznego osi kół linowych stosuje się przede wszystkim badania nieniszczące. Badania te są prowadzone metodami:

- wizualną (VT),
- ultradźwiękową (UT),
- magnetyczno-proszkową (MT).

Nieniszczący charakter badań, tzn. niepowodujący ograniczenia w dalszej przydatności eksploatacyjnej elementu, jego uszkodzenia, jest szczególnie przydatny przy badaniach osi kół linowych.

W trakcie eksploatacji osi w celu uniknięcia konieczności jej demontażu do badań najczęściej stosuje się metodę ultradźwiękową. Jest to metoda dająca w większości przypadków wynik jakościowy, czyli po-

zwalający na uzyskanie informacji co do położenia nieciągłości, przybliżonej jej wielkości, a czasem nawet co do jej rodzaju (pęknięcie eksploatacyjne, wada materiałowa itp.) [1]. Uzyskane wyniki badań mogą stanowić podstawę do oceny przydatności osi do dalszej eksploatacji z wytrzymałościowego i technologicznego punktu widzenia. Systematyczna okresowa kontrola pozwala na wczesne wykrycie ewentualnych wad eksploatacyjnych osi, śledzenie ich rozwoju, czyli tzw. procesu propagacji pęknięć w czasie pracy, przedłużając okres eksploatacji osi. Wykrycie pęknięć eksploatacyjnych w początkowej fazie powstawania oraz monitorowanie ich propagacji daje również odpowiednią ilość czasu potrzebnego do wymiany osi.

W niniejszym artykule skupiono się na trudnościach i ograniczeniach w ocenie stanu technicznego osi podczas badań w czasie eksploatacji, omówiono genezę oraz podstawy prawne badania osi, przedstawiono obowiązujące wymagania jakościowe osi, opisano różne techniki badań ultradźwiękowych oraz nieprawidłowości wykrywane w osiach podczas prowadzenia badań.

2. GENEZA ORAZ PODSTAWY PRAWNE BADAŃ OSI KÓŁ LINOWYCH

W związku z awarią zmęczeniowego pęknięcia osi koła linowego w urządzeniu wyciągowym szybu „Jan Henryk” KWK „Lenin”, która miała miejsce w 1985 r. Departament Górnictwa Węglowego MGİE w piśmie z dnia 1.04.1985 r. znak GW4.11/209/85 i Komunikacie nr 4/85 z dnia 14.05.1985 r. ustalił zakres doraźnych działań profilaktycznych obejmujących:

- nadzwyczajne badania ultradźwiękowe osi kół linowych i ocenę poprawności ich konstrukcji w czynnych urządzeniach wyciągowych,
- obowiązek systematycznych badań nieniszczących osi kół linowych w okresach nie dłuższych niż pięć lat.

Badania, o których mowa wyżej, zlecono Centralnemu Laboratorium Badawczemu KWK „Ziemowit”, protoplaście obecnego CBiDGP.

Obecnie badania osi kół linowych w zakładach górniczych reguluje pkt 3.12.6.5 Załącznika nr 4 do *Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. z późniejszymi zmianami w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych* [2].

W CBiDGP – ORiP jako jednostce rzeczoznawczej wykonującej między innymi trzyletnie badania kół linowych, sprawę badań osi regulują odpowiednie metodyki badań i instrukcje [3, 4].

3. OBOWIĄZUJĄCE WYMAGANIA DOTYCZĄCE OSI KÓŁ LINOWYCH

Osie kół linowych pracujące w górniczych urządzeniach wyciągowych wykonuje się jako wielostopniowe, podparte w dwóch miejscach, z odkuwek stalowych.

Zgodnie z normą PN-G-46203:1996 „Górnice wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. Wymagania i badania” osie należy wykonywać jako odkuwki swo-

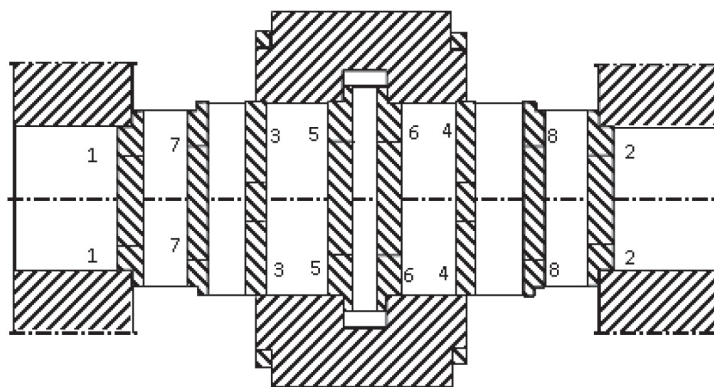
bodnie kute rodzaju A, kategorii RR, ze stali w stanie normalizowanym, w klasie jakości odkuwki nie gorszej niż 3 według BN-86/0601-09: *Stal. Badania nieniszczące wyrobów hutniczych. Badania odkuwek metodą ultradźwiękową* [5]. Aktualnie norma ta została już wycofana i zastąpiona normą PN-EN 10228-3:2016-07, norma wprowadza cztery klasy jakości odkuwki [6]. Generalnie należy założyć, że wymagania co do klasy jakości odkuwki, z której wykonana ma być oś, określa konstruktor, podając, jakiej normy wymagania muszą być spełnione. Określenie klasy jakości odkuwki następuje po badaniu przeprowadzonym metodą ultradźwiękową. Najczęściej w przypadku osi kół linowych stosuje się odkuwki klasy jakości 3 i 4.

W celu uniknięcia działania karbu przejścia między stopniami osi zaokrągla się stosunkowo dużymi promieniami. Wysokość odsadzeń, ze względów wytrzymałościowych, na ogół nie powinna przekraczać $h \leq 0,1d$, gdzie d jest średnicą osi [7]. Obydwa końce osi są swobodne. Osie kół linowych współpracują z łożyskami tocznymi lub ślizgowymi.

4. OBSZARY NIEBEZPIECZNE (KRYTYCZNE) W OSIACH

Osie kół linowych narażone są głównie na obciążenia zginające obustronnie zmienne. W osiach kół linowych występuje nierównomierny rozkład obciążenia. Wynika to z charakteru obciążenia i kształtu osi dostosowanego do współpracy z kołami linowymi. Dlatego można wyodrębnić obszary bardziej podatne na powstawanie pęknięć. Obszary te nazywa się miejscami niebezpiecznymi (krytycznymi) (rys. 1) [7]. W osiach obszary niebezpieczne występują:

- w strefie odsadzenia czopów łożyskowych (1, 2),
- w strefie krawędzi osadzenia koła linowego (3, 4, 5, 6),
- w innych odsadzeniach uwarunkowanych konstrukcją montażową (7, 8).



Rys. 1. Szkic rozmieszczenia obszarów niebezpiecznych w osi koła linowego

Wymiary obszarów niebezpiecznych ustala się stosownie do średnicy osi w strefie obszaru niebezpiecznego. Dla elementów o profilu cylindrycznym wymiar ten wynosi 0,25 wymiaru średnicy [7].

5. TEORETYCZNE PODSTAWY BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH

Badania ultradźwiękowe polegają na wykorzystaniu wzajemnego oddziaływania fal ultradźwiękowych i badanego obiektu. Metoda umożliwia wykrywanie nieciągłości zarówno we wnętrzu, jak i na powierzchni badanego elementu.

W badaniach ultradźwiękowych stosowanych jest wiele technik (echa, rezonansu, przepuszczania, *phased array* itp.), jednak najpopularniejsza jest tzw. technika echa, którą stosuje się również do badań osi kół linowych.

Zasada metody echa polega na nadawaniu fal ultradźwiękowych i ich odbiorze po odbiciu od nieciągłości w materiale lub odbiciu od powierzchni granicznych.

Nadawanie impulsów fal ultradźwiękowych odbywa się za pomocą głowicy o określonej częstotliwości i wymiarach przetwornika.

Wytworzona przez głowicę fala ultradźwiękowa rozchodzi się w badanym materiale i odbija od wad, nieciągłości, względnie powierzchni ograniczających badanego przedmiotu. Fala ultradźwiękowa po odbiciu powraca do przetwornika w głowicy i pobudza go do drgań. Drgania te zamieniane są na impulsy elektryczne, które po odpowiedniej obróbce w układzie elektronicznym defektoskopu dają nam na ekranie obraz w postaci piku (echa) [1].

Mierząc czas przejścia fali ultradźwiękowej i znając prędkość rozchodzenia się tej fali w danym materiale, można dokonać lokalizacji wykrytych nieciągłości.

Do badania osi kół linowych stosuje się zazwyczaj pojedyncze i podwójne głowice fal podłużnych oraz głowice skośne, kątowe fal poprzecznych, gdzie fala ultradźwiękowa wprowadzana jest w materiał pod odpowiednim kątem. W zależności od struktury badanego materiału (ziarnistości, tłumienia) najczęściej stosuje się głowice o częstotliwościach od 1 MHz do 4 MHz.

Specyficzną odmianą głowicy skośnej jest głowica fal powierzchniowych. W głowicy tej kąt, pod którym zostaje wprowadzona fala ultradźwiękowa, wynosi 90°. Głowice takie szczególnie przydatne są przy badaniu osi kół linowych współpracujących z łożyskami ślizgowymi, pozwalając na wykrywanie pęknięć lub naderwań w strefie odsadzeń, co w praktyce eliminuje

konieczność stosowania badań metodą magnetyczno-proszkową.

6. TRUDNOŚCI I OGRANICZENIA W PROWADZENIU BADAŃ NIENISZCZĄCYCH OSI KÓŁ LINOWYCH

Do oceny stanu technicznego osi kół linowych stosuje się przede wszystkim metodę ultradźwiękową. Badania ultradźwiękowe osi kół linowych w trakcie eksploatacji można wykonywać tylko w ograniczonym zakresie z uwagi na brak dostępu do całej powierzchni badanej osi, która jest w znacznym stopniu zasłonięta przez osadzone na osi koła oraz łożyska, których demontaż jest w warunkach ruchowych zazwyczaj niemożliwy.

Poza ograniczonym dostępem do wielu fragmentów powierzchni zewnętrznej osi dodatkowymi utrudnieniami w badaniu są nierówności powierzchni (zarysowania, korozja) oraz wadliwość wewnętrzna (wytworczy, hutnicza – dotyczy osi wyprodukowanych przed wprowadzeniem norm jakościowych).

Diagnostykę stanu technicznego osi metodą ultradźwiękową zawsze poprzedza się wstępnym i oględzinami obiektu w stanie przygotowanym do badań.

W przypadku osi z łożyskami tocznymi będą to odsłonięte obydwie powierzchnie czołowe osi, a dla osi z łożyskami ślizgowymi dodatkowo odsłonięte powierzchnie ślizgowe czopów łożyskowych po zdjęciu górnych pokryw i półpanewek.

Wobec tego można rozróżnić następujące przypadki prowadzenia badania:

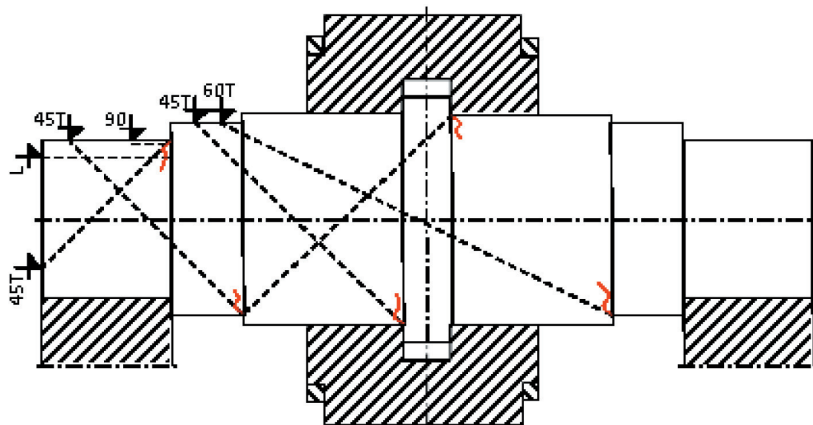
- z obydwu powierzchni czołowych i częściowo z powierzchni bocznej w obszarach czopów łożysk – osie współpracujące z łożyskami ślizgowymi (rys. 2),
- z obydwu powierzchni czołowych przy całkowitym braku dostępu do powierzchni bocznej – osie kół z łożyskami tocznymi.

W przypadku osi z łożyskami ślizgowymi podstawowym badaniem jest kontrola z powierzchni bocznej głowicami fal poprzecznych (T) o kącie załamania 45°, 60° oraz głowicami fal powierzchniowych 90°. Dodatkowo przeprowadza się badanie z obydwu powierzchni czołowych głowicami normalnymi fal podłużnych (L) (rys. 2). W przypadku stwierdzenia ech na ekranie defektoskopu sugerujących występowanie pęknięć w osi wadliwe obszary poddaje się badaniu metodą magnetyczno-proszkową (pod warunkiem, że miejsca ewentualnych pęknięć są widoczne i niezastłonięte elementami konstrukcyjnymi współpracującymi z osią) w celu ostatecznej weryfikacji wskazań.

Badanie osi z łożyskami tocznymi prowadzone jest jedynie z obydwu powierzchni czołowych, w kilku fazach, przy użyciu fal podłużnych i ewentualnie poprzecznych. Początkowo wykonuje się badania głowicami normalnymi o wysokiej energii umożliwiającymi spenetrowanie falami materiału osi na całej długości. W przedniej części osi poszukuje się echa od pęknięć pojawiających się głównie w miejscach zmian przekroju lub pod krawę-

dziami elementów współpracujących (łożyska, piasty kół linowych). W tylnej części osi obserwuje się echa odsadzeń, których obecność ma znaczenie kontrolne.

Następna w razie potrzeby faza to badanie szczegółowe przy zastosowaniu głowic skośnych. Umożliwia to kierowanie wiązki fali ultradźwiękowej w naroże, jakie tworzy hipotetyczne pęknięcie z powierzchnią boczną osi (rys. 2).

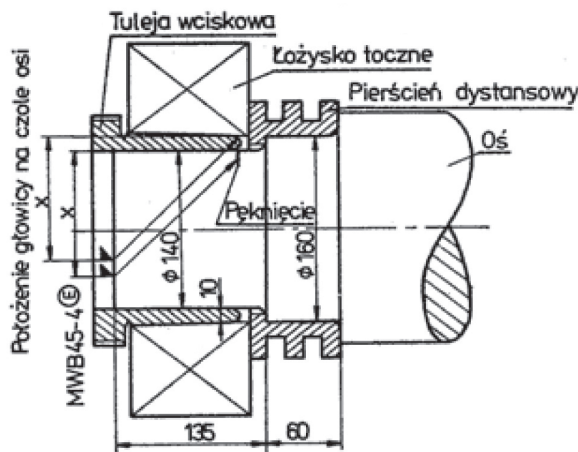


Rys. 2. Badanie ultradźwiękowe osi koła linowego z łożyskami ślizgowymi

W trzecim etapie prowadzone są badania wyjaśniające w celu uniknięcia błędnej interpretacji wyników kontroli. Stosowane są głowice skośne, głównie o kącie załamania 45° .

Jednym z takich przypadków jest rozróżnienie odbić fali ultradźwiękowej pochodzących bądź od krawędzi tulei wciskowej łożyska tocznego, bądź od

pęknięć zmęczeniowych powstających w osi pod tą krawędzią. Wskutek dobrego przylegania tulei do osi oraz wypełnienia szczeliny smarem fale ultradźwiękowe przenikają przez powierzchnię styku między tymi elementami i odbijają się od krawędzi tulei. Miejsce odbicia fal identyfikuje się na podstawie położenia głowicy na powierzchni czołowej osi (rys. 3) [8].



Rys. 3. Rozróżnienie echa krawędzi tulei wciskowej łożyska tocznego od pęknięcia zmęczeniowego osi [8]

Dużym utrudnieniem kontroli ultradźwiękowej osi kół linowych jest znaczne zróżnicowanie ich kształtów i wymiarów (rys. 4 i 5).

Z tego powodu otrzymujemy wiele wskazań pozornych na ekranie defektoskopu. Są to echa:

- związane z układem defektoskop–głowica,
- powstające w wyniku transformacji fal ultradźwiękowych w miejscach odsadzeń, wpustów itp.

W związku z tym jedynie dysponowanie szczegółowymi rysunkami osi i duże doświadczenie kadry badawczej umożliwia prawidłową interpretację wskazań.

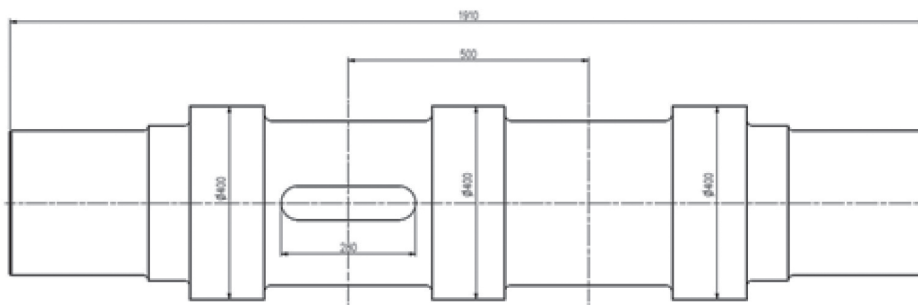
Duże możliwości co do wczesnego wykrycia pęknięć osi kół linowych daje metoda ultradźwiękowa *phased array*. W technice tej stosowane są głowice wieloprzetwornikowe (mozaikowe) sterowane fazowo współpracujące z wielokanałowymi defektoskopami.

Jeżeli podczas badań wykonanych standardowym defektoskopem stwierdzi się podejrzenie występowania pęknięć eksploatacyjnych, uzyskane wyniki można zweryfikować właśnie za pomocą techniki *phased array*.

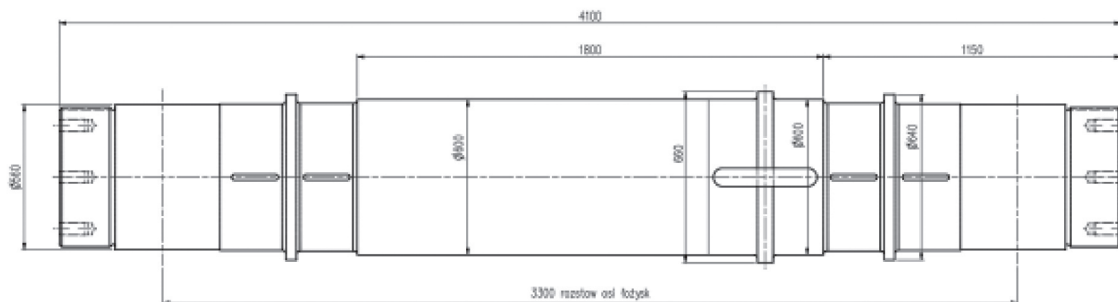
Technika ta w stosunku do metody konwencjonalnej ma przewagę polegającą na tym, że dysponując tylko jedną głowicą, poprzez pobudzenie w odpowiednim czasie poszczególnych przetworników można kształtować wiązkę fali ultradźwiękowej (zmieniać kąty wprowadzenia wiązki oraz ją ogniskować). Dzięki temu można dobrać optymalne kąty wprowadzenia wiązki w stosunku do wykrytej nieciągłości (np. 18°). Podczas badań standardowym defektoskopem musielibyśmy dysponować kilkoma głowicami i wieloma podkładkami kątowymi o różnych nietypowych wartościach kątów.

Zastosowanie techniki *phased array* w przypadku badania osi i wałów:

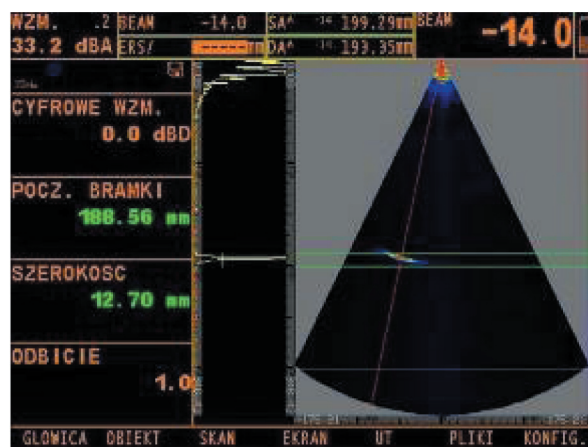
- zwiększa skuteczność badania – umożliwia wykrycie pęknięć eksploatacyjnych w początkowej fazie ich powstawania (skanowanie w pełnym zakresie kątów użytecznych, a nie tylko kilkoma skanami, tak jak ma to miejsce w przypadku zwykłego badania UT),
- umożliwia skrócenie czasu badania – ze względu na mniejszą ilość stosowanych głowic (ustawień defektoskopu),
- ułatwia interpretację wyników (łatwa zmiana kątów wprowadzenia wiązki – można określić, przy jakim kącie mamy największy sygnał od ewentualnego pęknięcia, przedstawienie wskazania np. na S-skanie) (rys. 6).



Rys. 4. Przykład osi kół dwulinowych



Rys. 5. Przykład osi kół czterolinowych



Rys. 6. Zobrazowanie od pęknięcia zmęczeniowego w osi koła jednolinowego uzyskane w technice *phased array* (głowica B2SPA16 – 16-elementowa 2 MHz, $\pm 30^\circ$; maksymalne wskazanie od pęknięcia uzyskano dla kąta wprowadzenia wiązki 14°)

7. WYKRYWANE NIEPRAWIDŁOWOŚCI W OSIACH KÓŁ LINOWYCH

Podczas badań osi kół linowych stwierdza się występowanie wielu nieprawidłowości w stanie technicznym samych osi, węzłów łożyskowych i połączeń piast kół i osi, obniżających trwałość eksploatacyjną osi bądź wręcz wykluczając ich eksploatację.

Metodą ultradźwiękową są wykrywane następujące wady:

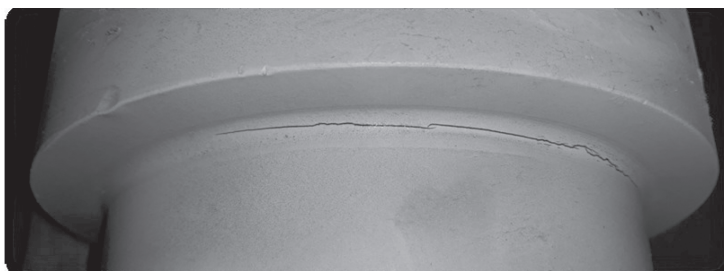
- Pęknięcia zmęczeniowe. Zazwyczaj są one spowodowane nieprawidłowym wykonaniem osi, tzn. zbyt małymi promieniami przejścia pomiędzy kolejnymi odsadzeniami, co przyczynia się do wystąpienia efektu działania karbu w obszarach krytycznych osi, bądź zbyt dużym zestopniowaniem średnic prowadzącym do nadmiernego spiętrzenia naprężeń w tych obszarach. Dotyczy to głównie osi w konstrukcjach dwulinowych (rys. 6 i 7). Czasem inicjatorem pęknięć zmęczeniowych są wżery korozyjne występujące często na styku oś – piasta koła.
- Zbyt duża wadliwość wewnętrzna (tzn. zbyt duża wielkość i nasilenie wad pochodzenia hutniczego) w obszarach niebezpiecznych. Dotyczy to głównie osi starych wyciągów szybowych. Wady te nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla bezpiecznej eksploatacji osi, ale w pewnych sprzyjających okolicznościach (spiętrzenie naprężeń w tych obszarach w wyniku przeciążeń bądź stanów awaryjnych urządzenia wyciągowe) mogą być przyczyną powstawania pęknięć.

Nieprawidłowości stwierdzane podczas badania wizualnego w przypadku osi z łożyskami tocznymi dotyczą raczej samych łożysk i połączenia osi z piastą koła.

Nieprawidłowości dotyczące osi z łożyskami ślizgowymi:

- ostre, głębokie (do ok. 2 mm) obwodowe wgłębienia spowodowane nadmiernym zużyciem panewki dolnej, co skutkuje osiadaniem osi i tarciem jej o obudowę łożyska (rys. 8),
- rysy obwodowe na powierzchni ślizgowej czopów spowodowane dostawaniem się zanieczyszczeń do oleju (rys. 8),
- plamy korozyjne i przytarcia na powierzchni ślizgowej czopów spowodowane nieprawidłowym smarowaniem,
- łagodne, płytkie, obwodowe wytarcia spowodowane uszczelnieniem filcowym korpusów łożysk,
- luźne pierścienie smarujące.

Osie z pęknięciami zmęczeniowymi należy bezwzględnie wymienić na nowe w technicznie możliwie najkrótszym terminie, a do czasu wymiany propagacja pęknięć monitorowana jest badaniami ultradźwiękowymi prowadzonymi w odpowiednio krótkich okresach czasowych. Pozostałe nieprawidłowości wymagają niezwłocznego usunięcia przyczyn ich powstania, a uszkodzenia osi kontrolowane są podczas kolejnych nieniszczących badań okresowych.



Rys. 7. Pęknięcia zmęczeniowe wykryte podczas badania ultradźwiękowego osi koła jednolinowego (na drugim odsadzeniu) – zobrazenie z wykorzystaniem metody magnetyczno-proszkowej (MT)



Rys. 8. Rysy obwodowe na powierzchni czopa łożyskowego osi

8. PODSUMOWANIE

Prawidłowa ocena stanu technicznego osi podczas eksploatacji – pomimo utrudnień i ograniczeń w badaniu osi kół linowych – jest możliwa dzięki odpowiedniemu wyposażeniu badawczemu oraz certyfikowanemu personelowi z wieloletnim doświadczeniem w badaniach ultradźwiękowych.

Wczesne wykrycie pęknięć eksploatacyjnych daje użytkownikowi odpowiedni zapas czasu potrzebny do przygotowania się na wymianę osi przy jednoczesnym zapewnieniu bezpiecznej eksploatacji.

Okresowe badania nieniszczące osi kół linowych z jednej strony zapobiegają powstawaniu stanów awaryjnych, z drugiej zaś przyczyniają się do przedłużenia okresu bezpiecznej eksploatacji kół linowych górniczych wyciągów szybowych.

Literatura

- [1] Pawłowski Z.: *Badania nieniszczące. Metody ultradźwiękowe*. PWN, Warszawa 1976.
- [2] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. z późniejszymi zmianami w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych: Załącznik nr 4. Dz.U. 2017, poz. 1118.*

- [3] *Metodyka postępowania rzeczoznawcy ds. badań nieniszczących materiałów i urządzeń górniczych. Instrukcja nr DM/MRS/40. CBiDGP wyd. VII, 25.09.2019 [praca niepublikowana].*
- [4] *Wykonywanie badań defektoskopowych osi kół linowych i odciśkowych, instrukcja techniczna nr DM/MRS/40-2. CBiDGP wyd. VII, 25.09.2019 [praca niepublikowana].*
- [5] PN-G-46203:1996. *Górnice wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. Wymagania i badania*. 24.10.1996.
- [6] PN-EN 10228-3:2016-07. *Badania nieniszczące odkuwek stalowych. Część 3: Badanie ultradźwiękowe odkuwek ze stali ferrytycznych lub martenzytycznych*. 22.07.2016.
- [7] Antoni J.: *Maszyny górnicze. Część III. Transport kopalniowy*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1980.
- [8] Skorupa A., Jędrzejczak Z., Hyrnik E., Kucowicz E.: *Badania ultradźwiękowe elementów urządzeń wyciągowych*. Zeszyty Naukowe AGH, 1273. Mechanika, 21, Kraków 1989: 51–60.

mgr inż. SŁAWOMIR STRASZAK

mgr inż. ARTUR WIKTOR

Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego

w Łędzinach

Ośrodek Rzeczoznawstwa i Pomiarów

w Mysłowicach

Ośrodek Rzeczoznawstwa

i Dozoru Urządzeń Górniczych

{a.wiktor; s.straszak}@cbidgp.pl

BRONISŁAW BIEL

Innovative hydromechanical cleaning of mine water sedimentation tanks in underground headings

In mines, water from natural inflows as well as process water from fire protection systems is usually stored in sedimentation tanks, located primarily at the lowest level of the mine. Such water usually contains mechanical contaminants, undergoing the process of sedimentation.

The article presents a method enabling the cleaning of mine water sedimentation tanks. The method involves jet mining, hydrotransport and segregation into sediment (i.e. the solid fraction) and water. The consistence of sediment obtained after segregation makes the former transportable (e.g. using an appropriate conveyor/feeder), whereas water can be reused subsequently in the jet mining of sediment. One of the solutions enabling the performance of the above-named process is a ZEKO series system.

Key words: sediment, jet mining, hydrotransport, sedimentation

1. INTRODUCTION

Water entering mines may come from the following sources:

- rock mass surrounding headings,
- open reservoirs located on the surface,
- technological processes.

Water flows into sedimentation tanks (i.e. the so-called drain-ways) usually located in the deepest part of mines, near the main pumping station. The number and the capacity of sedimentation tanks depends on the volume of water involved. Typically, there are two [1] sedimentation tanks in Polish mines, each having an approximate capacity of 2,000 cubic metres. The tanks are primarily used for the storage of water, prior to it being pumped up to the mine surface.

As water is significantly contaminated mechanically (i.e. with sediments having the form of coal, sand or dust particles), its cleaning takes place through sedimentation. The process of sedimentation may take up

to several hours [2]. Depending on the level of water contamination, sedimentation tanks usually take several months to fill up.

The removal of sediment involves its initial “dehumidification”. The process of “dehumidification” involves three stages. First, water must stop filling up a given sedimentation tank and, next, it must be pumped out.

The third stage involves the removal of “dehumidified” sediment (e.g. using spades or loaders) from the sedimentation tank followed by the transport of the former. It should be noted that transport-related solutions may vary depending on a given mine and its specific conditions.

Another method enabling the removal of sediment involves hydromechanical transport requiring the use of sludge pumps. Such a solution is usually based on the use of water from fire protection pipeline systems. Sediment, usually characterised by the high content of coal, is transported to the so-called old workings.

2. ZEKO – A CLASSIFYING AND DEWATERING SYSTEM USED IN MINES

Presented below is a ZEKO system-based method enabling the removal of sediment from sedimentation tanks. The system includes the hydromechanical transport of sediment to a place of its subsequent segregation into solid-state sediment and water. The solution involves the use of water as a sediment carrying medium.

The technology of jet mining (in previously “dried” sedimentation tanks), hydrotransport and the separation of sediment from water [3, 4] is presented in Figure 1.

The process is divided into two major stages, where the first stage involves the application of the ZEKO-S system [5], whereas the second phase is based on the ZEKO-Flok system [6].

The first stage involves the obtainment of transportable sludge from mine water sedimentation tanks and water containing particles having a granularity of approximately 0.2 mm. The stage includes three steps aimed to separate sediment from water.

Step 1 involves the removal of large amounts of water from sludge transported from mine water sedimentation tanks. Sludge is fed using pump P1 to a sieve classifier (SC). In the sieve classifier sludge is subjected to the process of segregation, leading to the obtainment of “dirty” water (containing particles having a granularity of below 2 mm) and thickened sludge. “Dirty” water is then transported to container 1, whereas thickened sludge is transported to a dewatering screen (DS).

Step 2 involves the additional filtering of thickened sludge located on the dewatering screen (DS), enabling the obtainment of transportable sediment. Afterwards, sludge is fed onto an “output” haulage conveyor.

Step 3 involves the further transport of water (using pump P2) to a group of hydrocyclones (HC) enabling the obtainment of sediment having a granularity of less than 0.2 mm. During this phase, thickened sludge is still in the liquid form. Afterwards, sludge is further transported to the dewatering screen (DS), where, along with remaining sediment, it is filtered off again and, finally, moved onto the “output” haulage conveyor.

At the second stage (involving the use of the ZEKO-FLOK system), after being processed by the hydrocyclones (HC), water containing sediment having a granularity of less than 0.2 mm flows into tank no. 2. Next, pump P3 feeds the aforesaid water to step 4 of the process. Water with sludge is then mixed with flocculant and transported to a thickener, where the sludge undergoes thickening and segregation

into “pure” water and “wet” sludge. Afterwards, the sludge is fed into a classifier where the water is removed from sludge so that “wet” sludge can be obtained. Next, this transportable sludge is fed on the “output” haulage conveyor. At this point, cleaned water contains not more than 2% of sludge; sediment granularity being less than 0.2 mm. Water obtained in the above-presented process is reusable (e.g. in jet mining).

In the years 2005–2022, the ZEKO-S/M-based systems were implemented in ten coalmines [7]. The systems were adapted for zones being at risk of methane and coal dust explosions, as well as for zones free from the aforesaid hazards.

3. INNOVATIVE APPLICATION OF THE ZEKO-SUM CLASSIFYING AND DEWATERING SYSTEM

The year 2021 saw the development of an innovative solution enabling the jet mining of sediment/sludge in mine water sedimentation tanks. One of the advantages of such a solution is the possibility of “desludging” (pumping out hydrated sediment) a given tank without the necessity of removing water from it. The aforementioned solution involves the use of a floating system (the so-called SUM) along with necessary jet mining equipment including, among other things, one pump for churning up sediment/sludge and another one for its hydrotransport (performed in the identical manner as that discussed in the previously described technology). The primary difference is that a pipeline used for hydrotransport is laid (along with progressing “desludging”) on the surface of water.

The design of the system makes it usable for cleaning sedimentation tanks during the mine’s regular operations. The system is approximately 5.5 m long, 4 m wide, 1.4 m high and 0.5 deep (in water) [8]. The load carrying capacity of the system enables the simultaneous presence of four persons on its platform.

As progress in “desludging” is accompanied by a growing distance between the floating platform and the connection of the hydrotransport pipeline, it is necessary for operating personnel to move to/from the SUM. To address this need, the system has been provided with an extendable walkway (floating on the surface of water). An alternative solution could involve the use of a boat. In both cases, personnel movements must be consistent with related HSE regulations. The technology of jet mining and hydrotransport based on the SUM floating system as well as the separation of sediment from water are presented in Figure 2.

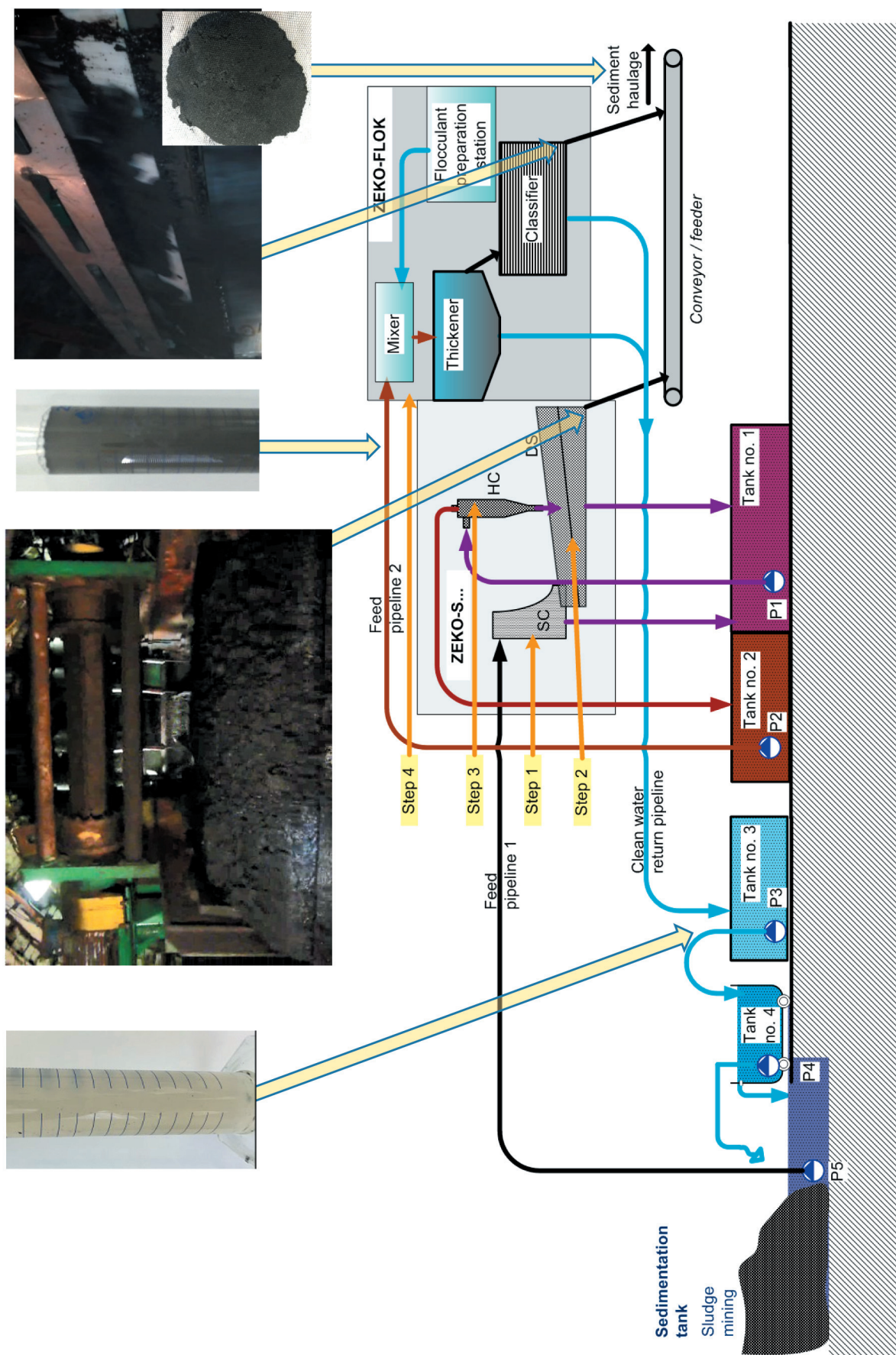


Fig. 1. Schematic diagram presenting the technological process of cleaning the sedimentation tank:
P1–P5 – sludge pumps, SC – sieve classifier, HC – hydrocyclone

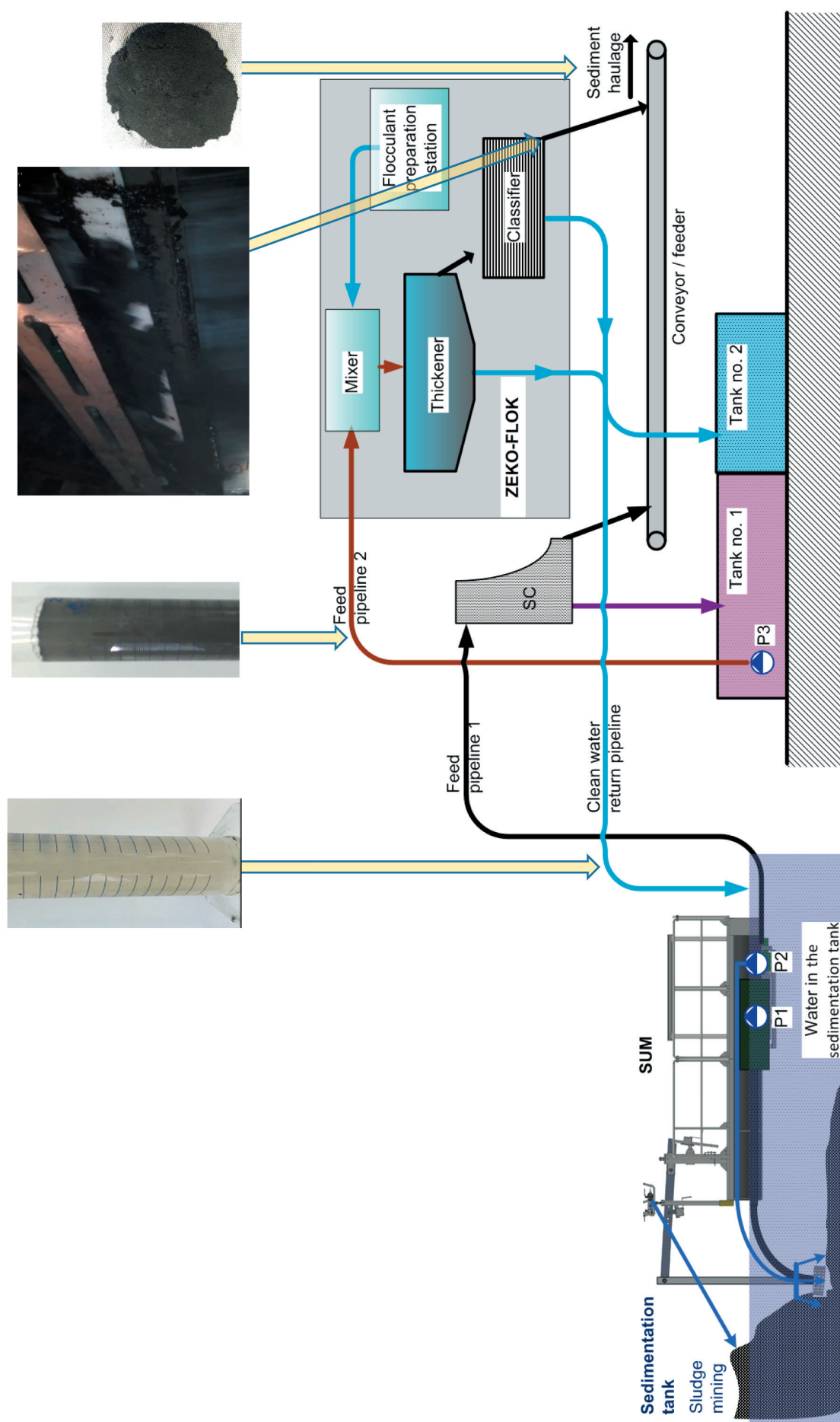


Fig. 2. Schematic diagram presenting the technological process of cleaning the sedimentation tank from the surface of water: P1-P3 – sludge pumps, SC – sieve classifier

The SUM and ZEKO systems can also be applied to clean mine water sedimentation tanks located on the earth's surface. Tests involving such an operation were successfully performed in the Ruda Ruch Halimba coalmine in 2021.

4. CONCLUDING REMARKS AND PROSPECTS

1. In many respects, the ZEKO system-based jet mining and hydrotransport of sediment/sludge from sedimentation tanks is, safer, more efficient and less costly than offered by other methods.
2. The ZEKO system should be located in the vicinity of sedimentation tanks and transport equipment (conveyors, cars, etc.). The hydrotransport of sludge between a sedimentation tank/drain-way and the ZEKO system should be performed using appropriate pipelines (e.g. DN 100).
3. In cases of problems with the drainage of sedimentation tanks/drain-ways, it is possible to remove sediment/sludge using the SUM system.
4. The system also makes it possible to clean mine water sedimentation tanks located on the earth's surface.

5. Jet mining, hydrotransport and the separation of sediment from water shortens and facilitates the cleaning of sedimentation tanks and, consequently, increases their actual capacity.

References

- [1] Norma branżowa BN-78j 0444-03: *Główne odwadnianie kopalń głębinowych. Zasady projektowania*.
- [2] Piecuch T.: *Technika wodno-mułowa. Urządzenia i procesy*. WNT, Warszawa 2010.
- [3] Patent no. 235141: *Sposób i układ oczyszczania zbiorników wodnych, zwłaszcza podziemnych wyrobisk górniczych*.
- [4] Patent application no. 429867: *Sposób i układ oczyszczania zbiorników wodnych, zwłaszcza podziemnych wyrobisk górniczych*.
- [5] Specification sheet: *Zestaw klasyfikacyjno-odwadniający ZEKO-S40*.
- [6] Specification sheet: *Zestaw klasyfikacyjno-odwadniający ZEKO-Flok*.
- [7] Biel B.: *Hydromechaniczne oczyszczanie osadników dołowych*. XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna TEMAG 2018. XV Międzynarodowe Warsztaty Techniczne [unpublished].
- [8] Specification sheet: *Szlamujące urządzenie mobilne SUM*.

BRONISŁAW BIEL, Ph.D., Eng.
ELPRO-7 Sp. z o.o.
ul. Ziemska 1, 41-800 Zabrze, Poland
b.biel@elpro7.pl

BRONISŁAW BIEL

Innowacyjne rozwiązanie hydromechanicznego czyszczenia osadników wód dołowych w podziemnych wyrobiskach górniczych

W kopalniach podziemnych woda pochodząca z naturalnych dopływów oraz woda technologiczna pochodząca głównie z sieci rurociągów przeciwpożarowych gromadzona jest w osadnikach znajdujących się najczęściej na najniższym poziomie kopalni. Zwykle jest to woda zanieczyszczona mechanicznie. Gromadzenie się osadu odbywa się na zasadzie sedymentacji.

W artykule przedstawiono metodę oczyszczania osadników wód kopalnianych opartą na zasadzie hydrouwabiania i hydrotransportu oraz sposób segregacji na część stałą, czyli osad, i wodę. Konsystencja otrzymanego osadu pozwala na jego transport, np. za pomocą przenośnika, a woda może być ponownie wykorzystana w procesie hydrouwabiania osadu. Do tego celu stosuje się urządzenia z serii ZEKO.

Słowa kluczowe: osad, hydrouwabianie, hydrotransport, sedymentacja

1. WPROWADZENIE

Wody dopływające do kopalni mogą pochodzić z następujących źródeł:

- z górotworu otaczającego wyrobiska górnicze,
- z otwartych zbiorników powierzchniowych,
- z procesów technologicznych.

Woda ta trafia do osadników wodnych, tzw. chodników wodnych, znajdujących przeważnie w najniższej części kopalni w pobliżu pompowni głównego odwadniania. Pojemność i liczba osadników zależy od ilości wody. Jednakże minimalna liczba osadników to dwa [1]. Biorąc pod uwagę istniejące kopalnie w Polsce, można przyjąć, że pojemność dla każdego osadnika wynosi około 2 tys. m³. Osadniki te przeznaczone są do gromadzenia ww. wody, która następnie wypompowywana jest na powierzchnię.

Ponieważ woda ta jest mocno zanieczyszczona mechanicznie, tj. osadami w postaci drobin węgla, piasku

i pyłu, to jej oczyszczanie następuje w wyniku sedymentacji (osadzania). Czas sedymentacji trwa nawet do kilku godzin [2]. W zależności od stopnia zanieczyszczenia wody czas wypełnienia osadnika trwa zwykle kilka miesięcy.

Sposób pozbycia się osadu polega w pierwszej kolejności na jego wstępnym osuszeniu, tj. zaprzestaniu gromadzenia się wody, i sukcesywnym jej odpompowywaniu podczas osuszania.

W kolejnym etapie następuje wydobywanie osuszonego osadu, np. za pomocą łopat, ładowarek, a następnie jego transport. Osad ten jest przekazywany dalej wg rozwiązań danej kopalni.

Inny sposób pozbywania się osadu odbywa się na zasadzie hydromechanicznego transportu przy użyciu pomp szlamowych. Do tego celu wykorzystuje się najczęściej wodę pochodzącą z rurociągów sieci przeciwpożarowej. Taki osad zawierający w większości przypadków dużą zawartość np. węgla transportowany jest do tzw. starych zrobów.

2. ZESTAW

KLASYFIKACYJNO-ODWADNIAJĄCY ZEKO STOSOWANY W KOPALNIACH

Poniżej przedstawiono sposób pozbywania się/usuwania osadów z ww. osadników (z użyciem zestawu ZEKO), który następuje poprzez hydromechaniczny transport do miejsca jego segregacji na część stałą (osad) i wodę. Woda w tym procesie jest środkiem transportu osadu.

Technologia hydrourabiania (w osadnikach wcześniej „osuszonych”) i hydrotransportu oraz separacji osadu od wody [3, 4] została przedstawiona na rysunku 1.

Proces ten odbywa się w dwóch etapach. Pierwszy etap dotyczy zestawu ZEKO-S [5], a drugi ZEKO-FLOK [6].

W pierwszym etapie z podawanego szlamu z osadników wód kopalnianych uzyskuje się osad transportowalny (np. za pomocą przenośnika) i wodę zanieczyszczoną osadem o ziarnie około 0,2 mm. W etapie tym można wyróżnić trzy stopnie procesu separacji wody i osadu.

W pierwszym stopniu następuje pozbycie się dużej zawartości wody z transportowanego szlamu z osadników wód kopalnianych. Szlam ten podawany jest pompą P1 i następnie dostaje się do klasyfikatora sitowego KS. Tutaj jest on rozdzielany na wodę brudną zawierającą ziarno poniżej 2 mm i na zagęszczony osad. Woda brudna dostaje się do zbiornika 1, a zagęszczony osad do przesiewacza odwadniającego PO.

W drugim stopniu zagęszczony osad znajdujący się na PO zostaje dodatkowo odsączony (gotowy do transportu), a następnie dostaje się na przenośnik odstawy urobku.

W trzecim stopniu woda pochodząca z poprzednich stopni za pomocą pompy P2 podawana jest na zespół hydrocyklonów HC, gdzie następuje uzyskanie osadu o ziarnie poniżej 0,2 mm. Jest to jednak osad zagęszczony w postaci płynnej. Osad ten przekazywany jest na przesiewacz PO, gdzie wspólnie z pozostałym osadem zostaje odsączony i dalej podawany jest na przenośnik odstawy urobku.

W drugim etapie (ZEKO-FLOK) woda z osadem o ziarnie poniżej 0,2 mm pochodząca z hydrocyklonów HC dostaje się do zbiornika 2. Stąd za pomocą pompy P3 podawana jest ona na czwarty stopień układu. Dostająca się woda z osadem zostaje zmieszana w flokulantem, a następnie podawana jest ona do zagęszczacza. Tutaj następuje zagęszczenie osadu i jego separacja na wodę czystą i mokry osad. Osad ten podawany jest na klasyfikator, który ostatecznie odsąca

wodę z mokrego osadu. Następnie jako gotowy osad w postaci transportowalnej podawany jest do odstawy urobku. Natomiast woda oczyszczona (zawierająca osad o wielkości ziarna poniżej 0,2 mm) nie zawiera w sobie więcej niż 2% osadu. Woda ta może być ponownie wykorzystana, np. w procesie hydrourabiania.

Układy z zestawem ZEKO-S/M wdrożono w latach 2005–2022 w dziesięciu kopalniach węgla kamiennego [7]. Zostały one wykonane dla stref zagrożonych i niezagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego.

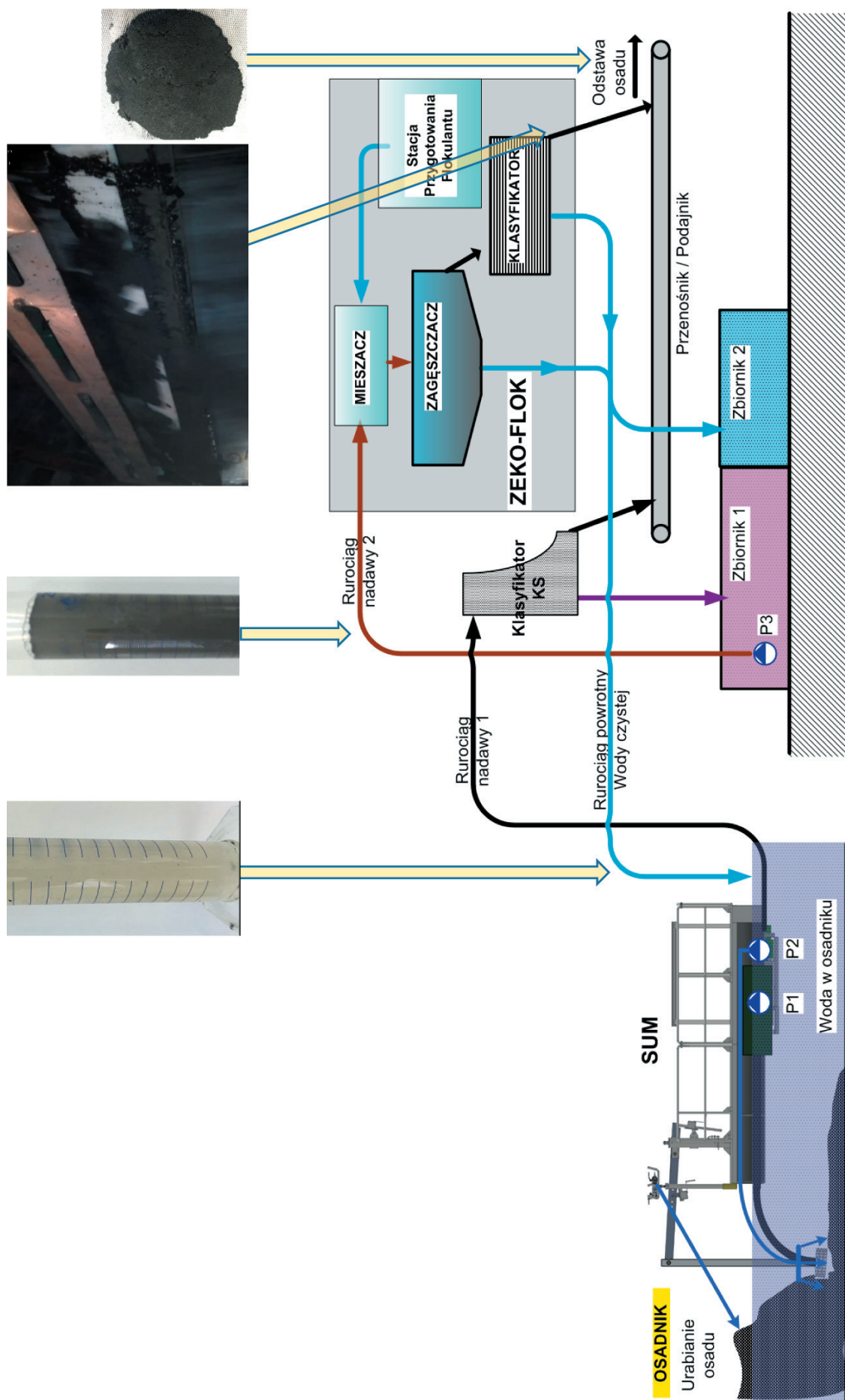
3. INNOWACYJNE ZASTOSOWANIE ZESTAWU

KLASYFIKACYJNO-ODWADNIAJĄCEGO ZEKO-SUM

W 2021 roku opracowano innowacyjne rozwiązanie dotyczące sposobu hydrourabiania osadu/szlamu w zawodnionych osadnikach wód kopalnianych. Zalecą tego rozwiązania jest to, że można „szlamować” (zasysać rozwodniony osad przy użyciu pompy) dany osadnik bez konieczności opróżniania go z wody. Do tego celu zbudowano zestaw pływający SUM wraz z zabudowanymi urządzeniami niezbędnymi do hydrourabiania. Są to m.in. pompy, gdzie jedna z nich służy do wzburzenia osadu/mułu, a druga do hydrotransportu. Hydrotransport odbywa się w analogiczny sposób jak w poprzedniej technologii. Jednak różnica polega głównie na tym, że rurociąg służący do hydrotransportu jest układany (w miarę postępu „szlamowania”) na powierzchni lustra wody.

Budowa urządzenia została dostosowana do czyszczenia osadników wodnych w warunkach ruchu zakładu górniczego. Jego całkowite gabaryty to: ok. 5,5 m długości, ok. 4 m szerokości i 1,4 m wysokości, a jego zanurzenie nie przekracza 0,5 m [8]. Na platformie urządzenia swobodnie mogą przebywać cztery osoby.

W miarę postępu szlamowania wzrasta jego odległość od miejsca podłączenia rurociągu hydrotransportowego. Zatem konieczne staje się przemieszczanie załogi do zestawu SUM i z powrotem. Jest to możliwe z użyciem podestu nawodnego, który w miarę postępu szlamowania zostaje wydłużony. Alternatywnym środkiem transportu może być również łódka. Przemieszczanie się załogi w obu przypadkach odbywa się na zasadach zgodnych z przepisami BHP. Technologia hydrourabiania i hydrotransportu z wykorzystaniem urządzenia pływającego SUM, a następnie separacji osadu od wody, została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat technologiczny oczyszczania osadnika z powierzchni lustra wody: P1-P3 – pompa szlamowa, KS – klasyfikator siłowy

Zestaw SUM wraz z zestawem ZEKO może być również wykorzystywany w procesie oczyszczania powierzchniowych osadników wód dołowych. Takie próby z wynikiem pozytywnym zostały przeprowadzone w 2021 roku w kopalni KWK Ruda Ruch Halemba.

4. WNIOSKI I PERSPEKTYWY

1. Metoda hydrourabiania i hydrotransportu osadu/szlamu z osadników wodnych z wykorzystaniem układu ZEKO jest pod wieloma względami bezpieczniejsza, bardziej wydajna i mniej kosztowna niż oferowana w innych metodach.
2. W zależności od warunków związanych z lokalizacją osadników i dostępem środków transportowych (przenośniki, wozy itp.) zestaw ZEKO powinien być budowany w ich pobliżu. Natomiast hydrotransport szlamu pomiędzy osadnikiem/chodnikiem wodnym a ZEKO powinien odbywać się z wykorzystaniem rurociągów, np. DN 100.
3. W przypadku trudności z osuszaniem osadników/chodników wodnych, istnieje możliwość wydobywania osadu/szlamu z zastosowaniem zestawu SUM.
4. Istnieje możliwość oczyszczania osadników wód dołowych zlokalizowanych na powierzchni zakładów.

5. Hydrourabianie i hydrotransport wraz z układem separacji osadu od wody znacznie skraca i ułatwia proces czyszczenia osadników wodnych, a co za tym idzie zwiększa realną pojemność osadników wodnych.

Literatura

- [1] BN-78/0444-03: *Główne odwadnianie kopalń głębinowych. Zasady projektowania*. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa 1978.
- [2] Piecuch T.: *Technika wodno-mułowa. Urządzenia i procesy*. WNT, Warszawa 2010.
- [3] Patent nr 235141: *Sposób i układ oczyszczania zbiorników wodnych, zwłaszcza podziemnych wyrobisk górniczych*.
- [4] Zgłoszenie wynalazku nr 429867: *Sposób i układ oczyszczania zbiorników wodnych, zwłaszcza podziemnych wyrobisk górniczych*.
- [5] Karta katalogowa: *Zestaw klasyfikacyjno-odwadniający ZEKO-S40*.
- [6] Karta katalogowa: *Zestaw klasyfikacyjno-odwadniający ZEKO-Flok*.
- [7] Biel B.: *Hydromechaniczne oczyszczanie osadników dołowych*. XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna TEMAG 2018. XV Międzynarodowe Warsztaty Techniczne [niepublikowane].
- [8] Karta katalogowa: *Szlamujące urządzenie mobilne SUM*.

dr inż. BRONISŁAW BIEL
ELPRO-7 Sp. z o.o.
ul. Ziemska 1, 41-800 Zabrze
b.biel@elpro7.pl

PAWEŁ MADEJSKI
SŁAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJAŁ

Selected aspects of coal gasification for application in low-emission energy technologies

Solid fuel electricity generation has been known and used for many years. The combustion of solid fuels is a complex process that requires proper preparation of the fuel, carrying out the combustion process, as well as the removal of harmful substances in the form of dust and gaseous pollutants (NO_x, SO_x, CO) from exhaust gases emitted into the environment. For decades, the gaseous form has been considered the noblest form of fuel. Gaseous fuels can be easily transported over long distances, are immediately ready for combustion and the composition of the fuel mixture can be freely adjusted. The constant pursuit to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions require the use of low-emission and zero-emission energy generation technologies. In the case of coal, this will mean a shift from direct combustion to more advanced systems powered by gaseous fuel. The paper presents an overview of the available techniques and technologies of solid fuel gasification aimed at the production of gaseous fuels, which can be used in low-emission energy technologies. The computational methods of the gasification process are also presented, which allow the selection of the best technology and operating parameters of individual reactors.

Key words: gasification, gas fuel, syngas, gas technology

1. INTRODUCTION

The process of fossil-derived solid fuels gasification significantly increases their applicability while reducing their negative environmental impact [1]. Produced by thermal decomposition, in a small quantity of air/oxygen or water vapor, the basic product of gasification, called syngas (synthetic gas), can be used both for heat generation in the energy sector and for the production of synthetic hydrocarbons in the petroleum and chemical sector [2]. Such a wide range of applications is, on the one hand, an opportunity for the development of this technology and, on the other, a risk that the products obtained will not be used

where the benefits of their use will be the greatest. Given the current problems of ensuring clean air in many regions of the world, and the need to reduce greenhouse gas emissions [3], the use of syngas in energy technologies seems appropriate (Fig. 1). The combustion of solid fuels causes relatively greater emissions than the combustion of gaseous fuels (emission of both solid and gaseous pollutants), especially in the case of low-power boilers that are not equipped with flue gas cleaning systems, and where the combustion process conditions are often significantly different from optimal [4]. There are many indications that the greater use of syngas can be expected in the chemical industry in the future [5].

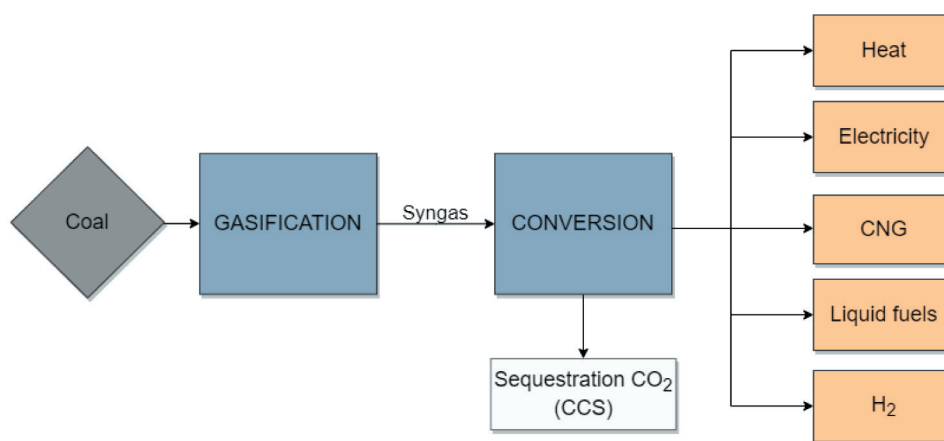


Fig. 1. Syngas as universal energy resource

2. GASIFICATION TECHNOLOGIES – SOLUTION OVERVIEW

Solid fuel gasification technologies are categorized according to the design solutions of the system used for the gasification process (including the reactor itself) and the process parameters: temperature, properties of the feedstock, gasifying agent and its concentration, pressure. The achievable process parameters are determined by the choice of the gasification system.

The gasification systems are distinguished by the method of heat supply to the process (with direct heating – autothermal, with indirect heating – allothermal) and the movement of the reactants in the reactor. The basic types include moving bed gasifiers (downdraft and updraft), fluidized bed gasifiers (bubbling fluidized-bed or circulating fluidized-bed), and entrained-flow gasifiers. Moving bed gasifiers are referred to in the literature and hereinafter interchangeably as fixed bed reactors. Diagrams of most common gasifier types are shown in Figure 2.

The type of reactor determines the temperature range in which the gasification process is carried out and affects the temperature profile along the length of the reactor. An increase in temperature usually increases the proportion of hydrogen and carbon monoxide in the produced syngas, while an increase in pressure increases the proportion of methane [6]. The main differences between reactor types are presented in Table 1.

In commercial applications, reactors of various designs are used, operating with different sets of the process parameters – at present it is difficult to define the optimal variant, although development trends can already be indicated. Updraft reactors are suitable for raw materials where moisture accounts for up to

50 wt%. Feedstock with a high inert content, such as coal dust, sewage sludge or municipal waste, which are not suitable for fixed bed reactors, have been successfully gasified in bubbling fluidized bed reactors. Wood biomass is not suitable for entrained-flow reactors, unless it is pretreated in torrefaction and grinding processes [7]. In practice, bio-coal suspensions with bio-oil are used, as well as wood or bio-coal dispersed/dissolved in glycerol, ethylene glycol, phenolic oil or bioliquids [8]. Fixed bed reactors are currently being used less and less. Fluidized bed reactors, despite many advantages, have gained relatively little commercial interest. Currently, the most commonly developed and used reactors are entrained-flow ones [9].

2.1. Coal

Coal gasification technologies have been in operation since the beginning of the 19th century. The popularity of this raw material as a gasification feedstock is high due to the stability of supplies, relatively stable quality parameters and low price. Coal is commercially gasified in fixed bed gasifiers (Lurgi [10] and British Gas Lurgi [11, 12]), fluidized bed gasifiers (Great Point Energy [13], Winkler [14], TRIG [15]) and entrained-flow gasifiers (GE Energy [16], Texo, Koppers-Tozek, Shell [1]).

In the past, the synthesis gas obtained from coal was used for various purposes. During World War II, processing into transport fuels in the Fischer-Tropsch synthesis process predominated [17], while in the last 60 to 70 years a significant amount of it was converted into hydrogen for the production of ammonia [18]. In the last 25 years it has been intensively used in commercial power plants with the use of technologies based on an integrated gasification combined cycle (IGCC) [19].

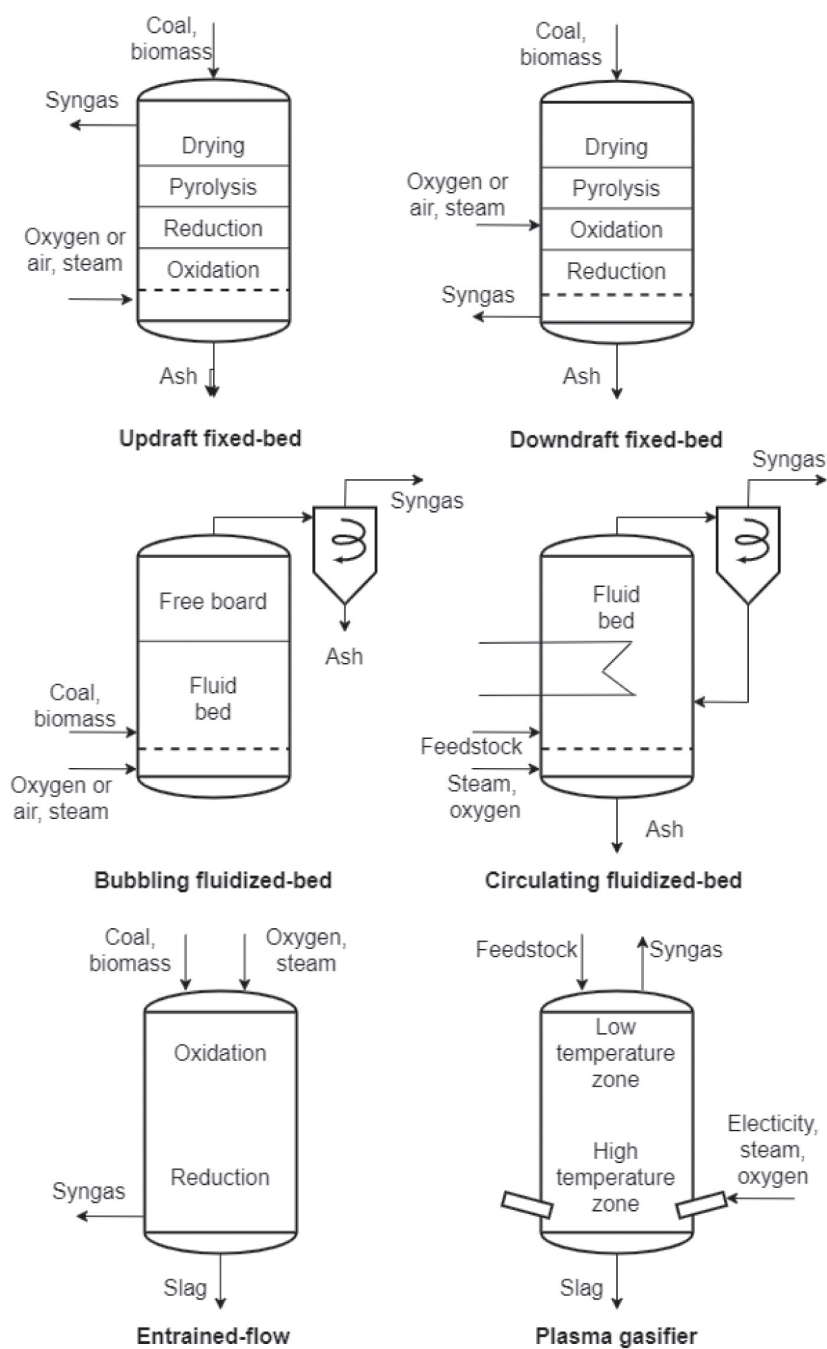


Fig. 2. General scheme of synthesis gas reactors (based on [3, 9, 10])

Table 1
Comparison of the primary types of gasification reactors [6]

Property	Fixed-bed	Fluidized-bed	Entrained-flow
Particle size [mm]	<51	<6	<0,15
Gas outlet temperature [°C]	450–600	800–1000	>1260
Temperature in the reaction zone [°C]	1090	800–1000	1990
Demand for an oxidizing agent	low	moderate	high
Characteristics of ash	dry	dry	slag
Scale	small	medium	large
Operational problems	tars blocking equipment and pipelines	low carbon conversion	material problems due to high temp.
Installed power [GW]	18.7 (42%)	0.9 (2%)	25.4 (56%)

2.2. Cogasification with biomass

The level of greenhouse gas emissions has become one of the benchmarks for the application of technological solutions in both environmental and economic terms. For this reason, mainly those gasification technologies that allow the use of biomass or waste not suitable for further processing are being developed. As a rule, the gasification process of such materials is analogous to that of coal, but the differences in their structure and heterogeneity constitute a major technical challenge. This means that the design of the reactors must be modified [20], to increase their flexibility in working with particles of greater differentiation in size and shape, moisture, calorific value and content of the elements: carbon, hydrogen, oxygen, sulfur and nitrogen, as well as ash and trace elements (which, however, can significantly affect the course of the process and the quality of the products received) [21]. Taking into account the features of individual types of reactors, a fluidized bed reactor is often used for gasification of biomass (HoSt [22], ANDRITZ AG [23], Valmet Corporation [24], Eqttec [25]), but also in this case other reactors can be used: fixed bed (Shangqiu Haiqi Machinery Equipment [26], Chanderpur Works [27], Infinite Energy [28]), entrained-flow (Siemens AG [29]). Despite many technical and logistical problems [30], which often ended with the cessation of operation of biomass gasification plants, there is still considerable interest in these technologies [12]. It is related to the higher exergy efficiency of gasification compared to the combustion process [31].

The reduction in the number of operational problems typical for biomass gasification can be achieved by co-gasification with coal [32]. Adapting the technology to gasification of these fuels in different mass proportions greatly facilitates the management of the continuity of energy production. In cogasification, the efficiency of the process is also improved by ensuring a sufficiently high calorific value of the feed.

3. CHEMICAL MECHANISM OF THE GASIFICATION PROCESS

From a chemical point of view, a number of redox reactions occur during the gasification process. Depending on the process temperature, carbon in the form of either pre-decomposed organic compounds

or in the form of radicals is oxidized by the so-called gasifying agent. Oxygen, hydrogen, water vapor, or even carbon dioxide may be the gasifying agent. Depending on the gasification agent used, chemical reactions during gasification can be as follows:

- Gasification with oxygen:



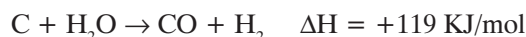
Oxygen as a gasifying agent may be in the form of air, but due to the formation of nitrogen oxides at high temperatures, it is better to use pure oxygen for gasification. The reaction is exothermic and with volume increases, so the shifting of the equilibrium toward the products is achieved by cooling and reducing the pressure, i.e. taking away heat and removing the CO produced.

- Gasification with hydrogen:



Here, the reaction is also exothermic, but proceeds with a reduction in volume, so to speed up the process, heat should be taken and pressure increased.

- Gasification with steam:



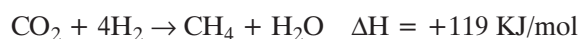
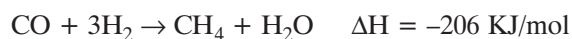
The reaction is endothermic and is proceeding with an increase in volume.

- Gasification with carbon dioxide:



The reaction is also endothermic and is proceeding with an increase in volume.

Apart from the reaction of coal with the gasifying agents in the gasification process, there are a number of reactions of gasification products. Here are some:



In the real gasification process, not one reaction takes place, but several at once, therefore controlling these processes requires a lot of effort. It is performed by controlling the pressure (delivering or receiving reagents) and controlling the temperature.

Moreover, when the process is carried out at very high temperatures, reagents in the radical form can

participate in the reactions, in which take place the degradation of O_2 to radical oxygen O^* , degradation of water molecules into O^* radical, and hydrogen molecule or directly into hydrogen radicals $2H^*$. These radicals are very reactive and easily react with carbon as well as other compounds present in the gasifying mixture.

The use of carbon dioxide as a gasifying agent can be a very attractive method of its management – the product of such a process is carbon monoxide (CO), which is an energy carrier. The most promising gasification option is the use of steam as a gassing agent – the product is not only combustible carbon monoxide, but also gaseous hydrogen, which after separation is the desired energy carrier. It is gaining more and more popularity due to the possibility of its use in conventional combustion engines, gas turbines and fuel cells.

4. CALCULATION METHODS FOR THE GASIFICATION PROCESS

The accuracy of the results of the modeling gasification processes depends on the assessment of technical, economic, and ecological efficiency, which is the basis for deciding on the legitimacy of the project that may increase the efficiency of using solid fuels. As a result of modeling, process parameters are determined: the amount of individual media and the resulting gas composition [33]. Modeling also allows to examine the influence of the composition of the feedstock, the type of gasifying agent, and the parameters of the gasification process on the obtained results [31]. The gasification process calculations are laborious. Therefore, they are performed almost exclusively in software. Their further development in terms of the accuracy of results is supported by the so-called machine learning and the use of neural networks [34].

4.1. Engineering methods

Conversion of solid fuel in the gasification process can be modeled using the equilibrium approach alone, using only the kinetic approach, and also using these two approaches simultaneously [35]. The use of engineering computational methods is associated with making many assumptions, depending on the selected method. These are the assumptions related to

the temperature distribution in the reactor, heat exchange with the environment, the individual reactions rate. These methods usually don't take into account the formation of tars, replace coal fuel with pure carbon (graphite) and ignore the impact of the ash present in the raw material on the process. Nevertheless, practice has shown that the use of these methods leads to an approximation sufficient for engineering purposes [33].

Equilibrium models are among the oldest, most well documented and frequently used. The results obtained from these models are characterized by high compliance, especially in the analyzes of gasification at high temperatures ($>850^\circ C$). Wang et al. showed that they are very useful, especially in the modeling of IGCC installations [36]. In one of the modeled cases, they obtained the consistency of the syngas composition modeling results with the experiment results at the level above 99% (relative error below 1%). Based on this model, they demonstrated how to maximize Cold Gas Efficiency (CGE) by optimizing the gasification temperature, oxygen supply and steam supply. The achieved improvement of CGE was 10% [37].

Kinetic models provide more information on the gasification mechanisms useful for process design and development but require more computational effort and are partly based on complex empirical kinetic equations [3]. Nowadays, a convenient method of modeling is the use of Aspen Plus software [38–41], in which there is no need to determine many chemical reactions occurring during gasification, but a process flow diagram should be created, and chemical compounds that may be present in the process, as well as the conditions of the process (flow, temperature, pressure), should be defined.

4.2. CFD modeling of the solid fuel conversion process

Many multidirectional changes between the substrates and the gasifying agent occur in the gasifier, which may also be affected by gasification products. The final effect of the process is significantly influenced, apart from the process parameters, by the shape and dimensions of the reactor, which determine the time and conditions in which the reactants stay. For this reason, the engineering methods that have proven successful in balancing the mass and energy of the gasification process are not sufficient to

improve the design of reactors and minimize the emission of undesirable compounds [42]. The significant progress made in recent years in the field of numerical modeling techniques and the efficiency of computing machines allows for the modeling of the behavior of raw materials and products in the 3D model of the reactor [43, 44]. The model can take into account the fluid dynamics, the size and structure of the raw material particles, the kinetics of chemical reactions, mass and energy exchange between the solid and gas phases [45]. Modeling methods are further developed to reduce calculation time while maintaining or improving the consistency of results. For example, Mularski and Modlinski have demonstrated the significant impact of the adopted kinetic parameters on the composition of the producer gas and proposed a new procedure for optimizing input data [46]. The result of CFD modeling is, *inter alia*, distribution of velocity, temperature, unreacted raw material and gasification products.

5. STRATEGIES FOR COAL GASIFICATION

The energy sector is a key element of the economy, as its competitiveness largely depends on it. For this reason, it is present in the policies and strategies of countries around the world, and these, in turn, largely determine the feasibility and cost-effectiveness of projects in specific technologies. As an opportunity to convert raw materials into useful products (including fuels and energy), gasification is included in the strategies of all developed countries. Selected information, which presents a political attitude and reflects the state of knowledge, is presented in the following subsections.

5.1. European Union

The European Green Deal, together with Fit for 55, aims at the reduction of at least 55% of the European Union's greenhouse gas emissions by 2030 compared to 1990. Increased use of hydrogen is meant to help achieve this goal. The EU strategy for the development of hydrogen production advocates obtaining hydrogen from fossil fuels with carbon dioxide capture. According to EU estimates, in order for it to be able to compete with hydrogen from fossil fuels with-

out CCS, carbon-emission prices between 55 and 90 Euro per ton of carbon dioxide equivalent (CO_{2e}) would be necessary. This level was already reached in mid-2021, and at the time of writing this paper, the price was above its upper limit.

5.2. Poland

The government document "Energy policy of Poland until 2040" states that the global effects of research and development activities (R&D) indicate the existence of a potential for low-emission or zero-emission use of coal. In practice, this is to allow for partial further use of coal generating units. For this reason, the policy recommends searching, testing and implementing new methods of coal use and processing, *i.e.* gasification, oxy-combustion and other clean coal technologies.

At present, LW Bogdanka is discussing the cost-effectiveness of IGCC using Mitsubishi Hitachi Power Systems technology with a capacity of 500 Mwe [47].

5.3. United States of America

The Fossil Fuels Office of the US Department of Energy (DOE) supports the development of modular gasification technologies of various types and qualities of coal, as well as blends of coal with biomass and other waste, aimed at the production of clean syngas suitable for the production of electricity, chemicals, hydrogen, transport fuels and other products depending on the needs of the internal market. In 2021, the DOE selected four projects for which it awarded \$2 million in research and development (R&D) support to refine the technology for the gasification of coal-biomass mixtures and plastic waste. According to assumptions, these technologies are designed to produce hydrogen while ensuring a negative carbon balance.

5.4. Japan

In the strategy of the Japanese Agency for Natural Resources and Energy of July 2018 (The 5th Strategic Energy Plan) it was stated, *inter alia*, that in order to further reduce greenhouse gas emissions, the development and practical applications of a new genera-

tion of highly efficient coal-based energy production technologies will be promoted, such as the integrated coal gasification combined cycle (IGCC) and the integrated coal gasification fuel cell combined cycle (IGFC). As a result, the world's largest 525 MWe IGCC installation was launched in Iwaki in 2021, with 48% efficiency.

5.5. Australia

Australia, rich in coal seams, in the published strategy „First Low Emissions Technology Statement – 2020” indicates coal gasification combined with carbon dioxide sequestration as one of the cheapest methods of producing pure hydrogen in the short-term perspective. For this reason, the Australian government is expected to allocate \$50 million to research and development (R&D) projects aimed at achieving commercialization.

6. CONCLUSIONS

The discussion on the purposefulness and efficiency of coal gasification in the era of decarbonization, pursuing for climate neutrality and implementing new and more stringent EU regulations in the field of climate protection is of great importance. However, it requires the development and implementation of advanced and dedicated technologies that follow these regulations, ensuring highly efficient production of fuels for low-emission energy generation.

Coal has tremendous potential for other energy-chemical applications, the basis of which will be the processes of its conversion: gasification or hydrogenation. The scientific community is facing a number of challenges, the realization of which will create the possibility of developing effective, climate-friendly technologies of the 21st century for the generation of energy and raw materials from coal deposits. There are many arguments in favor of coal gasification, including:

- improving the efficiency of low-emission electricity generation from hard coal, aiming at high-efficiency zero-emission coal-fired units integrated with the capture of CO₂ from the flue gas,
- increasing the raw material independence for the petrochemical industry,
- facilitating the process of biomass gasification (co-gasification).

The review of solid fuel gasification technologies has shown that there are advanced technologies available that can be applied to many raw materials. The type of reactor has a significant influence on the physicochemical properties of the obtained products, apart from the parameters of the raw materials. It determines the feasible process conditions and the way in which the raw material should be prepared. The selection of an appropriate solution strongly depends on the intended method of further use of the products and the possibility of waste management (including waste heat). Proper correlation of the gasification technology with the technology of energy use of its products is necessary from the point of view of maximizing the total energy efficiency and contributes to the reduction of the emission of greenhouse gases and pollutants: tars, dust, ammonia, hydrogen sulfide, hydrogen chloride, etc. [48]. For this purpose, available modeling methods can be used, which have repeatedly shown a high correlation with the experimental results. Optimization of the design of the selected gasification reactor is possible thanks to the numerical modeling methods, which are being constantly developed, but already enable the achievement of reliable (verified and validated) results with the use of CFD (Computational Fluid Dynamics).

Acknowledgments

The research leading to these results has received partial funding from the Norway Grants 2014–2021 via the National Centre for Research and Development. Article has been prepared within the frame of the project: “Negative CO₂ emission gas power plant–NOR/POLNORCCS/NEGATIVE-CO₂-PP/0009/2019-00 which is co-financed by program “Applied research” under the Norwegian Financial Mechanisms 2014–2021 POLNOR CCS 2019–Development of CO₂ capture solutions integrated in power and industry processes.

References

- [1] Mishra A., Gautam S., Sharma T.: *Effect of operating parameters on coal gasification*. International Journal of Coal Science & Technology 2018, 5, 2: 113–125.
- [2] Abdoulmoumine N., Adhikari S., Kulkarni A., Chatanathan S.: *A review on biomass gasification syngas cleanup*. Applied Energy 2015, 155: 294–307.
- [3] Tennison I. et al.: *Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England*. The Lancet Planetary Health 2021, 5: 84–92.

- [4] Balmes J.R.: *Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health*. Journal of Allergy and Clinical Immunology 2019, 143, 6: 1979–1987.
- [5] Kwaśniewski K., Kopacz M., Grzesiak P., Kaplan R., Sobczyk E.J.: *Zgazowanie węgla: uwarunkowania, efektywność i perspektywy rozwoju*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.
- [6] Klimiuk E., Pawłowska M., Pokój T.: *Biopaliwa: Technologie dla zrównoważonego rozwoju*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] You S., Ok Y.S., Tsang D.C. W., Kwon E.E., Wang C.-H.: *Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2018, 48, 22–24: 1165–1213.
- [8] Svoboda K., Pohořelý M., Hartman M., Martinec J.: *Pre-treatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification*. Fuel Processing Technology 2009, 90, 5: 629–635.
- [9] Chmielniak T., Ściążko M.: *Development state and analysis of available gasification technologies used for solid fuels and wastes*. In: *Development of coal, biomass and wastes gasification technologies with particular interest in chemical sequestration of CO₂: a monograph*, red. A. Strugała, AKNET, Kraków 2012, 200–208.
- [10] Lurgi FBDB™ – *Fixed Bed Dry Bottom Gasification*. Air Liquide, <https://www.engineering-airliquide.com/lurgi-fbdb-fixed-bed-dry-bottom-gasification> [15.02.2022].
- [11] *Clean Energy and Clean Air in one word: ENVIROTHERM*, 2012. https://enviro.su/assets/uploads/2018/10/Brochure_Envirotherm_Technologies.pdf [15.02.2022].
- [12] Jafri Y., Waldheim L., Lundgren J.: *Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass*. IEA Bioenergy, 2020.
- [13] Swanson M., Henderson A.: *Fluid-Bed Testing of Greatpoint Energy's Direct Oxygen Injection Catalytic Gasification Process for Synthetic Natural Gas and Hydrogen Coproduction. Year 6 – Activity 1.14 – Development of a National Center for Hydrogen Technology*. Grand Forks, Energy & Environmental Research Center, University of Dakota, USA 2012.
- [14] Toporov D., Abraham R.: *Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2015, 115, 7.
- [15] Guan X.: *Particulate control devices in Kemper County IGCC Project*. Energy Reports 2019, 5: 969–978.
- [16] *Lihuayi Again Selects GE's Gasification Technology to Boost Refinery Hydrogen Production*. GE News, <https://www.ge.com/news/press-releases/lihuayi-again-selects-ge-gasification-technology-boost-refinery-hydrogen-production> [15.02.2022].
- [17] Andrews A., Logan J.: *Fischer-Tropsch Fuels from Coal, Natural Gas, and Biomass: Background and Policy*. CRS Report for Congress 2008, USA.
- [18] Breault R.W.: *Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies*. Energies 2010, 3, 2: 216–240.
- [19] Phillips J.N., Booras G.S., Marasigan J.: *The history of integrated gasification combined-cycle power plants*. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017.
- [20] Thomson R., Kwong P., Ahmad E., Nigam K.D.P.: *Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation*. International Journal of Hydrogen Energy 2020, 45, 41: 21087–21111.
- [21] Dahou T., Defoort F., Khiari B., Labaki M., Dupont C., Jeguirim M.: *Role of inorganics on the biomass char gasification reactivity: A review involving reaction mechanisms and kinetics models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021, 135.
- [22] *Fluidized Bed Gasifier Plants. Biowaste Gasification*. HoSt Bioenergy, <https://www.host.nl/en/biomass-gasification> [15.02.2022].
- [23] *ANDRITZ Carbona Bubbling Fluidized Bed (BFB) gasifier*. <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers> [15.02.2022].
- [24] *Valmet Gasifier for biomass and waste*. <https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/> [15.02.2022].
- [25] *Patented Gasification Technology*. EQTEC Technology, <https://eqtec.com/patented-gasification-technology/> [31.01.2022].
- [26] *Henan Haiqi Environmental Protection Technology Co., Ltd-biomass burner, pellet burner, sawdust burner, biomass gasifier, waste pyrolysis gasification*. <http://www.haiqi-machine.com/> [15.02.2022].
- [27] *Downdraft Biomass Gasifiers and Updraft Biomass Gasifiers*. <https://www.chanderpur.com/biomass-gasifier.php> [15.02.2022].
- [28] *Biomass Gasifiers, Gasifiers Pellets Supplier, Biomass Uses, Bio Fuel*. <http://www.infiniteenergyindia.com/biomass-gasifiers.html> [15.02.2022].
- [29] *Gasification Technology Center*. TU Bergakademie Freiberg. <https://tu-freiberg.de/en/iec/evt/networking/gasification-technology-center> [15.02.2022].
- [30] Asadullah M.: *Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 29: 201–215.
- [31] Ptasiński K.J.: *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*. John Wiley & Sons, New Jersey 2016.
- [32] Howaniec N.: *Wybrane aspekty współgazowania węgla i biomasy parą wodną*. Karbo 2015, 4: 139–144.
- [33] Kozaczka J.: *Procesy zgazowania: inżynierskie metody obliczeń*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.
- [34] An H., Fang X., Liu Z., Li Y.: *Research on a soft-measurement model of gasification temperature based on recurrent neural network*. Clean Energy 2022, 6, 1: 861–868.
- [35] Safarian S., Unnþórsson R., Richter C.: *A review of biomass gasification modelling*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 110: 378–391.
- [36] Wang Y., Wang J., Luo X., Guo S., Lv J., Gao Q.: *Dynamic modelling and simulation of IGCC process with Texaco gasifier using different coal*. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, January 2015, 3, 1: 198–210.
- [37] Wang M., Liu G., Hui C.W.: *Optimization of IGCC gasification unit based on the novel simplified equilibrium model*. Clean Technologies and Environmental Policy 2018, 20, 2: 259–269.
- [38] Ptasiński K.J., Hamelinck C., Kerkhof P.J.A.M.: *Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process*. Energy Conversion and Management 2002, 43, 9–12: 1445–1457.
- [39] Cruz P.L., Navas-Anguita Z., Iribarren D., Dufour J.: *Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming*. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43, 26: 11688–11695.
- [40] Migliaccio R.: *Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling*. Industrial & Engineering Chemistry Research 2021, 60, 13: 5034–5047.
- [41] Jia J., Zang G., Paul M.C.: *Energy, exergy, and economic (3E) evaluation of a CCHP system with biomass gasifier, solid oxide fuel cells, micro-gas turbine, and absorption chiller*. International Journal of Energy Research 2021, 45, 10: 15182–15199.
- [42] Singh R.I., Brink A., Hupa M.: *CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification*. Applied Thermal Engineering 2013, 52: 585–614.
- [43] Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modlinski N.: *A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifiers, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics*. Fuel 2020, 271.
- [44] Madejski P.: *Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method*. Applied Thermal Engineering 2018, 145: 352–363.
- [45] Hasse C., Debiagi P., Wen X., Hildebrandt K., Vascellari M., Faravelli T.: *Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification*. Progress in Energy and Combustion Science 2021, 86: 100938.

- [46] Mularski J., Modliński, N.: *Entrained-Flow Coal Gasification Process Simulation with the Emphasis on Empirical Char Conversion Models Optimization Procedure*. Energies 2021, 14, 6: 1729.
- [47] Stabilny rozwój w niełatwym otoczeniu – raport zintegrowany 2019, Grupa Kapitałowa Lubelski Węgiel Bogdanka 2020.
- [48] Acharya B.: *Cleaning of Product Gas of Gasification*. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory 2018: 373–391.

PAWEŁ MADEJSKI, prof.
SŁAWOMIR RÓŻYCKI, Ph. D., Eng
MARIAN BANAS, prof.
TADEUSZ PAJAK, prof.

AGH University of Science and Technology
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
{madejski, srozycki, mbanas, pajak}@agh.edu.pl

PAWEŁ MADEJSKI
SŁAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJĄK

Wybrane aspekty zgazowania węgla do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych

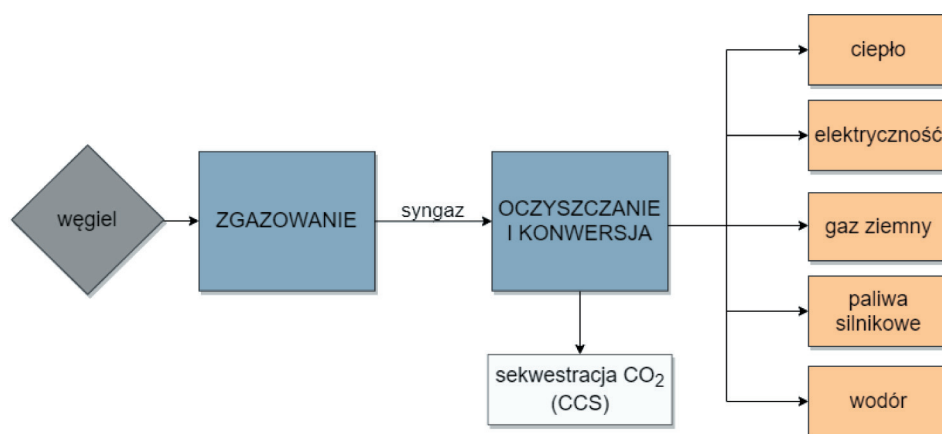
Wytwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw stałych jest znane i stosowane od wielu lat. Spalanie paliw stałych jest procesem złożonym, wymagającym odpowiedniego przygotowania paliwa, przeprowadzenia procesu spalania, jak również pozbywania spalin szkodliwych substancji emitowanych do środowiska w postaci pyłu oraz zanieczyszczeń gazowych (NO_x, SO_x, CO). Od dekad jako najszlachetniejszą postać paliwa uznaje się postać gazową. Paliwa gazowe mogą być łatwo transportowane na duże odległości, są od razu gotowe do spalania, a skład mieszanki paliwa można dowolnie regulować. Ciągłe dążenie do ograniczenia antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych wiąże się z koniecznością stosowania niskoemisyjnych i zeroemisyjnych technologii wytwarzania energii. W przypadku węgla oznaczać to będzie konieczność odchodzenia od technologii bezpośredniego spalania na rzecz bardziej zaawansowanych układów zasilanych paliwem w postaci gazowej. W artykule przedstawiono przegląd dostępnych technik i technologii zgazowania paliw stałych ukierunkowanych na produkcję paliw gazowych, możliwych do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych. Przedstawione zostały także metody obliczeniowe procesu zgazowania mające umożliwić dobór najlepszej technologii oraz parametrów pracy poszczególnych reaktorów.

Słowa kluczowe: zgazowanie, paliwo gazowe, syngaz, technologie gazowe

1. WPROWADZENIE

Proces zgazowania paliw stałych pochodzenia kopalnego znacząco rozszerza możliwości ich stosowalności, przy jednoczesnym ograniczeniu ich negatywnego wpływu na środowisko [1]. Powstały poprzez rozkład termiczny, w niewielkiej ilości powietrza/tlenu lub pary wodnej, podstawowy produkt zgazowania, tzw. syngaz (gaz syntezowy), może zostać wykorzystany zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w sektorze energetycznym, jak i do produkcji węglowodorów syntetycznych w sektorze petrochemicznym [2]. Tak duży zakres zastosowań jest z jednej strony szansą dla rozwoju tej technologii, a z drugiej zagrożeniem, że otrzymane produkty nie znajdą zastosowania tam, gdzie korzyści z ich wykorzystania

będą największe. Biorąc pod uwagę obecne problemy z dotrzymaniem odpowiedniej czystości powietrza w wielu regionach świata oraz konieczność zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych [3], wciąż właściwe wydaje się zastosowanie syngazu w technologiach energetycznych (rys. 1). Spalanie paliw stałych powoduje względnie większą emisję niż spalanie paliw gazowych (emisja zanieczyszczeń zarówno stałych, jak i gazowych), zwłaszcza w przypadku kotłów małej mocy, które nie są wyposażone w systemy oczyszczania spalin, a w których warunki procesu spalania często znacząco odbiegają od optymalnych [4]. Wiele wskazuje na to, że w późniejszym okresie wykorzystania będzie można spodziewać się większego wykorzystania syngazu również w przemyśle chemicznym [5].



Rys. 1. Syngaz jako uniwersalny surowiec energetyczny

2. TECHNOLOGIE ZGAZOWANIA – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

Technologie zgazowania paliw stałych kategoryzowane są ze względu na rozwiązania konstrukcyjne układu wykorzystanego do procesu zgazowania (w tym samego reaktora) oraz parametry procesu: temperaturę, właściwości materiału wsadowego, czynnik zgazowujący i jego stężenie, ciśnienie. Możliwe do osiągnięcia parametry procesu determinuje wybór układu zgazowania.

Układy zgazowania wyróżnia sposób dostarczania ciepła do procesu (z ogrzewaniem bezpośrednim, z ogrzewaniem pośrednim) oraz ruch substratów w reaktorze. Do podstawowych typów zaliczamy reaktory ze złożem zwartym przesuwным (współprądowe i przeciwprądowe), ze złożem fluidalnym (z warstwą fluidalną pęcherzykową lub cyrkulacyjną), dyspersyjne. Reaktory ze złożem zwartym przesuwным są w literaturze i w dalszej części niniejszej pracy zamiennie określane jako reaktory ze złożem stałym. Schematy typowych reaktorów przedstawiono na rysunku 2.

Typ reaktora determinuje zakres temperatur, w jakich prowadzony jest proces zgazowania, i wpływa na profil temperatury wzdłuż reaktora. Wzrost temperatury zwykle powoduje zwiększenie udziału wodoru i tlenu węgla w produkowanym syngazie, natomiast im wyższe ciśnienie, tym wyższy udział metanu [6]. Podstawowe różnice pomiędzy typami reaktorów zaprezentowano w tabeli 1.

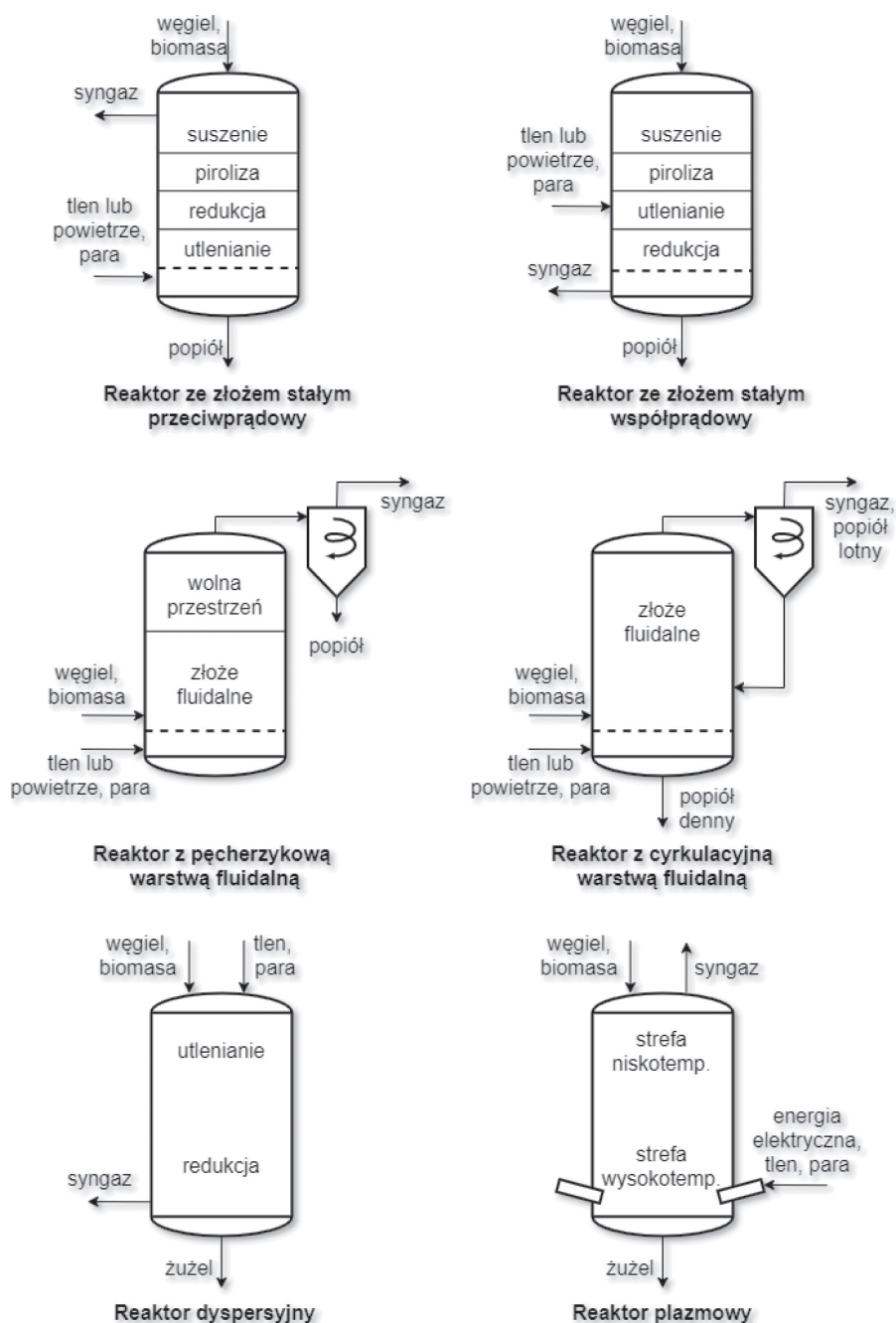
W zastosowaniach komercyjnych wykorzystywane są reaktory o różnej konstrukcji, pracujące przy różnych zestawach stosowanych parametrów procesu – obecnie trudno określić jest wariant optymalny, choć można już wskazać na tendencje rozwojowe. Reaktory ze złożem stałym przeciwprądowe są odpowiednie dla surowców, w których wilgoć stanowi do 50% ich masy. Wsad z dużą zawartością części inertnych, jak np. miał węglowy, osad ściekowy czy też odpady komunalne, które

nie są odpowiednie dla reaktorów ze złożem stałym, były z powodzeniem zgazowane w reaktorach z pęcherzykową warstwą fluidalną. Biomasa drzewna nie jest odpowiednia dla reaktorów strumieniowych, jeżeli wcześniej nie zostanie poddana wstępnemu przygotowaniu w procesach toryfikacji i mielenia [7]. W praktyce stosuje się zawiesiny toryfikatu z bioolejem, a także drewno lub toryfikat zdyspergowany/rozpuszczony w glicerolu, glikolu etylenowym, oleju fenolowym lub biopłynie [8]. Reaktory ze złożem stałym są obecnie coraz rzadziej wykorzystywane, reaktory fluidalne mimo wielu zalet zyskały stosunkowo niewielkie komercyjne zainteresowanie, a aktualnie najczęściej rozwijane i użytkowane są reaktory strumieniowe [9].

2.1. Węgiel

Technologie zgazowania węgla funkcjonują od początków XIX w. Popularność tego surowca jako wsadu do zgazowania jest duża ze względu na stabilność dostaw, stosunkowo stabilne parametry jakościowe i niską cenę. Węgiel komercyjnie zgazowuje się zarówno w gazyfikacjach ze złożem stałym (Lurgi [10] i British Gas Lurgi [11, 12]), jak i w fluidalnych (Great Point Energy [13], Winkler [14], TRIG [15]) oraz dyspersyjnych (GE Energy [16], Texo, Koppers-Tozek, Shell [1]).

W przeszłości gaz syntezowy otrzymywany z węgla był wykorzystywany do różnych celów. Podczas II wojny światowej dominowało przetwarzanie na paliwa transportowe w procesie syntezy Fischer-Tropsch [17], 60–70 lat temu znacząca jego ilość była przetwarzana na wodór do produkcji amoniaku [18], a od około 25 lat zaczęto go intensywnie wykorzystywać w elektrowniach zawodowych z wykorzystaniem technologii opartych na bloku gazowo-parowym ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGCC, ang. *Integrated Gasification Combined Cycle*) [19].



Rys. 2. Ogólny schemat generatorów gazu syntezowego (opracowanie własne na podstawie [3, 9, 10])

Tabela 1
Porównanie podstawowych typów reaktorów zgazowania [6]

Parametr	Reaktor ze złożem stałym	Reaktor fluidalny	Reaktor strumieniowy
Rozmiar cząstek [mm]	<51	<6	<0,15
Temperatura gazu na wyjściu [°C]	450–600	800–1000	>1260
Temperatura w strefie reakcji [°C]	1090	800–1000	1990
Zapotrzebowanie na czynnik utleniający	niskie	umiarkowane	wysokie
Charakterystyka popiołu	suchy/żużel	suchy	żużel
Wielkość	małe	średnie	duże
Problemy eksploatacyjne	smoły blokujące urządzenia i rurociągi	niski stopień konwersji węgla	chłodzenie surowego gazu
Moc zainstalowana [GW]	18,7 (42%)	0,9 (2%)	25,4 (56%)

2.2. Współzgazowanie z biomasą

Poziom emisji gazów cieplarnianych stał się jednym z wyznaczników stosowności rozwiązań technologicznych zarówno pod względem ekologicznym, jak i ekonomicznym. Z tego powodu współcześnie rozwijane są głównie technologie zgazowania, które umożliwiają wykorzystanie biomasy, ewentualnie odpadów nienadających się do dalszego przetworzenia. Co do zasady proces zgazowania takich materiałów przebiega w sposób analogiczny jak węgla, jednak różnice w ich budowie i ich niejednorodność stanowią duże wyzwanie techniczne. Oznacza to konieczność modyfikacji konstrukcji reaktorów [20], aby zwiększyć ich elastyczność odnośnie pracy z cząstkami o większym zróżnicowaniu rozmiaru i kształtu, wilgotności, wartości opałowej i zawartości w składzie pierwiastków węgla, wodoru, tlenu, siarki i azotu, a także popiołu i pierwiastków śladowych (które mogą jednak istotnie wpływać na przebieg procesu i jakość otrzymanych produktów) [21]. Biorąc pod uwagę cechy poszczególnych typów reaktorów, do zgazowania biomasy często stosowany jest reaktor fluidalny (HoSt [22], ANDRITZ AG [23], Valmet Corporation [24], Eqtec [25]), ale i w tym przypadku stosowane mogą być inne reaktory: ze złożem stałym (Shangqiu Haiqi Machinery Equipment [26], Chanderpur Works [27], Infinite Energy [28]), dyspersyjny (Siemens AG [29]). Mimo wielu technicznych i logistycznych problemów [30], które niejednokrotnie kończyły się zaprzestaniem eksploatacji zakładów zgazowania biomasy, nadal widoczne jest duże zainteresowanie tymi technologiami [12]. Jest to związane z wyższą efektywnością egzotermiczną zgazowania w porównaniu z procesem spalania [31].

Zmniejszenie ilości problemów eksploatacyjnych typowych dla zgazowania biomasy można osiągnąć poprzez współzgazowanie z węglem [32]. Dostosowanie technologii do zgazowania tych paliw w różnych proporcjach masowych, znacznie ułatwia zarządzanie ciągłością produkcji energii. Poprawia się także efektywność procesu poprzez zapewnienie odpowiednio wysokiej wartości opałowej wsadu.

3. CHEMIZM PROCESU ZGAZOWANIA

Z chemicznego punktu widzenia podczas procesu zgazowania ma miejsce szereg reakcji redoks. W zależności od temperatury procesu, węgiel w formie czy to wstępnie rozłożonych związków organicznych, czy

też w formie rodników ulega utlenieniu przez tzw. czynnik zgazowujący. Czynnikami zgazowującymi mogą być tlen, wodór, para wodna lub nawet dwutlenek węgla. W zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego reakcje chemiczne w trakcie zgazowania można zapisać następująco:

- Zgazowanie z użyciem tlenu:



Tlen jako czynnik zgazowujący może być w formie powietrza, jednak z uwagi na powstawanie w wysokiej temperaturze tlenków azotu, do zgazowania lepiej jest użyć czystego tlenu. Reakcja jest egzotermiczna i ze zwiększeniem objętości, a więc przesunięcie równowagi w stronę produktów uzyskuje się w wyniku chłodzenia i zmniejszenia ciśnienia, czyli odbieranie ciepła i usuwanie powstającego CO.

- Zgazowanie z użyciem wodoru:



Tu reakcja jest również egzotermiczna, ale przebiega ze zmniejszeniem objętości, a więc dla przyspieszenia procesu należy odbierać ciepło i podnieść ciśnienie.

- Zgazowanie z użyciem pary wodnej:



Reakcja jest endotermiczna i przebiega ze zwiększeniem objętości.

- Zgazowanie z użyciem dwutlenku węgla:



Reakcja również jest endotermiczna i przebiega ze zwiększeniem objętości.

Oprócz reakcji węgla z czynnikami zgazowującymi w procesie zgazowania, zachodzi szereg reakcji produktów zgazowania. Oto niektóre z nich:



W rzeczywistym procesie zgazowania zachodzi nie jedna reakcja, ale kilka naraz, dlatego sterowanie tymi procesami wymaga dużego nakładu pracy. Realizuje się poprzez kontrolowanie ciśnienia (dostarczanie lub odbieranie reagentów) oraz kontrolę temperatury.

Ponadto jeżeli proces jest prowadzony w bardzo wysokich temperaturach, to w reakcjach mogą uczestniczyć reagenty w formie rodnikowej, gdzie następuje np. rozpad cząsteczek O_2 do tlenu rodnikowego O^* , rozpad cząsteczek H_2O do rodnika O^* i cząsteczki wodoru H_2 lub wprost do dwu rodników wodorowych $2H^*$. Rodniki te są bardzo reaktywne i łatwo wchodzą w reakcje zarówno z węglem, jak i innymi związkami obecnymi w mieszaninie zgazowującej.

Zastosowanie dwutlenku węgla jako czynnika zgazowującego może być bardzo atrakcyjnym sposobem na jego zagospodarowanie – produktem takiego procesu jest gazowy tlenek węgla (CO) stanowiący nośnik energii. Najbardziej perspektywicznym wariantem zgazowania jest wykorzystanie pary wodnej jako czynnika zagazowującego – produktem jest nie tylko palny tlenek węgla, ale i gazowy wodór, który po separacji stanowi pożądaną nośnik energii. Zyskuje on coraz większą popularność ze względu na możliwość jego wykorzystania zarówno w klasycznych silnikach spalinowych, turbinach gazowych, jak i ogniwach paliwowych.

4. METODY OBLICZENIOWE PROCESÓW ZGAZOWANIA

Od dokładności wyników modelowania procesów zgazowania zależy ocena efektywności technicznej, ekonomicznej i ekologicznej, która jest podstawą do podjęcia decyzji o zasadności realizacji przedsięwzięcia mogącego zwiększyć efektywność wykorzystania paliw stałych. W wyniku modelowania wyznaczone są parametry procesu: ilość poszczególnych mediów, skład gazu wynikowego [33]. Modelowanie pozwala ponadto zbadać wpływ składu materiału wsadowego, rodzaju czynnika zgazowującego, a także parametrów procesu zgazowania na otrzymane wyniki [31]. Obliczenia procesu zgazowania są pracochłonne, dlatego realizowane niemal wyłącznie programowo. Ich dalszy rozwój w zakresie dokładności wyników jest wspierany przez tzw. *machine learnig* i wykorzystanie sieci neuronowych [34].

4.1. Inżynierskie metody

Konwersja paliwa stałego w procesie zgazowania może być modelowana wyłącznie z zastosowaniem podejścia równowagowego albo tylko podejścia kine-

tycznego, a także z wykorzystaniem ich obu jednocześnie [35]. Korzystanie z inżynierskich metod obliczeniowych związane jest z koniecznością poczynienia wielu założeń zależnych od wybranej metody. Są one związane z rozkładem temperatur w reaktorze, wymianą ciepła z otoczeniem, szybkością przebiegu poszczególnych reakcji, nieuwzględnianiem powstawania smół, zastąpieniem paliwa węglowego czystym węglem (grafitem), pominięciem wpływu na proces obecnego w surowcu popiołu. Mimo to praktyka pokazała, że stosowanie tych metod prowadzi do wystarczającego dla potrzeb inżynierskich przybliżenia [33].

Modele równowagowe należą do najstarszych, są dobrze udokumentowane i były wielokrotnie stosowane. Wyniki otrzymywane z tych modeli cechuje wysoka zgodność zwłaszcza w analizach zgazowania przebiegającego w wysokich temperaturach ($>850^\circ C$). Wang i in. wykazali, że są one bardzo przydatne zwłaszcza w modelowaniu instalacji IGCC [36]. W jednym z modelowanych przypadków otrzymali zgodność wyników modelowania składu syngazu z wynikami eksperymentu na poziomie powyżej 99% (błąd względny poniżej 1%). Opierając się na tym modelu, zademonstrowali sposób na maksymalizację CGE (ang. *cold gas efficiency*) przez optymalizację temperatury gazyfikacji, ilości dostarczanego tlenu i pary. Uzyskana poprawa CGE wyniosła 10% [37].

Modele kinetyczne pozwalają uzyskać więcej informacji o mechanizmach zgazowania przydatnych do projektowania i rozwoju procesu, ale wymagają większych nakładów obliczeniowych i częściowo oparte są na złożonych empirycznych równaniach kinetycznych [3]. Współcześnie wygodną metodą modelowania jest wykorzystanie oprogramowania Aspen Plus [38–41], w którym nie ma potrzeby określania wielu chemicznych reakcji zachodzących w trakcie zgazowania, ale należy utworzyć schemat blokowy procesu, zdefiniować związki chemiczne, które mogą być w nim obecne, i określić warunki przebiegu procesu (przepływu, temperatury, ciśnienia).

4.2. Modelowanie CFD procesu konwersji paliw stałych

W gazyfikatorze zachodzi szereg wielokierunkowych przemian między substratami i czynnikiem zgazowującym, w których udział mogą brać również produkty zgazowania. Na efekt końcowy procesu znaczący wpływ poza parametrami procesu ma kształt

i wymiary reaktora, które determinują czas i warunki, w jakich przebiegają reakcje. Z tego względu inżynierskie metody, które sprawdzały się w zakresie bilansowania masy i energii procesu zgazowania, nie są wystarczające do doskonalenia konstrukcji reaktorów i minimalizacji emisji niepożądanych związków [42]. Poczyniony w ostatnich latach znaczący postęp w zakresie technik modelowania numerycznego i wydajności maszyn obliczeniowych pozwala na modelowanie zachowania się surowców i produktów w modelu przestrzennym reaktora [43, 44]. W modelu można uwzględnić dynamikę płynów, rozmiar i strukturę cząstek surowca, kinetykę reakcji chemicznych, wymianę masy i energii pomiędzy fazą stałą i gazową [45]. W tym zakresie nadal rozwijane są sposoby modelowania, które mają na celu skrócenie czasu obliczeń przy zachowaniu lub poprawie zgodności wyników. Przykładowo Mularski i Modliński wykazali znaczący wpływ przyjętych stałych szybkości reakcji na skład gazu w reaktorze oraz zaproponowali nową procedurę optymalizacji danych wejściowych [46]. Rezultatem modelowania CFD są m.in. rozkłady prędkości, temperatur nieprzereagowanego surowca oraz produktów zgazowania. Dane te pozwalają zaprojektować konkretne rozwiązania reaktorów.

5. STRATEGIE W ZAKRESIE ZGAZOWANIA WĘGLA

Energetyka jest kluczowym elementem gospodarki, gdyż od niej w dużej mierze zależy jej konkurencyjność. Z tego względu jest obecna w politykach i strategiach państw z całego świata, a te z kolei w dużym stopniu determinują możliwość i opłacalność przedsięwzięć w konkretne technologie. Zgazowanie jako możliwość konwersji surowców na użyteczne produkty (w tym paliwa i energię) jest uwzględnione w strategiach wszystkich rozwiniętych państw. Wybrane informacje, prezentujące polityczne nastawienie i odzwierciedlające stan wiedzy, przedstawione zostały w kolejnych podrozdziałach.

5.1. Unia Europejska

Europejski Zielony Ład wraz z Fit for 55 zakłada osiągnięcie redukcji emisji gazów cieplarnianych Unii Europejskiej o co najmniej 55% do 2030 roku w porównaniu z rokiem 1990. Pomocą w realizacji tego

celu ma być zwiększone wykorzystanie wodoru. W strategii rozwoju produkcji wodoru wymieniane jest pozyskiwanie wodoru z paliw kopalnych z wychwytem dwutlenku węgla. Według szacunków UE, aby mógł on konkurować z wodorem z paliw kopalnych bez wychwytywania CO₂, niezbędne byłyby ceny emisji dwutlenku węgla w zakresie 55–90 euro za tonę. Poziom ten osiągnięty został już w połowie 2021 roku, a w czasie pisanego tego artykułu cena przekraczała jego górną granicę.

5.2. Polska

W dokumencie rządowym „Polityka Energetyczna Polski do roku 2040” zapisano, że światowe efekty prac w ramach działalności badawczo-rozwojowej (B+R) wskazują na istnienie potencjału do niskoemisyjnego lub zeroemisyjnego wykorzystania węgla. W praktyce ma to pozwolić na częściowe dalsze korzystanie z jednostek wytwórczych węglowych. Z tego względu w polityce rekomendowane jest poszukiwanie, badanie i wdrażanie nowych metod wykorzystania i przetwarzania węgla tj. zgazowania, oksydowania i innych czystych technologii węglowych.

Obecnie dyskutowana jest opłacalność technologii bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa IGCC w LW Bogdanka z wykorzystaniem technologii Mitsubishi Hitachi Power Systems o mocy 500 MW_e [47].

5.3. USA

Biuro ds. Paliw Kopalnych Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych wspiera rozwój modułowych technologii zgazowania różnego typu i jakości węgla, a także mieszanek węgla z biomasą i innymi odpadami, nastawionymi na produkcję czystego gazu syntezowego nadającego się do produkcji energii elektrycznej, chemikaliów, wodoru, paliw transportowych i innych produktów w zależności od zapotrzebowania rynku wewnętrznego. W 2021 roku Departament Energii Stanów Zjednoczonych (DOE) wybrał cztery projekty, którym przyznał wsparcie w kwocie 2 milionów dolarów na prace badawczo-rozwojowe (B+R) umożliwiające dopracowanie technologii zgazowania mieszanek węgla z biomasą i odpadami tworzyw sztucznych. Zgodnie z założeniami technologie te nastawione są na produkcję wodoru przy zapewnieniu ujemnego bilansu emisji dwutlenku węgla.

5.4. Japonia

W strategii japońskiej Agencji Energii i Zasobów Naturalnych z lipca 2018 roku („The 5th Strategic Energy Plan”) zapisano m.in., że w celu dalszej redukcji emisji gazów cieplarnianych promowany będzie rozwój i praktyczne zastosowania nowej generacji wysokoefektywnych technologii produkcji energii z węgla, takich jak technologia bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGCC), a także technologie wykorzystujące ogniwa paliwowe ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGFC). W efekcie w 2021 roku w Iwaki została uruchomiona największa na świecie instalacja IGCC o mocy 525 MW_e, charakteryzująca się sprawnością na poziomie 48%.

5.5. Australia

Zasobna w pokłady węgla Australia w opublikowanej strategii „First Low Emissions Technology Statement – 2020” wskazuje zgazowanie węgla połączone z sekwestracją dwutlenku węgla jako jedną z najtańszych metod produkcji czystego wodoru w perspektywie krótkoterminowej. Z tego względu rząd Australii ma przeznaczyć 50 milionów dolarów na projekty badawczo-rozwojowe (B+R), których celem jest doprowadzenie do komercjalizacji.

6. PODSUMOWANIE

Dyskusja nad celowością i efektywnością zgazowania węgla w dobie dekarbonizacji, dążenia do neutralności klimatycznej i wdrażania coraz to nowych i bardziej rygorystycznych regulacji UE w zakresie ochrony klimatu ma istotne znaczenie. Wymaga jednak opracowania i wdrożenia nadążających za tymi regulacjami zaawansowanych i wyspecjalizowanych technologii zapewniających wysokoefektywną produkcję paliw dla niskoemisyjnego wytwarzania energii.

Węgiel ma duży potencjał do innych zastosowań energochemicznych, których podstawą będą procesy jego konwersji: zgazowanie czy też uwodornienie. Środowisko naukowe stoi przed szeregiem wyzwań, których urealnienie stworzy możliwość opracowania efektywnych, przyjaznych zmianom klimatu technologii XXI wieku w zakresie pozyskiwania energii i su-

rowców z pokładów węgla. Za zgazowaniem węgla przemawia wiele argumentów, m.in.:

- poprawa efektywności niskoemisyjnego wytwarzania energii elektrycznej z węgla kamiennego z dążeniem do wysokosprawnych zeroemisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin,
- zwiększenie niezależności surowcowej w przemyśle petrochemicznym,
- ułatwienie procesu zgazowania biomasy (współzgazowanie).

Przegląd technologii zgazowania paliw stałych wykazał, że dostępne są rozwinięte technologie, które można zastosować do wielu surowców energetycznych. Na właściwości fizykochemiczne otrzymanych produktów znaczący wpływ poza parametrami surowców ma typ reaktora. Determinuje on możliwe do realizacji warunki prowadzenia procesu oraz sposób, w jaki należy przygotować surowiec. Dobór odpowiedniego rozwiązania mocno zależy od zamierzonego sposobu dalszego wykorzystania produktów i możliwości zagospodarowania odpadów, w tym ciepła odpadowego. Właściwe skorelowanie technologii zgazowania z technologią energetycznego wykorzystania produktów jest konieczne z punktu widzenia maksymalizacji całkowitej efektywności energetycznej i przyczynia się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla oraz zanieczyszczeń: smół, pyłów, amoniaku, siarkowodoru, chlorowodoru i in. [48]. Do tego celu można posłużyć się dostępnymi metodami modelowania, które wielokrotnie wykazały dużą zgodność z wynikami eksperymentów. Optymalizacja samej konstrukcji wybranego reaktora zgazowania jest możliwa dzięki ciągle rozwijającym, ale już pozwalającym na osiągnięcie wiarygodnych (zweryfikowanych i zwalidowanych) wyników metodom modelowania numerycznego z zastosowaniem Komputerowej Mechaniki Płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Podziękowania

Badania prowadzące do uzyskania tych wyników otrzymały częściowe dofinansowanie z Funduszy Norweskich 2014–2021 za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Artykuł powstał w ramach projektu: „Elektrownia gazowa o ujemnej emisji CO₂” – NOR/POLNORCCS/NEGATIVE-CO₂-PP/0009/2019-00 współfinansowanego z programu

„Badania stosowane” w ramach Norweskich Mechanizmów Finansowania 2014–2021 POLNOR CCS 2019 – Rozwój zintegrowanych rozwiązań wychwytywania CO₂ w procesach energetycznych i przemysłowych.

Literatura

- [1] Mishra A., Gautam S., Sharma T.: *Effect of operating parameters on coal gasification*. International Journal of Coal Science & Technology 2018, 5, 2: 113–125.
- [2] Abdoulmoumine N., Adhikari S., Kulkarni A., Chattanathan S.: *A review on biomass gasification syngas cleanup*. Applied Energy 2015, 155: 294–307.
- [3] Tennison I. et al.: *Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England*. The Lancet Planetary Health 2021, 5: 84–92.
- [4] Balmes J.R.: *Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health*. Journal of Allergy and Clinical Immunology 2019, 143, 6: 1979–1987.
- [5] Kwaśniewski K., Kopacz M., Grzesiak P., Kapłań R., Sobczyk E.J.: *Zgazowanie węgla: uwarunkowania, efektywność i perspektywy rozwoju*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.
- [6] Klimiuk E., Pawłowska M., Pokój T.: *Biopaliwa: Technologie dla zrównoważonego rozwoju*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] You S., Ok Y.S., Tsang D.C. W., Kwon E.E., Wang C.-H.: *Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2018, 48, 22–24: 1165–1213.
- [8] Svoboda K., Pohořelý M., Hartman M., Martinec J.: *Pre-treatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification*. Fuel Processing Technology 2009, 90, 5: 629–635.
- [9] Chmielniak T., Ściężko M.: *Development state and analysis of available gasification technologies used for solid fuels and wastes*. W: *Development of coal, biomass and wastes gasification technologies with particular interest in chemical sequestration of CO₂: a monograph*, red. A. Strugała. AKNET, Kraków 2012, 200–208.
- [10] Lurgi FBDBTM – Fixed Bed Dry Bottom Gasification. Air Liquide, <https://www.engineering-airliquide.com/lurgi-fbdb-fixed-bed-dry-bottom-gasification> [15.02.2022].
- [11] Clean Energy and Clean Air in one word: ENVIROTHERM, 2012. https://enviro.su/assets/uploads/2018/10/Brochure_Envirotherm_Technologies.pdf [15.02.2022].
- [12] Jafri Y., Waldheim L., Lundgren J.: *Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass*. IEA Bioenergy, 2020
- [13] Swanson M., Henderson A.: *Fluid-Bed Testing of Greatpoint Energy's Direct Oxygen Injection Catalytic Gasification Process for Synthetic Natural Gas and Hydrogen Coproduction. Year 6 – Activity 1.14 – Development of a National Center for Hydrogen Technology*. Grand Forks, Energy & Environmental Research Center, University of Dakota, USA 2012.
- [14] Toporov D., Abraham R.: *Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2015, 115, 7.
- [15] Guan X.: *Particulate control devices in Kemper County IGCC Project*. Energy Reports 2019, 5: 969–978.
- [16] Lihuayi Again Selects GE's Gasification Technology to Boost Refinery Hydrogen Production. GE News, <https://www.ge.com/news/press-releases/lihuayi-again-selects-ge-gasification-technology-boost-refinery-hydrogen-production> [15.02.2022].
- [17] Andrews A., Logan J.: *Fischer-Tropsch Fuels from Coal, Natural Gas, and Biomass: Background and Policy*. CRS Report for Congress 2008, USA.
- [18] Breault R.W.: *Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies*. Energies 2010, 3, 2: 216–240.
- [19] Phillips J.N., Booras G.S., Marasigan J.: *The history of integrated gasification combined-cycle power plants*. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017.
- [20] Thomson R., Kwong P., Ahmad E., Nigam K.D.P.: *Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation*. International Journal of Hydrogen Energy 2020, 45, 41: 21087–21111.
- [21] Dahou T., Defoort F., Khiari B., Labaki M., Dupont C., Jeguirim M.: *Role of inorganics on the biomass char gasification reactivity: A review involving reaction mechanisms and kinetics models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021, 135.
- [22] Fluidized Bed Gasifier Plants. Biowaste Gasification. HoSt Bioenergy, <https://www.host.nl/en/biomass-gasification> [15.02.2022].
- [23] ANDRITZ Carbona Bubbling Fluidized Bed (BFB) gasifier. <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers> [15.02.2022].
- [24] Valmet Gasifier for biomass and waste. <https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/> [15.02.2022].
- [25] Patented Gasification Technology. EQTEC Technology, <https://eqtec.com/patented-gasification-technology/> [31.01.2022].
- [26] Henan Haiqi Environmental Protection Technology Co., Ltd. biomass burner, pellet burner, sawdust burner, biomass gasifier, waste pyrolysis gasification. <http://www.haiqi-machine.com/> [15.02.2022].
- [27] Downdraft Biomass Gasifiers and Updraft Biomass Gasifiers. <https://www.chanderpur.com/biomass-gasifier.php> [15.02.2022].
- [28] Biomass Gasifiers, Gasifiers Pellets Supplier, Biomass Uses, Bio Fuel. <http://www.infiniteenergyindia.com/biomass-gasifiers.html> [15.02.2022].
- [29] Gasification Technology Center. TU Bergakademie Freiberg, <https://tu-freiberg.de/en/iecc/evt/networking/gasification-technology-center> [15.02.2022].
- [30] Asadullah M.: *Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 29: 201–215.
- [31] Ptasiński K.J.: *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*. John Wiley & Sons, New Jersey 2016.
- [32] Howaniec N.: *Wybrane aspekty współgazowania węgla i biomasy parą wodną*. Karbo 2015, 4: 139–144.
- [33] Kozaczka J.: *Procesy zgazowania: inżynierskie metody obliczeń*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.
- [34] An H., Fang X., Liu Z., Li Y.: *Research on a soft-measurement model of gasification temperature based on recurrent neural network*. Clean Energy 2022, 6, 1: 861–868.
- [35] Safarian S., Unnthórsson R., Richter C.: *A review of biomass gasification modelling*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 110: 378–391.
- [36] Wang Y., Wang J., Luo X., Guo S., Lv J., Gao Q.: *Dynamic modelling and simulation of IGCC process with Texaco gasifier using different coal*. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, January 2015, 3, 1: 198–210.
- [37] Wang M., Liu G., Hui C.W.: *Optimization of IGCC gasification unit based on the novel simplified equilibrium model*. Clean Technologies and Environmental Policy 2018, 20, 2: 259–269.
- [38] Ptasiński K.J., Hamelinck C., Kerkhof P.J.A.M.: *Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process*. Energy Conversion and Management 2002, 43, 9–12: 1445–1457.
- [39] Cruz P.L., Navas-Anguila Z., Iribarren D., Dufour J.: *Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming*. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43, 26: 11688–11695.
- [40] Migliaccio R.: *Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling*. Industrial & Engineering Chemistry Research 2021, 60, 13: 5034–5047.

- [41] Jia J., Zang G., Paul M.C.: *Energy, exergy, and economic (3E) evaluation of a CCHP system with biomass gasifier, solid oxide fuel cells, micro-gas turbine, and absorption chiller*. International Journal of Energy Research 2021, 45, 10: 15182–15199.
- [42] Singh R.I., Brink A., Hupa M.: *CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification*. Applied Thermal Engineering. 2013, 52: 585–614.
- [43] Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modlinski N.: *A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifiers, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics*. Fuel 2020, 271.
- [44] Madejski P.: *Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method*. Applied Thermal Engineering 2018, 145: 352–363.
- [45] Hasse C., Debiagi P., Wen X., Hildebrandt K., Vascellari M., Faravelli T.: *Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification*. Progress in Energy and Combustion Science 2021, 86: 100938.
- [46] Mularski J., Modliński, N.: *Entrained-Flow Coal Gasification Process Simulation with the Emphasis on Empirical Char Conversion Models Optimization Procedure*. Energies 2021, 14, 6: 1729.
- [47] Stabilny rozwój w niełatwym otoczeniu – raport zintegrowany 2019, Grupa Kapitałowa Lubelski Węgiel Bogdanka 2020.
- [48] Acharya B.: *Cleaning of Product Gas of Gasification*. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory 2018: 373–391.
- dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI, prof. AGH
dr inż. SŁAWOMIR RÓŻYCKI
dr hab. inż. MARIAN BANAŚ, prof. AGH
dr hab. inż. TADEUSZ PAJĄK, prof. AGH
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
{madejski, srozycki, mbanas, pajak}@agh.edu.pl

WŁADYSŁAW CELEBAŃSKI
PIOTR PIECHOTA

Methods for adjusting the braking force of winders with a traction sheave to prevent the risk of wire rope slippage

In Koeppel winders, the emergency braking deceleration values must be higher than the values required by mining regulations and lower than the critical deceleration values due to the risk of hoisting rope slippage. Slippage of suspension ropes can lead to damage to the traction sheave lining and, in extreme conditions, serious damage to the shaft hoist. In order to limit the braking force to a safe value, the air or hydraulic oil pressure in the braking systems of winders is regulated during braking.

This paper presents methods for adjusting pressure in braking systems during braking and their influence on: the risk of slippage of the suspension ropes, the dynamics of the driving system and the dynamics of the skips themselves. Particular attention was paid to the solution in which the braking force varies during the braking process which can cause large changes in the value of the force acting on the winder.

Key words: rope slippage, Koeppel sheave, braking deceleration, oscillations

1. INTRODUCTION

In winders with a traction sheave, the braking torque during emergency braking must be such that the brake provides the performance required by law without exceeding the critical deceleration values.

The brake during emergency braking of winders should cause a deceleration of at least 1.5 m/s^2 , and in winders with a traction sheave, the deceleration caused by the brake may be less than 1.5 m/s^2 , but not less than 1.2 m/s^2 if the deceleration of 1.5 m/s^2 would cause the critical decelerations to be exceeded. The requirements are specified in the Polish Regulation of the Minister of Energy, 2017, §567 [1].

The critical deceleration for a given hoist under specified travel and load conditions is the smallest deceleration beyond which slippage of the rope relative to the traction sheave can occur (loss of frictional engagement).

Slippage of suspension ropes can lead to damage to the traction sheave lining and, in extreme conditions, serious damage to the shaft hoist.

The first part of the article will present the influence of the method of adjusting braking torque during emergency braking on the degree of risk of slippage of the suspension ropes, and in the second part on the dynamics of the drive system and the dynamics of the skips themselves.

2. INFLUENCE OF THE METHOD OF BRAKING TORQUE CONTROL DURING EMERGENCY BRAKING ON THE DEGREE OF SUSPENSION ROPES SLIPPAGE RISK

With respect to the way in which the braking torque is adjusted during emergency braking, the

braking systems of winders can be divided into three groups:

- 1) braking systems capable of applying a braking torque of one constant value for all types of lift travel during emergency braking;
- 2) braking systems with two different values of braking torque depending on the type of lift travel;
- 3) constant deceleration braking systems that adjust braking torque during braking so that, regardless of the type of travel, the deceleration during braking has a constant set value.

They have been termed by Tadeusz Zmysłowski [2] as single-program, dual-program and adjusting systems.

The influence of the method of adjusting braking torque during emergency braking on the degree of suspension ropes slippage risk will be presented on the basis of the analysis of actual measurements of the deceleration during emergency braking of two shaft hoists, in which the method of braking torque adjustment was changed as a result of the modernization of the winder.

2.1. Pneumatic winder with a radial brake

The shaft hoist is a single-rope hoist and has two 4-story cages designed for transporting people and/or hoisting and conveying material. The winder is equipped with a radial braking system with cylindrical brake races and a pneumatic axial drive of HOP – VI type.

Until the retrofit of the winder, during emergency braking the brake control system was capable of applying a single braking torque value for all types of hoist travel. After the retrofit, the brake control system is capable of applying two braking torque values depending on the type of travel.

The actual deceleration during emergency braking was measured before and after the retrofitting of the winder.

For a better presentation of the results, measurements are presented for extreme travel cases, i.e., emergency braking when traveling with empty cages and when traveling with maximum excess load. The measurement results are summarized in Tables 1 and 2.

Table 1

Deceleration during emergency braking for a single value of braking torque for all types of winder travel

Direction of travel	Load [kg]	Deceleration [m/s ²]			Quotient b_{rz}/b_{kr}	Quotient b_{rz}/b_{min}
		critical b_{kr}	minimum b_{min}	real b_{rz}		
Cage A ↑	0	3.18	1.20	3.05	0.96	2.54
Cage A ↑	$Q_w = 10000$	4.54	1.20	3.56	0.78	2.97
Cage A ↓	$Q_m = 10000$	1.97	1.20	1.33	0.67	1.11

Table 2

Deceleration during emergency braking for two braking torque values for all types of winder travel

Direction of travel	Load [kg]	Deceleration [m/s ²]			Quotient b_{rz}/b_{kr}	Quotient b_{rz}/b_{min}
		critical b_{kr}	minimum b_{min}	real b_{rz}		
Cage A ↑	0	3.08	1.20	2.71	0.88	2.26
Cage A ↑	$Q_w = 10000$	4.43	1.20	3.26	0.74	2.72
Cage A ↓	$Q_m = 10000$	1.93	1.20	1.59	0.82	1.33

The tables also show the actual deceleration values during emergency braking referenced to the critical and minimum deceleration values.

The winder brake shall apply a braking torque such that the following conditions are met during emergency braking for all types of travel:

- $b_{rz}/b_{kr} \leq 1$,
- $b_{rz}/b_{min} \geq 1$.

A comparison of these values for the case of a braking system capable of applying single or two braking torque values is shown in the following graphs (Figs. 1 and 2).

On the basis of measurements of deceleration during emergency braking of this shaft hoist, it can be concluded that for winders with a braking system capable of applying only one constant value of braking

torque for all types of travel, the greatest difficulty is to meet the requirements of mining regulations simultaneously for empty skip travel and downward travel with excess load.

The braking torque during downward travel with an excess load must be large enough to make the deceleration value during emergency braking greater than 1.2 m/s^2 , which makes the deceleration value dangerously close to the critical deceleration value

during emergency braking in the case of empty skip travel. This condition is very undesirable and increases the danger of ropes slipping on the traction sheave.

This problem can be solved to a large extent by using a braking system capable of applying two braking torque values depending on the type of travel. In the above case, one braking torque value has been assigned for the downward travel with material and another for the other types of travel.

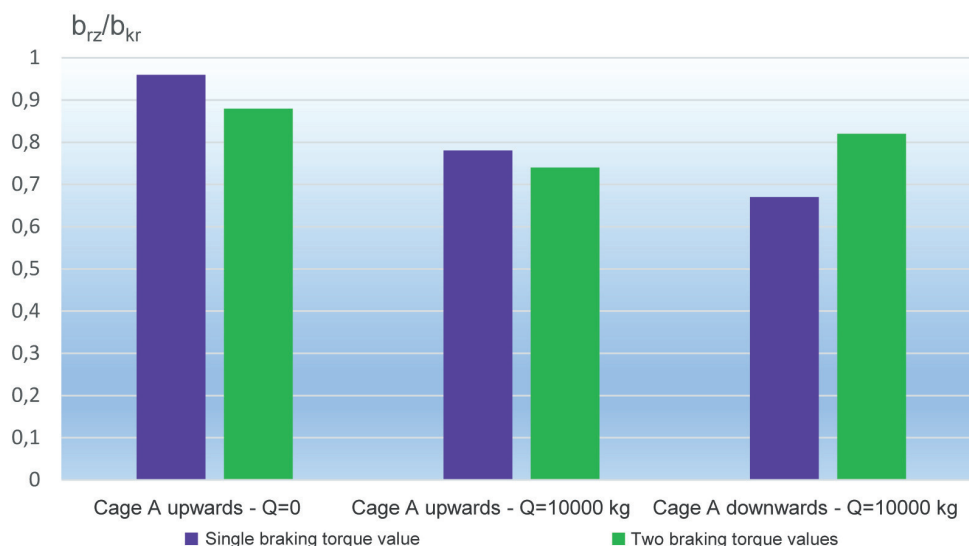


Fig. 1. Comparison of the quotient of actual deceleration to critical deceleration for single and two braking torque values

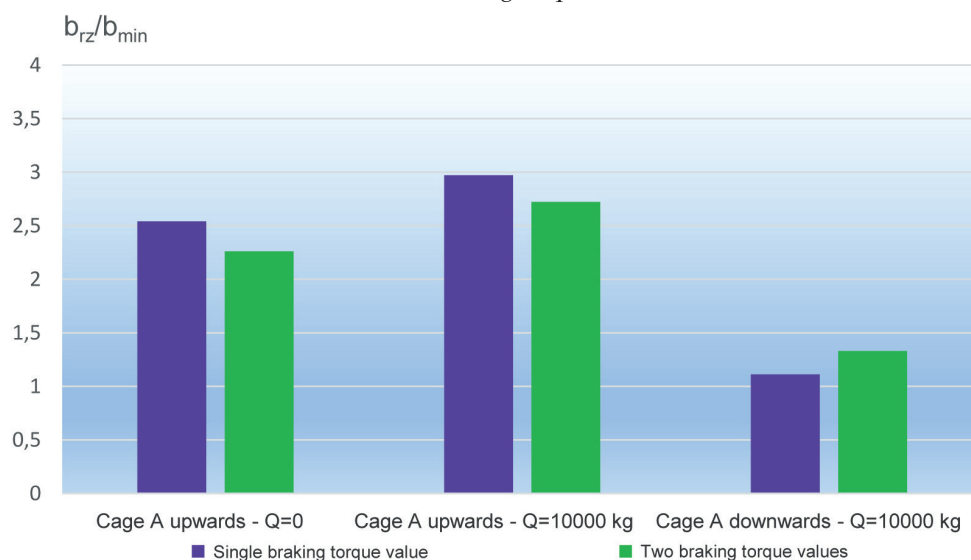


Fig. 2. Comparison of the quotient of actual deceleration to minimum deceleration for single and two braking torque values

This reduced emergency braking deceleration during empty-skip travels and increased deceleration during downward travel with excess load. The risk of slippage is reduced and, at the same time, the effectiveness of the brake is increased when braking during downward travel with excess load.

2.1. Hydraulically retractable disc brake winder

The mine hoist is a four rope, two skip winder equipped with hydraulically retractable disc brakes with a spring drive. Until the retrofit of the winder,

during emergency braking the brake control system was capable of applying a single braking torque value for all types of hoist travel. After retrofitting, the brake control system is capable of applying a braking torque with a value that varies in time in such a way that, irrespective of the type of travel, the deceleration during emergency braking has a constant set value. The only exception is downward travel with excess load, where the braking system brakes with a constant preset torque value.

The following tables show the emergency braking test results for both cases.

A comparison of the actual deceleration values during emergency braking relative to the critical and minimum deceleration values for the case of constant and variable braking torque is shown in the graphs (Figs. 3 and 4). From Tables 3 and 4, it can be seen

that the risk of slippage is significantly less for adjustable torque braking compared to constant torque braking. The difference between the critical deceleration for controlled torque braking is 0.71 m/s^2 and for constant torque braking is close to zero (0.02 m/s^2).

On the basis of the measurements of the decelerations during emergency braking for this shaft hoist, it can be stated that the use of the braking system capable of obtaining variable braking torque so that the deceleration during braking has a constant set value regardless of the type of travel, considerably reduces the risk of ropes slipping on the traction sheave.

There was a significant decrease in the quotients of the actual deceleration values relative to the critical values for travels with empty skips and upward with extracted material.

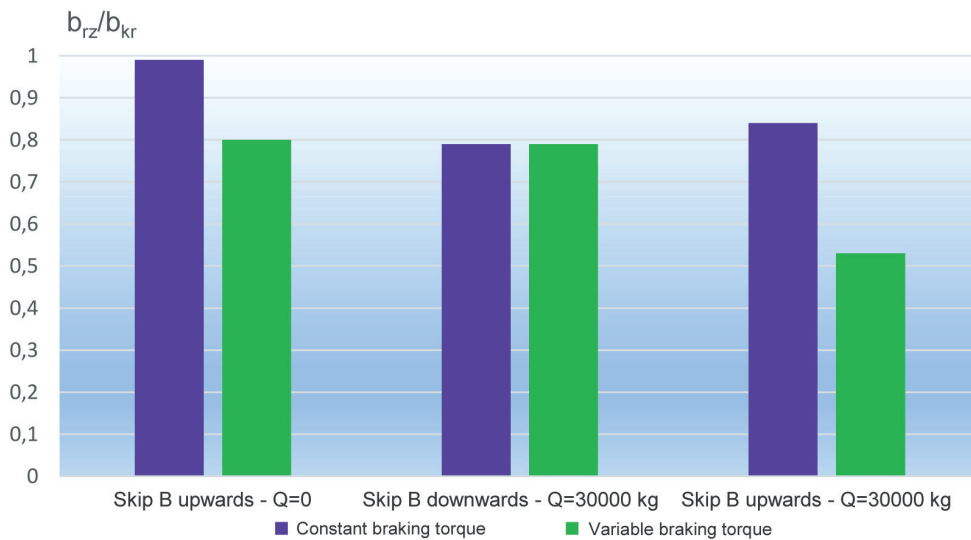


Fig. 3. Comparison of the quotient of actual deceleration to critical deceleration for constant and variable braking torque

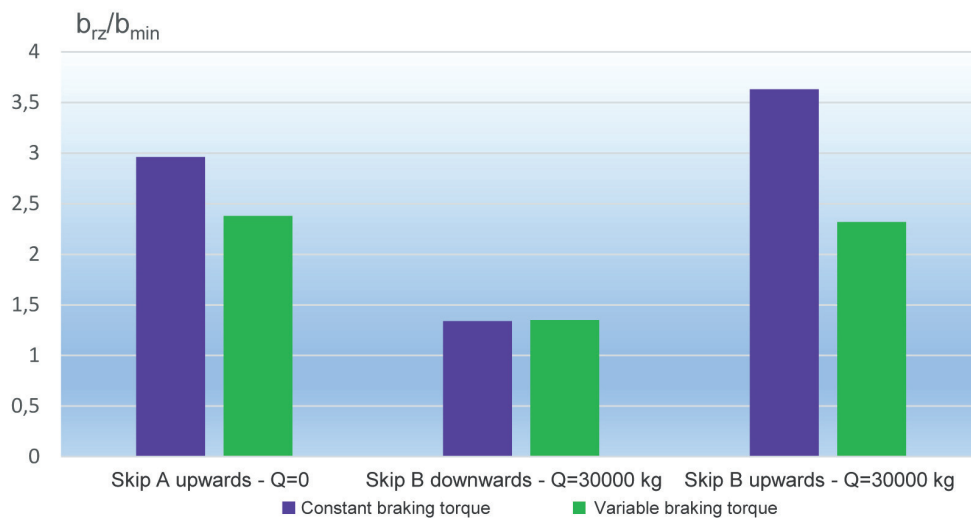


Fig. 4. Comparison of the quotient of actual deceleration to minimum deceleration for constant and variable braking torque

Table 3
Deceleration during emergency braking for the case of one constant braking torque value
for all types of winder travel

Direction of travel	Load [kg]	Deceleration [m/s ²]			Quotient b_{rz}/b_{kr}	Quotient b_{rz}/b_{min}
		critical b_{kr}	minimum b_{min}	real b_{rz}		
Skip B ↑	0	3.57	1.20	3.55	0.99	2.96
Skip B ↓	$Q_w = 30000$	2.04	1.20	1.61	0.79	1.34
Skip B ↑	$Q_w = 30000$	5.20	1.20	4.36	0.84	3.63

Table 4
Deceleration during emergency braking for the case of variable braking torque

Direction of travel	Load [kg]	Deceleration [m/s ²]			Quotient b_{rz}/b_{kr}	Quotient b_{rz}/b_{min}
		critical b_{kr}	minimum b_{min}	real b_{rz}		
Skip A ↑	0	3.57	1.20	2.86	0.80	2.38
Skip B ↓	$Q_w = 30000$	2.04	1.20	1.62	0.79	1.35
Skip B ↑	$Q_w = 30000$	5.20	1.20	2.78	0.53	2.32

3. EFFECT OF BRAKING TORQUE CONTROL DURING EMERGENCY BRAKING ON THE DYNAMICS OF THE SKIPS

In winder control systems, speed measurement is usually performed by measuring the rotational speed of the traction sheave. In order to investigate the behavior of the skips during emergency braking, it was necessary to measure the velocity of the skip itself. This was accomplished by using an accelerometer that measures the vertical acceleration of the skip and then determining the velocity from it.

Measurements were taken for two skip winders: one with a control system capable of applying two

braking torque values depending on the type of travel, and the other with a variable braking torque so that the braking deceleration has a constant value regardless of the type of travel.

3.1. Disc brake winder – variable braking torque

The recordings (Figs. 5 and 6) show the braking process of the skip device recorded at the traction sheave of the winder and at the skip itself. The registration shows the acceleration a [m/s²] rather than the deceleration b [m/s²].

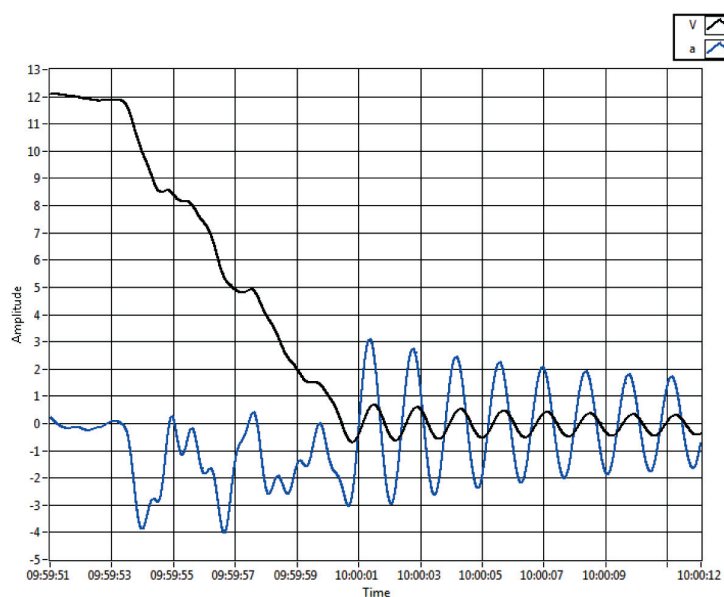


Fig. 5. Skip braking dynamics recorded at the skip: speed V [m/s], acceleration a [m/s²]

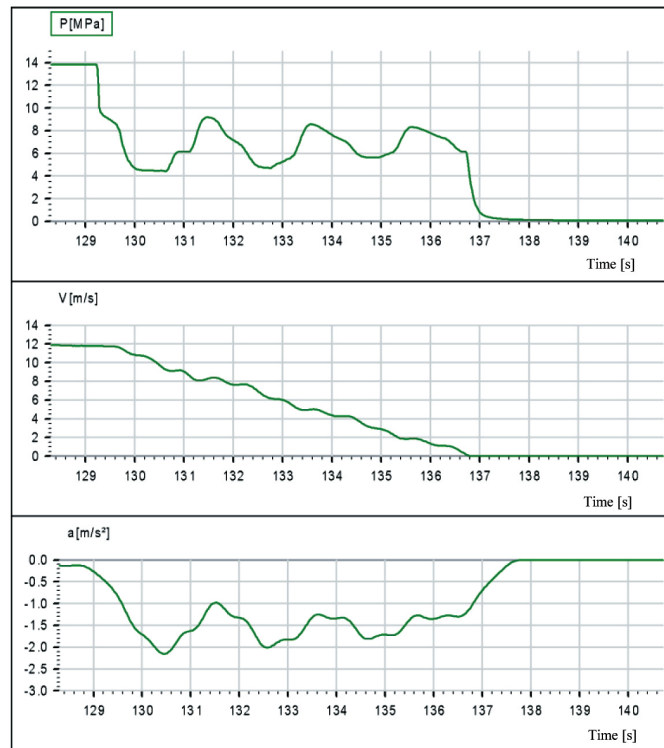


Fig. 6. Dynamics of skip braking recorded at the traction sheave (P – pressure, V – velocity, a – acceleration)

The winder is equipped with hydraulic disc brakes with full pressure control during the braking process. We can observe the fluctuation of the pressure and hence the braking torque in Figure 5. The large amplitude of the braking torque generates vibrations of the entire system: traction sheave – ropes – skips. The instantaneous deceleration may exceed the critical deceleration value creating a slippage risk. The acceleration fluctuation of the skip during braking reaches the value of almost 0.5 g. After stopping the traction sheave, the fading fluctuations of the skip can be observed with a large amplitude of about 6 m/s^2 immediately after the stop.

3.2. Air brake winder – two braking torque values

The following recordings (Figs. 7 and 8) show the braking process of a skip winder equipped with pneumatically driven brakes. In this device, a constant braking torque selected by the control system from two possible ones is maintained during the braking process. The braking process itself is smoother due to the constant braking torque, whereas the very high oscillation of the winder skip can be observed after stopping.

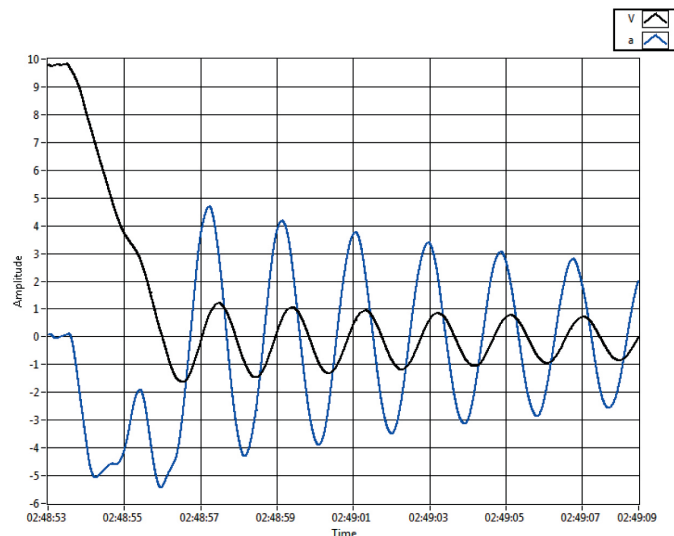


Fig. 7. Dynamics of skip deceleration recorded at the skip: velocity V [m/s], acceleration a [m/s²]

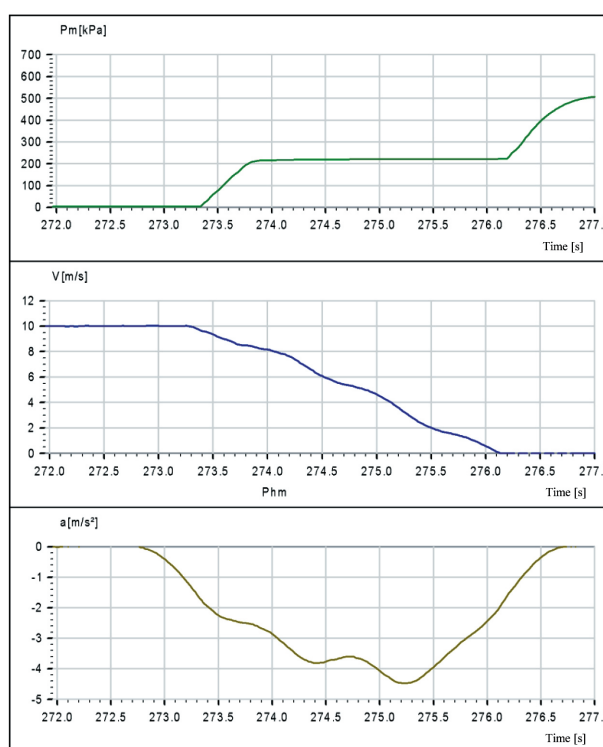


Fig. 8. Dynamics of skip braking recorded at the traction sheave
(P – pressure, V – velocity, a – acceleration)

4. CONCLUSIONS

On the one hand, the braking torque control methods used in modern winders ensure adequate brake performance and, on the other hand, prevent the rope from slipping.

The programmable controllers used in the brake control system usually have a large amount of computing power. It could be used to modulate the braking force during emergency braking in such a way as to not lead to the oscillation of the drive system, which in turn would extend the life of the mechanical components of the drive system. Modulation of braking force has already been implemented e.g. in the Anico Eagle winder presented by Marian Wójcik [3] but these solutions have not yet been applied on a wide scale.

References

- [1] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Dz.U. 2017, poz. 1118.
- [2] Zmysłowski T.: *Górnice maszyny wyciągowe: część mechaniczna*. Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice – Warszawa 2004.
- [3] Klich A., Kozieł A.: *Transport szybowy*. ITG KOMAG, Gliwice 2011.

WŁADYSŁAW CELEBAŃSKI, M., Sc., Eng.
PIOTR PIECHOTA, M., Sc., Eng.
Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego
Sp. z o.o.
ul. Łędzińska 8, 43-143 Łędziny, Poland
p.piechota@cbidgp.pl

WŁADYSŁAW CELEBAŃSKI
PIOTR PIECHOTA

Metody regulacji siły hamowania maszyn wyciągowych z kołem pędnym chroniące przed ryzykiem wystąpienia poślizgu lin

W maszynach wyciągowych z kołem Koepe wartości opóźnień hamowania awaryjnego muszą być większe od wartości wymaganych przepisami górnictwami oraz ze względu na ryzyko wystąpienia poślizgu lin nośnych muszą być mniejsze od wartości opóźnień krytycznych. Poślizg lin nośnych może doprowadzić do uszkodzenia wykładziny koła napędowego, a w skrajnych warunkach do poważnego uszkodzenia wyciągu szybowego. W celu ograniczenia siły hamującej do wartości bezpiecznej ciśnienie powietrza lub oleju hydraulicznego w układach hamulcowych maszyn wyciągowych w czasie hamowania jest regulowane.

W artykule przedstawiono sposoby regulacji ciśnienia w układach hamulcowych podczas hamowania i ich wpływ na ryzyko wystąpienia poślizgu lin nośnych, dynamikę układu napędowego oraz dynamikę samych naczyń wyciągowych. Szczególną uwagę zwrócono na rozwiązanie, w którym siła hamowania jest zmienna w czasie procesu hamowania, co może powodować duże zmiany wartości siły działającej na naczynia wyciągowe.

Słowa kluczowe: poślizg lin, koło Koepe, opóźnienie hamowania, oscylacje

1. WSTĘP

W maszynach wyciągowych z kołem pędnym wartość momentu hamującego podczas hamowania awaryjnego musi być tak dobrana, aby hamulec zapewniał wymaganą przepisami skuteczność działania, a jednocześnie nie zostały przekroczone wartości opóźnienia krytycznego.

Hamulec podczas hamowania awaryjnego maszyn wyciągowych powinien spowodować opóźnienie co najmniej $1,5 \text{ m/s}^2$, a w maszynach wyciągowych z kołem pędnym opóźnienie powodowane przez hamulec może być mniejsze niż $1,5 \text{ m/s}^2$, ale nie mniejsze niż $1,2 \text{ m/s}^2$, gdyby opóźnienie $1,5 \text{ m/s}^2$ spowodowało przekroczenie opóźnień krytycznych. Wymagania zostały określone w §567 Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych

wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych [1].

Opóźnienie krytyczne dla danego wyciągu przy ustalonych warunkach ruchu i obciążeniu jest to najmniejsze opóźnienie, po którego przekroczeniu może wystąpić poślizg liny względem koła pędnego (utrata sprzężenia ciernego).

Poślizg lin nośnych może doprowadzić do uszkodzenia wykładziny koła napędowego, a w skrajnych warunkach do poważnego uszkodzenia wyciągu szybowego.

W pierwszej części artykułu zostanie przedstawiony wpływ sposobu regulacji momentu hamującego podczas hamowania awaryjnego na stopień ryzyka wystąpienia poślizgu lin nośnych, a w drugiej części na dynamikę układu napędowego oraz dynamikę samych naczyń wyciągowych.

2. WPŁYW SPOSOBU REGULACJI MOMENTU HAMUJĄCEGO NA STOPIEŃ RYZYKA WYSTĄPIENIA POŚLIZGU LIN NOŚNYCH

Ze względu na sposób regulacji momentu hamującego podczas hamowania awaryjnego układy hamulcowe maszyn wyciągowych można podzielić na trzy grupy:

- 1) układy hamulcowe, które podczas hamowania awaryjnego umożliwiają uzyskanie momentu hamującego o jednej stałej wartości dla wszystkich rodzajów jazdy wyciągu;
- 2) układy hamulcowe pozwalające na uzyskanie momentu hamującego o dwóch różnych wartościach w zależności od rodzaju jazdy wyciągu;
- 3) układy hamujące z stałym opóźnieniem, które podczas hamowania regulują moment hamujący tak, aby niezależnie od rodzaju jazdy opóźnienie podczas hamowania miało stałą założoną wartość.

Zostały one nazwane przez Tadeusza Zmysłowskiego [2] kolejno jako jednoprogramowe, dwuprogramowe i regulacyjne.

Wpływ sposobu regulacji momentu hamującego podczas hamowania awaryjnego na stopień ryzyka wystąpienia poślizgu lin nośnych zostanie przedstawiony na podstawie analizy pomiarów rzeczywistych opóźnień podczas hamowania awaryjnego dwóch wyciągów szybowych, w których w wyniku modernizacji

maszyny wyciągowej został zmieniony sposób regulacji momentu hamującego.

2.1. Maszyna wyciągowa z hamulcem promieniowym o napędzie pneumatycznym

Wyciąg szybowy jest wyciągiem jednolinowym i ma dwie klatki czteropiętrowe przeznaczone do jazdy ludzi, wydobywania i opuszczania materiałów. Maszyna wyciągowa ma układ hamulcowy promieniowy z cylindrycznymi bieżniami hamulcowymi i napędzie pneumatycznym osiowym typu HOP – VI.

Do czasu modernizacji maszyny wyciągowej układ sterowania hamulca podczas hamowania awaryjnego umożliwiał uzyskanie momentu hamującego o jednej wartości dla wszystkich rodzajów jazdy wyciągu. Po modernizacji układ sterowania hamulca umożliwia uzyskanie dwóch wartości momentu hamującego w zależności od rodzaju jazdy.

Pomiary rzeczywistych opóźnień podczas hamowania awaryjnego zostały przeprowadzone przed modernizacją maszyny wyciągowej i po niej.

W celu lepszej prezentacji wyników przedstawiono pomiary dla skrajnych przypadków ruchowych, tzn. dla hamowania awaryjnego podczas jazdy z pustymi klatkami oraz podczas jazdy z maksymalną nadwagą. Wyniki pomiarów zebrano w poniższych tabelach 1 i 2.

Tabela 1
Opóźnienia podczas hamowania awaryjnego
dla przypadku jednej wartości momentu hamującego dla wszystkich rodzajów jazdy wyciągu

Kierunek jazdy	Obciążenie [kg]	Opóźnienie [m/s ²]			Iloraz b_{rz}/b_{kr}	Iloraz b_{rz}/b_{min}
		krytyczne b_{kr}	minimalne b_{min}	rzeczywiste b_{rz}		
Klatka A ↑	0	3,18	1,20	3,05	0,96	2,54
Klatka A ↑	$Q_w = 10\ 000$	4,54	1,20	3,56	0,78	2,97
Klatka A ↓	$Q_m = 10\ 000$	1,97	1,20	1,33	0,67	1,11

Tabela 2
Opóźnienia podczas hamowania awaryjnego
dla przypadku dwóch wartości momentu hamującego dla wszystkich rodzajów jazdy wyciągu

Kierunek jazdy	Obciążenie [kg]	Opóźnienie [m/s ²]			Iloraz b_{rz}/b_{kr}	Iloraz b_{rz}/b_{min}
		krytyczne b_{kr}	minimalne b_{min}	rzeczywiste b_{rz}		
Klatka A ↑	0	3,08	1,20	2,71	0,88	2,26
Klatka A ↑	$Q_w = 10\ 000$	4,43	1,20	3,26	0,74	2,72
Klatka A ↓	$Q_m = 10\ 000$	1,93	1,20	1,59	0,82	1,33

W tabelach podano także wartości opóźnień rzeczywistych podczas hamowania awaryjnego odniesione do wartości opóźnień krytycznych oraz minimalnych.

Hamulec maszyny wyciągowej powinien zadawać taki moment hamujący, aby podczas hamowania awaryjnego dla wszystkich rodzajów jazdy spełnione były następujące warunki:

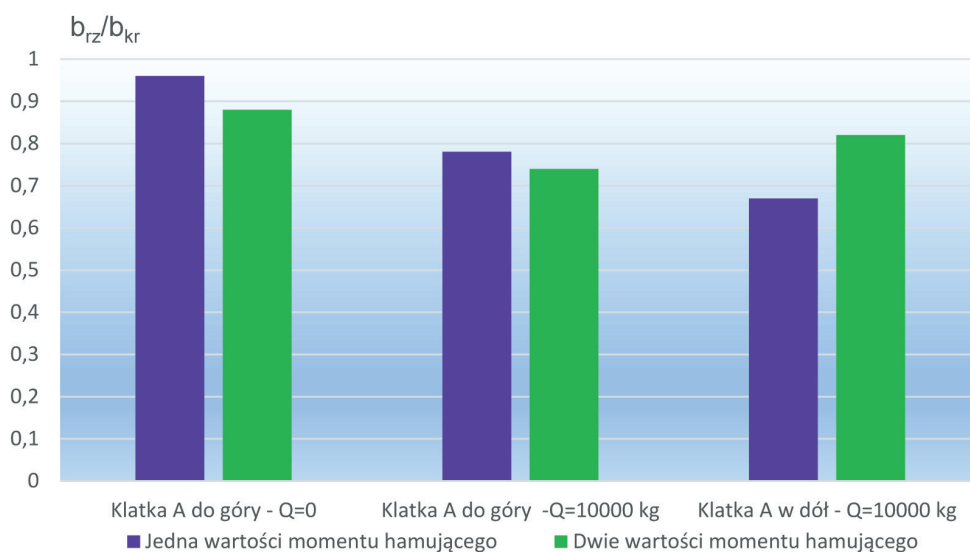
- $b_{rz}/b_{kr} \leq 1$,
- $b_{rz}/b_{min} \geq 1$.

Porównanie tych wartości dla przypadku układu hamulcowego umożliwiającego uzyskanie jednej lub dwóch wartości momentu hamującego przedstawiono na wykresach (rys. 1 i 2).

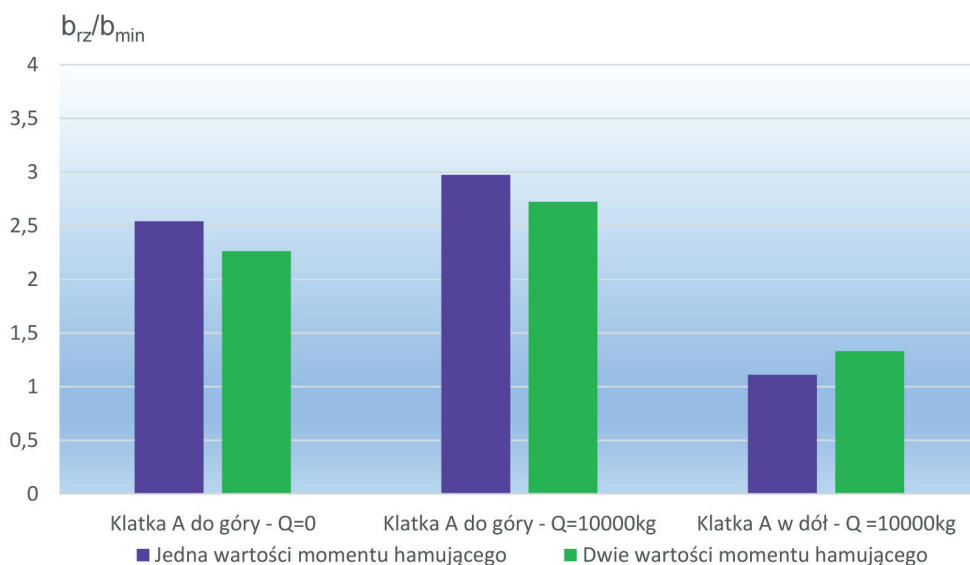
Na podstawie pomiarów opóźnień podczas hamowania awaryjnego tego wyciągu szybowego można

stwierdzić, że dla maszyn wyciągowych z układem hamulcowym mogącymysterować tylko jedną stałą wartość momentu hamującego dla wszystkich rodzajów jazdy największą trudność sprawia spełnienie wymagań przepisów górniczych jednocześnie dla jazdy z naczyniami pustymi i jazdy z nadwagą w dół.

Moment hamujący podczas jazdy z nadwagą w dół musi być na tyle duży, aby wartość opóźnienia podczas hamowania awaryjnego była większa od $1,2 \text{ m/s}^2$, co sprawia, że w czasie hamowania awaryjnego podczas jazdy z pustymi naczyniami wartość opóźnienia niebezpiecznie zbliża się do wartości opóźnienia krytycznego. Stan taki jest bardzo niepożądany i zwiększa niebezpieczeństwo wystąpienia poślizgu lin nośnych na kole pędnym.



Rys. 1. Porównanie ilorazu opóźnienia rzeczywistego do opóźnienia krytycznego w przypadku jednej oraz dwóch wartości momentu hamującego



Rys. 2. Porównanie ilorazu opóźnienia rzeczywistego do opóźnienia minimalnego w przypadku jednej oraz dwóch wartości momentu hamującego

Problem ten w znacznym stopniu rozwiązuje zastosowanie układu hamulcowego mającego możliwość uzyskania dwóch wartości momentu hamującego w zależności od rodzaju jazdy. W powyższym przypadku jedna wartość momentu hamującego została przypisana do jazdy z materiałem w dół, a druga do pozostałych jazd.

Pozwoliło to na zmniejszenie opóźnienia podczas hamowania awaryjnego w czasie jazd z pustymi klatkami oraz zwiększenie opóźnienia podczas hamowania w czasie jazdy z nadwagą w dół. Zmniejszyło się ryzyko wystąpienia poślizgu, a jednocześnie zwiększyła się skuteczność hamulca podczas hamowania z nadwagą w dół.

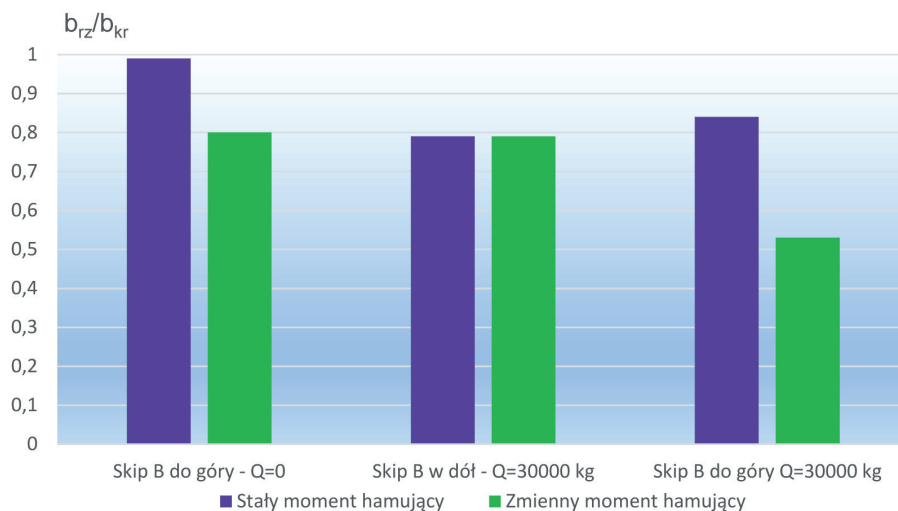
2.1. Maszyna wyciągowa z hamulcem tarczowym o odwodzeniu hydraulicznym

Wyciąg górniczy jest wyciągiem czterolinowym, dwuskipowym z hamulcami tarczowymi z napędem

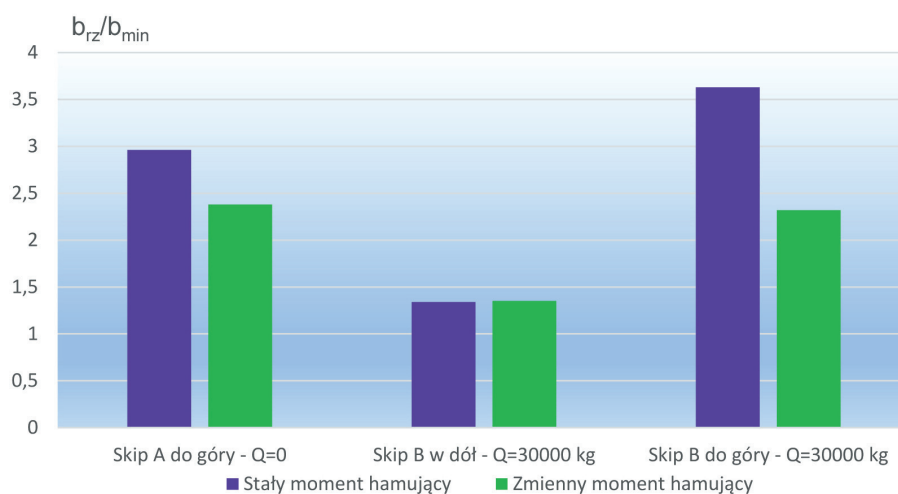
sprężynowym o odwodzeniu hydraulicznym. Do czasu modernizacji maszyny wyciągowej układ sterowania hamulca podczas hamowania bezpieczeństwa umożliwiał uzyskanie momentu hamującego o jednej wartości dla wszystkich rodzajów jazd wyciągu. Po modernizacji układ sterowania hamulca umożliwia uzyskanie momentu hamującego o wartości tak zmieniającej się w czasie, aby niezależnie od rodzaju jazdy opóźnienie podczas hamowania awaryjnego miało stałą założoną wartość. Jedynym wyjątkiem jest jazda z nadwagą w dół, kiedy to układ hamulcowy hamuje momentem o stałej i z góry określonej wartości.

W poniższych tabelach przedstawione są wyniki prób hamowania awaryjnego dla obydwu przypadków.

Porównanie wartości opóźnień rzeczywistych podczas hamowania awaryjnego odniesionych do wartości opóźnień krytycznych oraz minimalnych dla przypadku stałego oraz zmiennego momentu hamującego przedstawiono na wykresach (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Porównanie ilorazu opóźnień rzeczywistego do opóźnień krytycznych w przypadku stałego oraz zmiennego momentu hamującego



Rys. 4. Porównanie ilorazu opóźnień rzeczywistego do opóźnień minimalnych w przypadku stałego oraz zmiennego momentu hamującego

Z tabel 3 i 4 wynika, że ryzyko wystąpienia poślizgu jest zdecydowanie mniejsze w przypadku hamowania regulowanym momentem w porównaniu z hamowaniem ze stałym momentem. Różnica między opóźnieniem krytycznym w przypadku hamowania regulowanym momentem wynosi $0,71 \text{ m/s}^2$, a w przypadku hamowania stałym momentem jest bliska zeru ($0,02 \text{ m/s}^2$).

Na podstawie pomiarów opóźnień podczas hamowania awaryjnego dla tego wyciągu szybowego można

stwierdzić, że zastosowanie układu hamulcowego mającego możliwość uzyskania zmiennego momentu hamującego, tak aby niezależnie od rodzaju jazdy opóźnienie podczas hamowania miało stałą założoną wartość, w znacznym stopniu zmniejsza niebezpieczeństwo wystąpienia poślizgu lin na kole pędnym.

Znacznemu zmniejszeniu uległy ilorazy wartości rzeczywistych opóźnień odniesionych do wartości krytycznych dla jazdy z pustymi skipami oraz z wydobyciem do góry.

Tabela 3

Opóźnienia podczas hamowania awaryjnego dla przypadku jednej stałej wartości momentu hamującego dla wszystkich rodzajów jazd wyciągu

Kierunek jazdy	Obciążenie [kg]	Opóźnienie [m/s^2]			Iloraz b_{rz}/b_{kr}	Iloraz b_{rz}/b_{min}
		krytyczne b_{kr}	minimalne b_{min}	rzeczywiste b_{rz}		
Skip B ↑	0	3,57	1,20	3,55	0,99	2,96
Skip B ↓	$Q_w = 30\,000$	2,04	1,20	1,61	0,79	1,34
Skip B ↑	$Q_w = 30\,000$	5,20	1,20	4,36	0,84	3,63

Tabela 4

Opóźnienia podczas hamowania awaryjnego dla przypadku zmiennej wartości momentu hamującego

Kierunek jazdy	Obciążenie [kg]	Opóźnienie [m/s^2]			Iloraz b_{rz}/b_{kr}	Iloraz b_{rz}/b_{min}
		krytyczne b_{kr}	minimalne b_{min}	rzeczywiste b_{rz}		
Skip A ↑	0	3,57	1,20	2,86	0,80	2,38
Skip B ↓	$Q_w = 30\,000$	2,04	1,20	1,62	0,79	1,35
Skip B ↑	$Q_w = 30\,000$	5,20	1,20	2,78	0,53	2,32

3. WPŁYW SPOSOBU REGULACJI MOMENTU HAMUJĄCEGO PODCZAS HAMOWANIA AWARYJNEGO NA DYNAMIKĘ NACZYŃ WYCIĄGOWYCH

W układach sterowania maszyn wyciągowych pomiar prędkości jazdy zwykle jest realizowany przez określenie prędkości obrotowej koła pędnego. W celu zbadania zachowania się naczyń wyciągowych w czasie hamowania awaryjnego konieczne było zmierzenie prędkości samego naczynia. Zrealizowano to, stosując akcelerometr mierzący przyspieszenie pionowe naczynia wyciągowego, a następnie wyznaczając z niego prędkość.

Wykonano pomiary dla dwóch maszyn wyciągowych skipowych – jednej z układem sterowania umożliwiającym uzyskanie dwóch wartości momentu hamującego w zależności od rodzaju jazdy oraz drugiej, mającej możliwość uzyskania zmiennego momentu hamującego, tak aby niezależnie od rodzaju jazdy

opóźnienie podczas hamowania miało stałą założoną wartość.

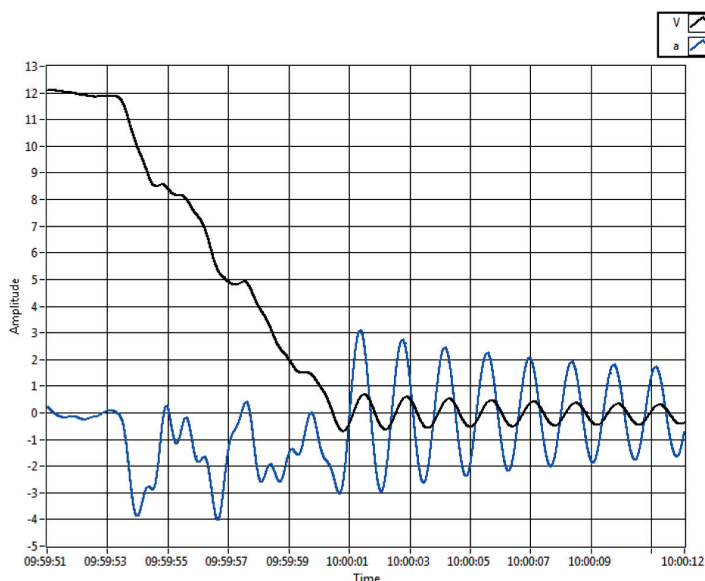
3.1. Maszyna wyciągowa z hamulcem tarczowym – zmienny moment hamujący

Na rejestracjach (rys. 5 i 6) przedstawiono proces hamowania urządzenia skipowego zarejestrowany na kole pędnym maszyny wyciągowej oraz na samym naczyniu. Na rejestracji przedstawiono przyspieszenie a [m/s^2], a nie opóźnienie b [m/s^2].

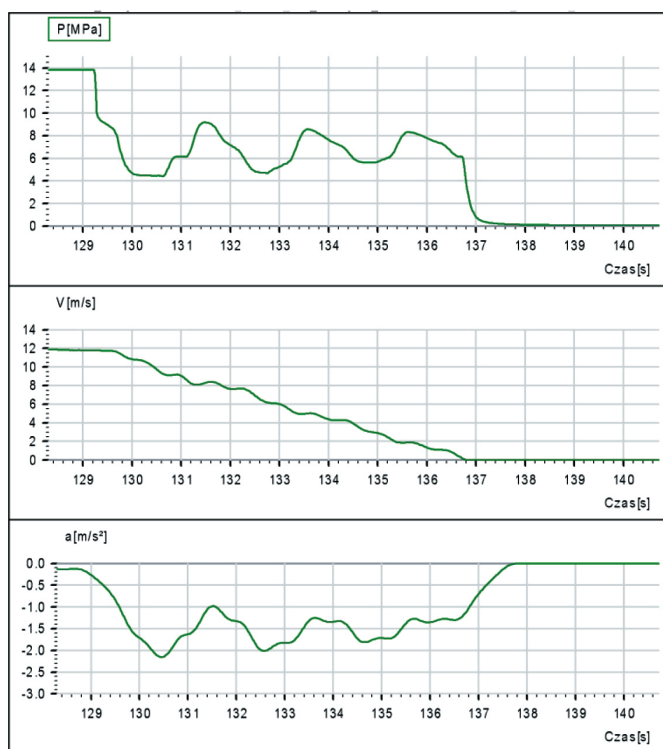
Maszyna wyciągowa wyposażona jest w hydrauliczne hamulce tarczowe z pełną regulacją ciśnienia w czasie procesu hamowania. Wahania ciśnienia, a co za tym idzie momentu hamującego, możemy zaobserwować na rysunku 5. Tak duża amplituda momentu hamującego generuje drgania całego układu: koło pędne – liny – naczynia wyciągowe. Chwilowe opóźnienie może przekroczyć wartość opóźnienia kry-

tycznego, stwarzając zagrożenie wystąpienia poślizgu. Wahania przyspieszenia naczynia wyciągowego w czasie hamowania dochodzą prawie do wartości 0,5 g. Po

zatrzymaniu koła pędnego możemy zaobserwować gasnące wahania naczynia wyciągowego o dużej amplitudzie wynoszącej tuż po zatrzymaniu około 6 m/s^2 .



Rys. 5. Dynamika hamowania skipu rejestrowana na naczyniu: prędkość $V \text{ [m/s]}$, przyspieszenie $a \text{ [m/s}^2\text{]}$

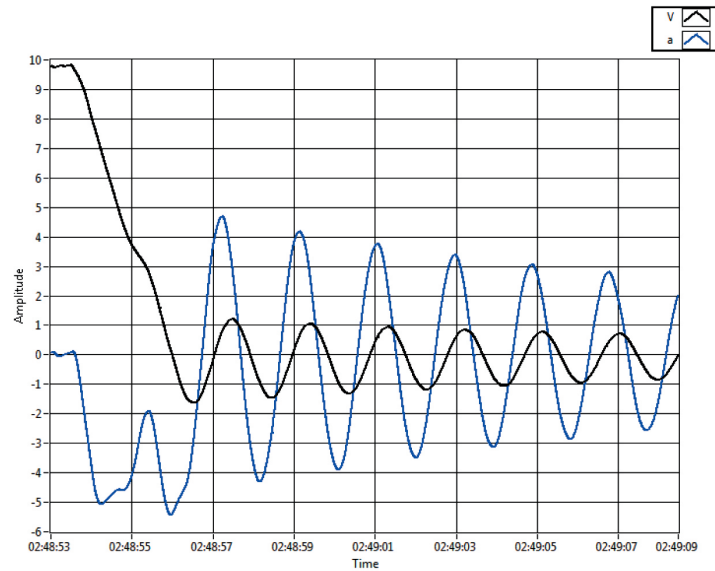


Rys. 6. Dynamika hamowania skipu rejestrowana na kole pędnym (P – ciśnienie, V – prędkość, a – przyspieszenie)

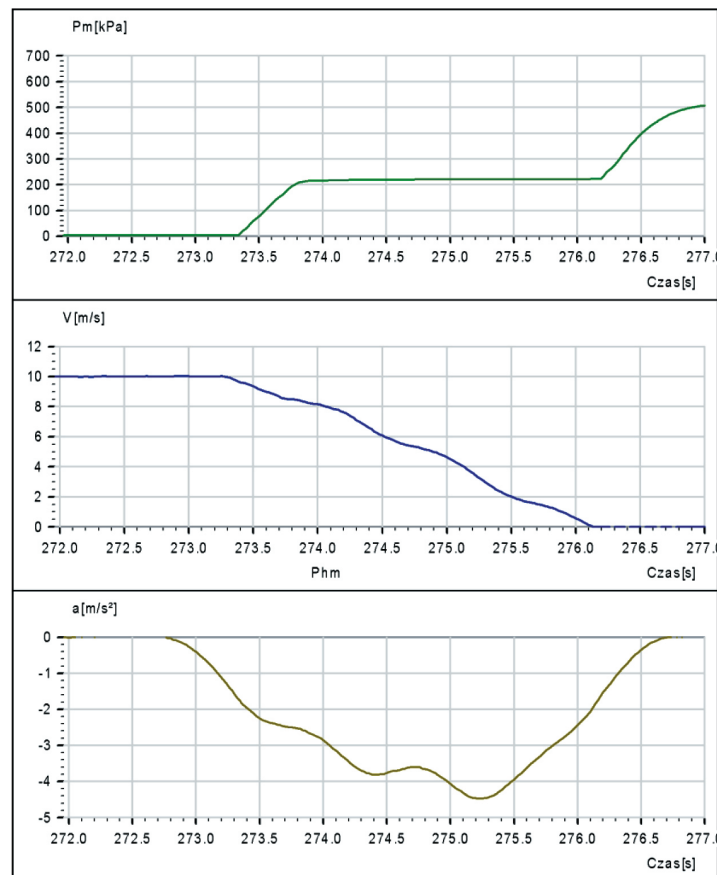
3.2. Maszyna wyciągowa z hamulcem pneumatycznym – dwie wartości momentu hamującego

Na kolejnych rejestracjach (rys. 7 i 8) przedstawiono proces hamowania maszyny wyciągowej skipowej wyposażonej w hamulce o napędzie pneumatycznym.

W tym urządzeniu w czasie procesu hamowania utrzymywany jest stały moment hamujący wybrany przez układ sterujący z dwóch możliwych. Sam proces hamowania ze względu na stały moment hamujący jest spokojniejszy, natomiast po zatrzymaniu można zaobserwować bardzo duże oscylacje naczynia wyciągowego.



Rys. 7. Dynamika hamowania skipu rejestrowana na naczyniu: prędkość V [m/s], przyspieszenie a [m/s²]



Rys. 8. Dynamika hamowania skipu rejestrowana na kole pędnym
(P – ciśnienie, V – prędkość, a – przyspieszenie)

4. WNIOSKI

Stosowane we współczesnych urządzeniach wyciągowych metody regulacji momentu hamującego zapewniają z jednej strony wystarczającą skuteczność hamulców, a z drugiej strony nie dopuszczają do poślizgu liny.

Wykorzystywane w układzie sterowania układów hamulcowych sterowniki programowalne mają zwykle duży zapas mocy obliczeniowej. Można by ją wykorzystać do takiego modulowania siły hamującej w czasie hamowania awaryjnego, aby nie doprowadzać do oscylacji układu napędowego, co z kolei wydłużyłoby żywotność elementów mechanicznych

układu napędowego. Modulacja siły hamowania jest już stosowana np. w wyciągu AnicoEagle przedstawionym przez Mariana Wójcika [3], ale nie są to jeszcze rozwiązania wprowadzane na szeroką skalę.

Literatura

- [1] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Dz.U. 2017, poz. 1118.
- [2] Zmysłowski T.: *Górnice maszyny wyciągowe: część mechaniczna*. Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice – Warszawa 2004.
- [3] Klich A., Kozieł A.: *Transport szybowy*. ITG KOMAG, Gliwice 2011.

mgr inż. WŁADYSŁAW CELEBAŃSKI

mgr inż. PIOTR PIECHOTA

Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego

Sp. z o.o.

ul. Łędzińska 8, 43-143 Łędziny

p.piechota@cbidgp.pl

