

EDWARD MICHLOWICZ  
JERZY WOJCIECHOWSKI

## Energy consumption analysis of the main dewatering pumps in underground mines

*Mine dewatering is one of the main tasks and problems in the mining sector which do not affect output directly but are necessary for correct mine operations. The main dewatering pumps are located at various levels, but the pumping head is always a few hundred metres underground. The number and operating time of the pumps depends on the water inflow and are specified in the applicable regulations. Due to the capacity and required head, the power demand may well be in excess of 1 MW. Consequently, the correct use of main dewatering pumps, at low energy consumption, is a basic condition of limiting water pumping costs. The analysed pumping station is located at level 500, is equipped with ten  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0.139 \text{ m}^3/\text{s}$ ) OW-250/8 pumps. The operating time of most pumps exceeds 20 000 h and the energy consumption is from 2.17 to 2.67 kWh/m<sup>3</sup> of pumped water. The analysis results and the energy consumption ratios have been compared with the data for new pumps which operate at data sheet parameters (efficiency). This was the basis to evaluate the impact of exceeding the time between repairs on operating parameters and the increase in the operating costs of the main dewatering pumps.*

Key words: dewatering pumps, energy consumption, pumping costs

### 1. INTRODUCTION

Correct operation of underground mines requires a number of actions that, although not directly related to output, are necessary to ensure the output and safety. One of the more important and necessary auxiliary processes is mine dewatering. Mine water is the natural outflow from the rock mass as well as water supplied artificially during the extraction process [1]. The main problem is natural water, as the amount of water flowing from the rock can be from a few to a few dozen cubic metres per minute. The factors affecting the amount of inflowing water and resulting hazards have been described in numerous publications [2, 3]. The amount of inflowing water depends mainly on the hydrological and geomechanical conditions [4]. The impact of random factors on mine water was analysed by Miladinović [5] and Qazizada [6].

The inflowing mine water must be pumped up to the surface to ensure the safety of both employees and mining operations [7–9]. The mine water is removed by an underground mine dewatering system, usually consisting of face, section and main dewatering pumping stations, supported by water galleries [10]. The face and section stations pump the water to galleries and main dewatering pumping stations.

The main dewatering systems in underground mines can be divided into single-stage (from the lowest level to the surface) and cascade (with an intermediate pumping station at a smaller depth). The more widely used are single-stage systems in which the pump units located at the lowest level remove water to the surface through pressure pipelines. The head is often a few hundred metres below ground; hence the main dewatering pumps are multistage. Due to the

pump head and required capacity, the power demand is in the order of megawatts. The main dewatering pumping stations are located near shafts to reduce the length of high-pressure pipelines and facilitate the transport of heavy and bulky pump units. Suggestions for the determination of methods and operating costs of main dewatering pumping stations have been given by Wojciechowski et al. [11].

The requirements for the main dewatering equipment are specified in the *Regulation of the Minister of Energy of 23 November 2016 on detailed requirements for operation of underground mines*. The requirements for the main dewatering pumping stations are given in Section VI: *Machinery, equipment and installations, and buildings of a mining plant*, Chapter 3: *Main dewatering equipment and systems* [12].

The most important requirements from the point of view of the analyses presented in this paper are that the removal of the greatest daily inflow of water must be effected within 20 h, and the minimum number of pumps in the pumping station chamber is calculated according to the formula:  $i = 2n + 1$  ( $n$  – number of pumps in the unit). The main dewatering system is equipped with at least two pressure pipelines with a total flow capacity which is not less than the total rated capacity of the required number of the installed pumps, at a flow rate not exceeding 3 m/s [13, 14].

## 2. UNDERGROUND MINE MAIN DEWATERING SYSTEM

The reviewed main dewatering system (Fig. 1) is located in an underground mine at the 500 m level. Multistage pumps are installed in the pumping station chamber near the shaft. The main dewatering pumping station has ten pump units comprising OW250/8 pumps and SCUd134u motors. Each pump unit is connected to two  $\varnothing 500$  mm pressure pipelines (Fig. 1) which transport the water to the surface. The water inflow forecast based on the hydrological conditions and the size of underground excavations is  $16.83 \text{ m}^3/\text{min}$ , giving the daily inflow of  $24,235 \text{ m}^3$ . The capacity of water galleries in which water is collected is  $20,196 \text{ m}^3$ . When the pumping is stopped, the water galleries take about 24 h to fill up. A diagram of the examined main dewatering system is presented in Figure 1.

At the forecast mine water inflow, the total capacity of the pumps to comply with the mining regulations is  $Q = 20.20 \text{ m}^3/\text{min}$ , and the pump head is  $H_u = 530 \text{ m}$ . The rated capacity of OW250/8 eight-stage pumps is  $Q = 8.33 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ) and the head  $H_u = 560 \text{ m}$ . The requirements specified in the mining regulations are met when two pumps working continuously and the third one working 50 percent of the time. The number of required pumps is seven and the pumping station has ten pumps, meaning that the main dewatering system is overdimensioned.

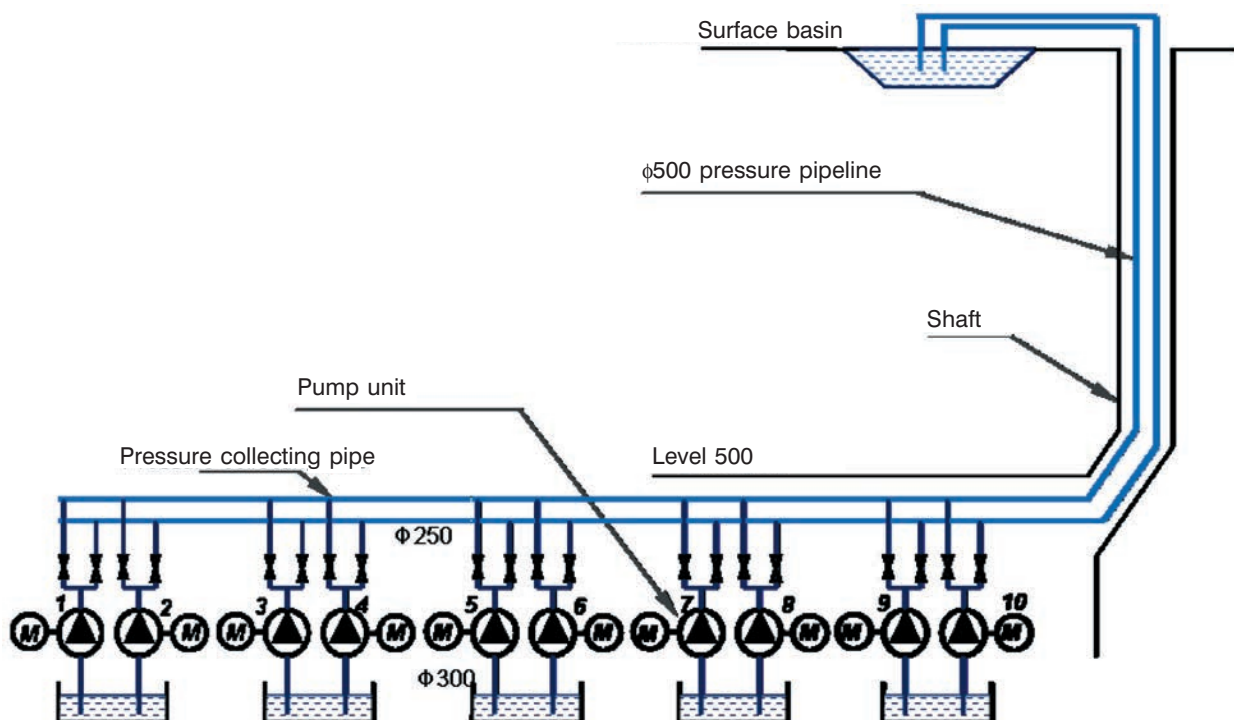


Fig. 1. Main dewatering system diagram

The OW250 stationary, horizontal multistage pumps are manufactured by the Powen – Wafapomp S.A. Group in Zabrze (Silesia, southern Poland). They are used for mine dewatering and the pumping of slightly mechanically polluted and saline water. They can pump water up to 800 m and are of a robust design suitable for the adverse operating conditions typical in underground mines.

The water inflowing to the pumping station is heavily mechanically polluted, hence prior to being fed to the pump wells it is purified in sedimentation tanks to remove the largest mechanical pollutants. The pumped water is very saline (conductivity from 5.35 to 9.18 mS/cm) and polluted with very fine suspensions (grain size from 9.6 to 11.9  $\mu\text{m}$ ).

### 3. PERFORMANCE OF THE PUMP UNITS

The measurements were made in the main dewatering pumping station at the level of 500 m to determine the pump flow performance: water stream in the main collecting pipeline, pressure in the suction port and delivery port and electric power of the motors [15]. Figure 2 shows an example of a pump unit (No. 2 – SCDdm 134u, engine, OW-250AM / 8, pump).



Fig. 2. Pomp unit no. 2

The speeds in the suction port and delivery port were calculated using the water volumetric stream and the ports cross section area:

$$c = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2)$$

$c$  – average water speed in ports [m/s],

$\dot{Q}$  – water volumetric stream [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$A$  – cross section area [ $\text{m}^2$ ].

The stream was measured using a FlowKat 200 flowmeter, pressure using dial pressure gauges, negative pressure using a 0–(–)0.1 MPa vacuum gauge, and pressure at delivery using 0–8 MPa pressure gauges. The power consumption was measured with a SENTRON PAC3200 analyser. The pumps were choked by means of gate valves installed in the pipelines connecting the pumps with the main collecting pipe. The measurements were made after the flow had stabilised.

The effective head  $H_u$  was determined using the relationship:

$$H_u = \frac{p_t - p_s}{\rho g} + \frac{c_t^2 - p_s^2}{\rho g} + \Delta h_m \quad (1)$$

where:

$p_s, p_t$  – pressure in the suction port and delivery port [Pa],

$c_s, c_t$  – water speed in the suction port and delivery port [m/s],

$\rho$  – liquid density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\Delta h_m$  – height difference between the pressure gauge at the suction port and the pressure gauge at the delivery port [m].

The effective power (i.e. the power transmitted to the stream of pumped water) is determined using the relationship:

$$P_u = \rho g H_u \dot{Q} \quad (3)$$

The pump unit efficiency is in relation to the power fed to electric motors:

$$\eta_{zp} = \frac{P_u}{P_{el}} = \frac{\rho g H_u \dot{Q}}{P_{el}} \quad (4)$$

The pump shaft power was determined taking into account the motor efficiency. The constant motor efficiency was used ( $\eta_{sel} = 0.93$ ).

Pump shaft power:

$$P_m = \eta_{sel} P_{el} \quad (5)$$

Pump efficiency:

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_m} = \frac{\eta_{zp}}{\eta_{sel}} \quad (6)$$

Relationships (1)–(6) were used to calculate the flow performance of the pumps.

The performance of all the pumps was determined during the measurements. The pumps were choked in a small range of their capacity because the main dewatering pumps are operated at maximum capacity. The paper presents the performance of only two pumps: pump 1 – which has been recently overhauled, and pump 10 – with the highest degree of wear.

In order to evaluate the pump condition, the figures also include the pump data sheet performance in terms of the measured parameters.

Figures 3–4 present the performance of pump 1. During the measurements, pump 1 worked about

3,340 operating hours after the overhaul, so the performance deviations from the data sheet values are significantly less in comparison with the pumps that had clocked over 20,000 operating hours. The pump efficiency is lower than the data sheet value by approximately 8% at the 8 m<sup>3</sup>/min capacity to 14% at the 4.5 m<sup>3</sup>/min capacity.

The performance of pump 10 is presented in Figures 5–7. Pump 10 has the highest degree of wear in the examined pumping station.

The operating time of pump 10 was about 32,000 h. The long operating time particularly strongly reflects the pump performance. The pump efficiency was reduced by about 27% in comparison with the data sheet value. The energy consumption increased by the same degree.

The character of the operation of the main dewatering pumps leads to the fact that only heads which are minimally dependent on choking are effective. A decisive role is played by the geometrical head; in the pumping station it is  $H_g = 489$  m. The pressure increase in the pump due to flow resistance is relatively low (2.0–9.5%, average about 5%) in relation to the geometrical head.

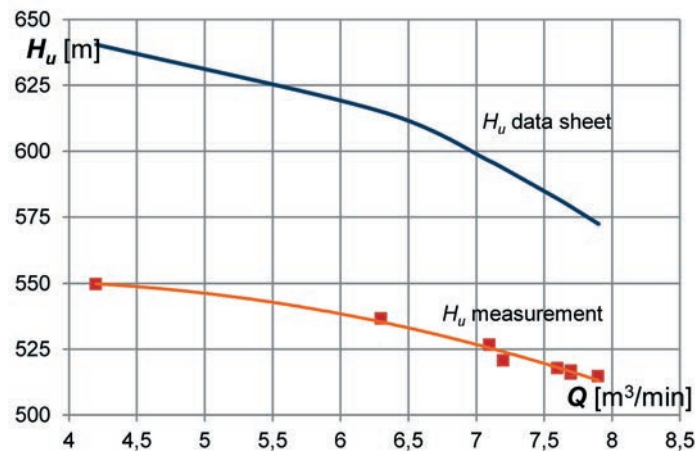


Fig. 3. Flow performance of pump 1 OW250/8

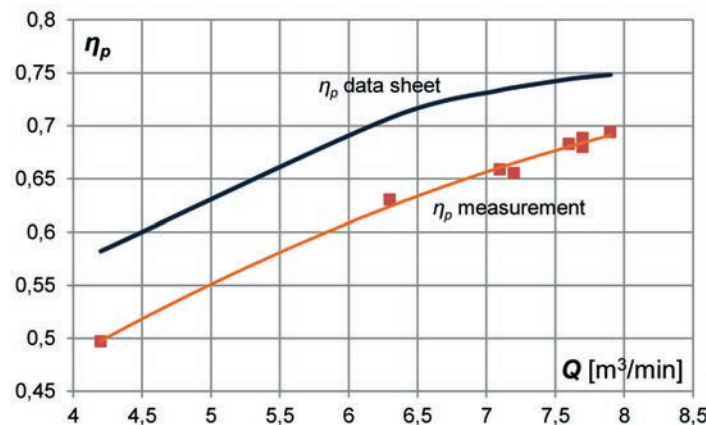


Fig. 4. Efficiency of pump 1 OW250/8

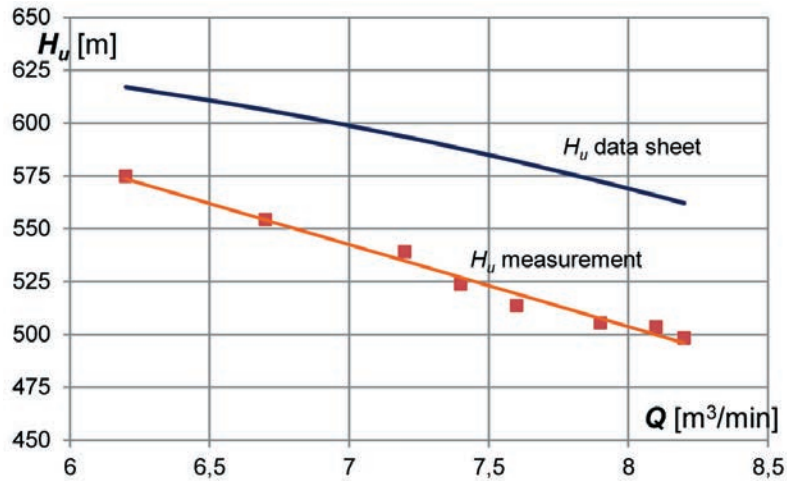


Fig. 5. Flow performance of pump 10 OW250/8

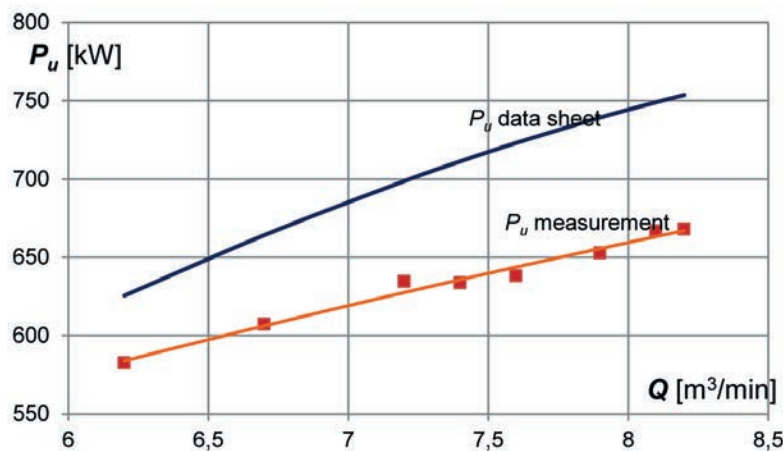


Fig. 6. Effective power of pump 10 OW250/8

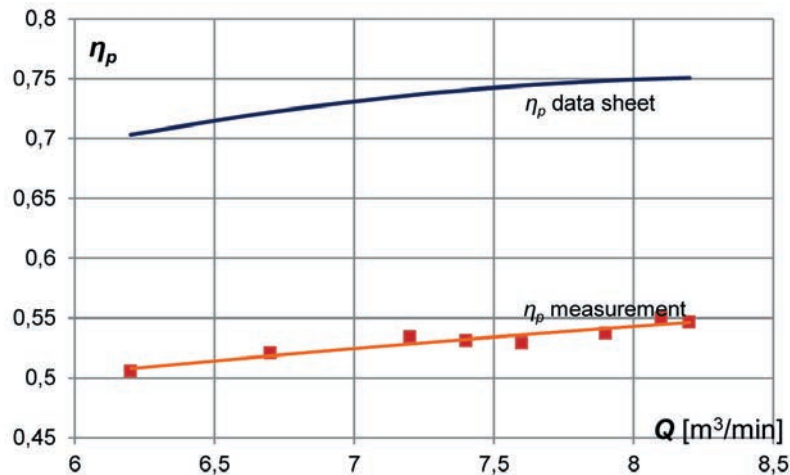


Fig. 7. Efficiency of pump 10 OW250/8

Such operational characteristics make pump operating parameters minimally dependent on choking. A distinct pump choking effect appears only when the gate valve is closed to a significant degree. Consequently, the pump operation measurements include narrow ranges for the pump capacity changes.

#### 4. OPERATING INDICATORS OF THE MAIN DEWATERING PUMPS

The main dewatering pumps run at a maximum capacity that is achievable for the pump system, i.e. geometrical pumping head and flow resistance in pipelines.

The choking regulation is not used due to energy losses. Therefore, the evaluation and analysis of pump operation and energy consumption only requires determination of relevant indices for the maximum capacity operation.

The efficiency, energy consumption and pumping unit cost indices were determined for the examined pump units and the results are presented in Table 1.

Table 1 also includes the relative pump head expressed as a ratio of effective head at actual conditions  $H_u$  to the data sheet head  $H_{uk}$  at the same flow. This fraction can be interpreted as a measure of the correct selection of a pump to lift the water to the required height. The calculated  $H_u/H_{uk}$  ratios allow the

statement that the pumps have been selected correctly for the requirements. The  $H_u/H_{uk}$  ratio of 0.92 for the examined pumping station indicates a slight overdimensioning of the pump system.

The ratio of pump efficiency  $\eta_p$  to the data sheet efficiency  $\eta_{pk}$  at a specified water stream can be considered a measure of the pump's condition. The lower value of this ratio indicates a poorer pump condition. In the examined pumps, the  $\eta_p/\eta_{pk}$  ratio is in a wide range. For pumps 1 and 3 it is above 0.90, and for pump 10 only 0.73. The condition of the pumps with a ratio below 0.80 can be considered unsatisfactory. The average value for all pumps in the pumping station is  $\eta_p/\eta_{pk} = 0.82$ .

**Table 1**  
**Operating parameters of the OW250/8 pumps at maximum capacity**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Average
<b>Volumetric stream <math>Q</math> [m<sup>3</sup>/min]</b>	7.9	8.1	9.2	8.1	8.5	8.4	8.0	9.2	7.6	8.2	8.3
<b>Effective head <math>H_u</math> [m]</b>	514.7	523.6	535.1	508.8	516.4	513.9	498.2	514.0	503.3	498.2	512.6
<b>Relative head <math>H_u/H_{uk}</math> [-]</b>	0.90	0.93	1.0	0.90	0.94	0.93	0.87	0.98	0.86	0.87	0.92
<b>Electrical power <math>P_{el}</math> [kW]</b>	1030	1214	1200	1195	1263	1275	1266	1399	1137	1314	1229
<b>Pump efficiency <math>\eta_p</math> [-]</b>	0.694	0.614	0.721	0.615	0.613	0.595	0.553	0.594	0.591	0.547	0.614
<b>Relative pump efficiency <math>\eta_p/\eta_{pk}</math> [-]</b>	0.93	0.82	0.97	0.82	0.81	0.79	0.74	0.80	0.79	0.73	0.82
<b>Energy consumption <math>q_P</math> [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	2.173	2.498	2.174	2.459	2.476	2.530	2.638	2.534	2.493	2.671	2.465
<b>Water pumping cost <math>q_E</math> [PLN/1000 m<sup>3</sup>]</b>	1012	1163	1012	1145	1153	1178	1228	1180	1161	1244	1148
<b>Pump operating time <math>\Delta\tau</math> [h]</b>	3336	12,032	757	21,000	24,000	29,017	24,015	6015	23,473	32,041	17,569

P1, P2,..., P10 – pump unit number

Table 1 also includes indices of pump energy consumption  $q_P$  and water pumping costs  $q_E$ . The  $q_P$  index is the amount of electrical energy in kWh necessary to pump 1 m<sup>3</sup> of water. The  $q_E$  index is the pumping cost of 1,000 m<sup>3</sup> at the price of PLN 465.70/MWh (September 2021, ca. fi100/MWh).

The energy consumption of the water pumping process was  $q_P = 2.173$ – $2.671$  kWh/m<sup>3</sup>, the mean value is  $q_P = 2.465$  kWh/m<sup>3</sup>. The cost of pumping 1000 m<sup>3</sup> of water is  $q_E = \text{PLN } 1012$ – $1244/1000$  m<sup>3</sup>, the mean value is  $q_E = \text{PLN } 1148/1000$  m<sup>3</sup>. The energy consumption of the water pumping process is also shown in Figure 8, where the red line marks the average value

for the main dewatering pumping station. The table includes the operating times of the individual pumps. The analysis of quality indices shows the impact of operating time on the pump condition and energy consumption.

Figure 9 shows the relationship between the operating time and energy consumption.

Obviously, the energy consumption curve is reciprocal to the efficiency curve, as shorter operating times correspond to lower energy consumption. The deterioration of the pump's technical condition caused by wear and tear causes an increased demand for the electrical energy needed to pump 1 m<sup>3</sup> of water.

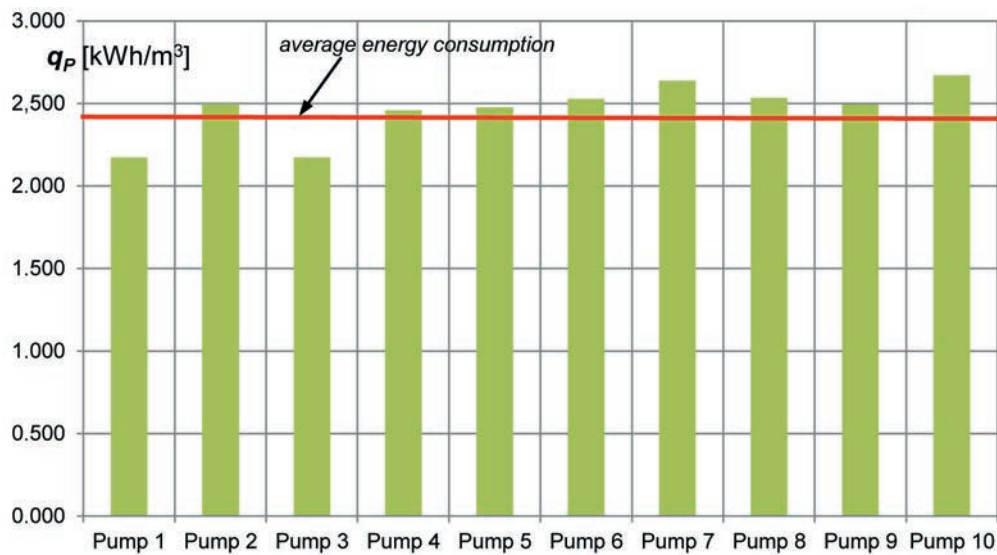


Fig. 8. Energy consumption of the water pumping process

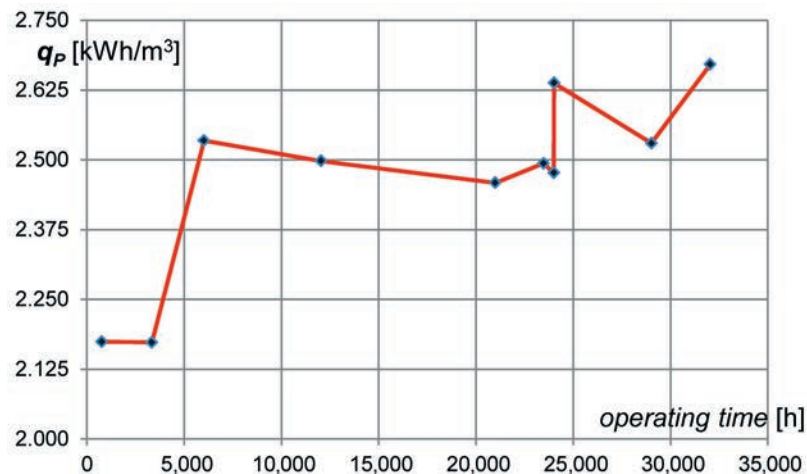


Fig. 9. Energy consumption vs. operating time

## 5. SUMMARY

The examined main dewatering pumping station (located at a depth of 500 m) has nine pump units. According to mining regulations, the required number of pumps to pump out the water inflow is 7.25 pump units – totalling 20.20 m<sup>3</sup>/min in capacity – should be in continuous operation.

The measurement results and the calculated performance and quality indices indicate the unsatisfactory or poor condition of most of the pumps. This is the result of long pump operating times without overhauls (6 pumps in excess of 20,000 hours. Water with mechanical pollutants and high salinity significantly increases the erosion wear of impellers and other pump parts. Most pumps have an efficiency 20% lower than the data sheet efficiency of new pumps. Such low efficiency obviously causes an increase in energy

consumption and unit water pumping costs. It can be said that the energy consumption and water pumping costs increase to the same degree as the efficiency is reduced, that is ca. 20%.

The overhauled pumps (Nos. 1 and 3) feature better performance and operating indicators, which proves the need for an adequate maintenance and repair policy.

The condition of the pumps in the main dewatering pumping station must be considered unsatisfactory. The pumping station has high indices of both energy consumption and operating costs.

## References

- [1] Inung A., Adnyano A., Bagaskoro M.: *Technical study of mine dewatering system in coal mining*. PROMINE 2020, 1: 28–33.
- [2] Gonet A., Stryczek S., Brudnik K.: *Causes and Consequences of Water Flux on the Example of Transverse Heading Mina in the Salt Mine "Wieliczka"*. Archives of Mining Sciences 2012, 57: 323–334.

- [3] Bukowski P.: *Evaluation of Water Hazard in Hard Coal Mines in Changing Conditions of Functioning of Mining Industry in Upper Silesian Coal Basin – USCB (Poland)*. Archives of Mining Sciences 2015, 60, 2: 455–475.
- [4] Rybicki Cz., Dubiel S., Blicharski J., Falkowicz S.: *Water Inflow Prognosis for the Gas Wells*. Archives of Mining Sciences 2006, 51, 2: 241–251.
- [5] Miladinović B., Ristić Vakanjac V., Bukumirović D., Dragišić V., Vakanjac B.: *Simulation of Mine Water Inflow: Case Study of the Štavalj Coal Mine (Southwestern Serbia)*. Archives of Mining Sciences 2015, 60, 4: 955–969.
- [6] Qazizada M.E., Pivarčiová E.: *Reliability of parallel and serial centrifugal pumps for dewatering in mining process*. Acta Montanistica Slovaca 2018; 23(2): 141–152.
- [7] Chen T., Riley C., Van Hentenryck P., Guikema S.: *Optimizing inspection routes in pipeline networks*. Reliability Engineering & System Safety 2020, 195: 106700.
- [8] Hancock S., Wolkersdorfer C.: *Renewed demands for mine water management*. Mine Water Environ 2012, 31(2): 147–158.
- [9] Zhang C., Zhang Y.: *Common cause and load-sharing failures-based reliability analysis for parallel systems*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2020, 22(1): 26–34.
- [10] Matysik A.: *Odwadnianie kopalń podziemnych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002.
- [11] Wojciechowski J., Mikoś M., Ptak J.: *Zastosowanie modelowania matematycznego do komputerowych obliczeń systemu głównego odwadniania kopalni*. Pompy. Pompownie 2006, 1(120): 26–30.
- [12] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Dz.U. 2017, poz. 1118.
- [13] Jędral W.: *Pompy wirowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [14] Wilk S., Golec K., Wilk A.: *Wirowe pompy stacjonarne, podręcznik doboru, instalowania i eksploatacji*. Zakład Mechaniki Przemysłowej ZAMEP Sp. z o.o., Gliwice 2015.
- [15] Szymański Z.: *Nowoczesne metody sterowania i badań diagnostycznych kopalnianych pomp głównego odwadniania*. Napędy i Sterowanie 2013, 2: 54–61.

EDWARD MICHŁOWICZ, Prof.  
JERZY WOJCIECHOWSKI, Ph.D., Eng.  
AGH University of Science and Technology  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland  
{michlowi, jwojcie}@agh.edu.pl



EDWARD MICHLOWICZ  
JERZY WOJCIECHOWSKI

## Analiza energochłonności pomp głównego odwadniania kopalń podziemnych

*Odwadnianie kopalń należy do głównych zadań i problemów eksploatacji w górnictwie, które nie wpływają bezpośrednio na wydobywanie, jednak stanowi nieodzowną działalność dla prawidłowej eksploatacji kopalń. Pompownie głównego odwadniania w kopalniach znajdują się na różnych poziomach, ale zawsze wysokość pompowania wynosi kilkaset metrów. Liczba pomp oraz czas ich pracy zależą od wielkości dopływów wód i jednoznacznie wynikają z przepisów. Ze względu na wydajność i wymaganą wysokość podnoszenia zapotrzebowanie mocy może znacznie przekraczać 1 MW. Dlatego prawidłowa eksploatacja pomp głównego odwadniania, przy niskiej energochłonności, stanowi podstawowy warunek ograniczenia kosztów wypompowania wody. Analizowana pompownia znajduje się na poziomie 500, jest wyposażona w dziesięć pomp OW-250/8 o wydajności  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,139 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Czas eksploatacji większości pomp przekracza 20 tysięcy godzin, co powoduje, że energochłonność wynosi od 2,17 do 2,67 kWh/m<sup>3</sup> wypompowanej wody. Wyniki przeprowadzonej analizy eksploatacyjnej i wartości wskaźników określających energochłonność odniesiono do wskaźników dla nowych pomp pracujących z parametrami (sprawność) katalogowymi. Na tej podstawie oceniono wpływ przekroczenia czasów między remontami na parametry eksploatacyjne i zwiększenie kosztów eksploatacji pomp głównego odwadniania.*

Słowa kluczowe: *charakterystyki pomp, energochłonność, koszty pompowania*

### 1. WPROWADZENIE

Do prawidłowego eksploataowania kopalń podziemnych potrzebnych jest szereg działań, które nie są bezpośrednio związane z wydobywaniem, ale są niezbędne dla jego realizacji i bezpieczeństwa. Jednym z ważniejszych procesów pomocniczych jest odwadnianie kopalń. Wody kopalniane mogą być pochodzenia naturalnego (wypływające z górotworu) oraz być sztucznie doprowadzane w wyniku realizacji procesu wydobywania [1]. Podstawowy problem stanowią wody pochodzenia naturalnego, ilość dopływającej wody ze skał może wynosić od kilku do kilkudziesięciu metrów sześciennych na minutę. Czynniki wpływające na ilość dopływającej wody oraz zagrożenia stąd wynikające są opisane w wielu pracach [2, 3]. Ilość dopływającej wody zależy przede wszystkim od warunków hydrologicznych i geomechanicznych [4]. Wpływ czynników losowych na dopływ wód kopalnianych jest analizowany przez Miladinovića [5] i Qazizada [6]. Dopływające wody kopalniane ze względów bezpie-

czeństwa ludzi i eksploatacji złóż muszą być wypompowane na powierzchnię [7–9]. Zadanie wypompowania wód kopalnianych jest realizowane przez system odwadniania kopalni głębinowej [10]. W systemie odwadniania kopalni można wyróżnić pompownie przodkowe, oddziałowe i głównego odwadniania – ich funkcjonowanie jest uzupełniane przez chodniki wodne. Zadaniem pompowni przodkowych i oddziałowych jest doprowadzenie wód kopalnianych do chodników wodnych i pompowni głównego odwadniania.

Systemy głównego odwadniania kopalń podziemnych można podzielić na jednostopniowe (z najniższego poziomu na powierzchnię) i kaskadowe (z wykorzystaniem pompowni pośredniej na mniejszej głębokości). Częściej spotykane są systemy jednostopniowe, czyli układy, gdzie zespoły pompowe znajdują się na najniższym poziomie wydobywczym i za pomocą rurociągów wysokociśnieniowych woda jest transportowana na powierzchnię. Wysokość pompowania często wynosi kilkaset metrów, dlatego pompy głównego odwadniania są pompami wielostopniowymi. Wysokość

pompowania i wymagana wydajność pomp powodują, że zapotrzebowanie mocy do ich zasilania jest liczone w megawatach. Pompownie głównego odwadniania umieszczone są w pobliżu szybów, co umożliwia skrócenie wysokociśnieniowych rurociągów tłocznych oraz ułatwia transport masywnych i wielkogabarytowych zespołów pompowych. Propozycja określenia sposobów i kosztów eksploatacji pompowni głównego odwadniania kopalń podziemnych jest przedstawiona w pracy Wojciechowskiego i in. [11].

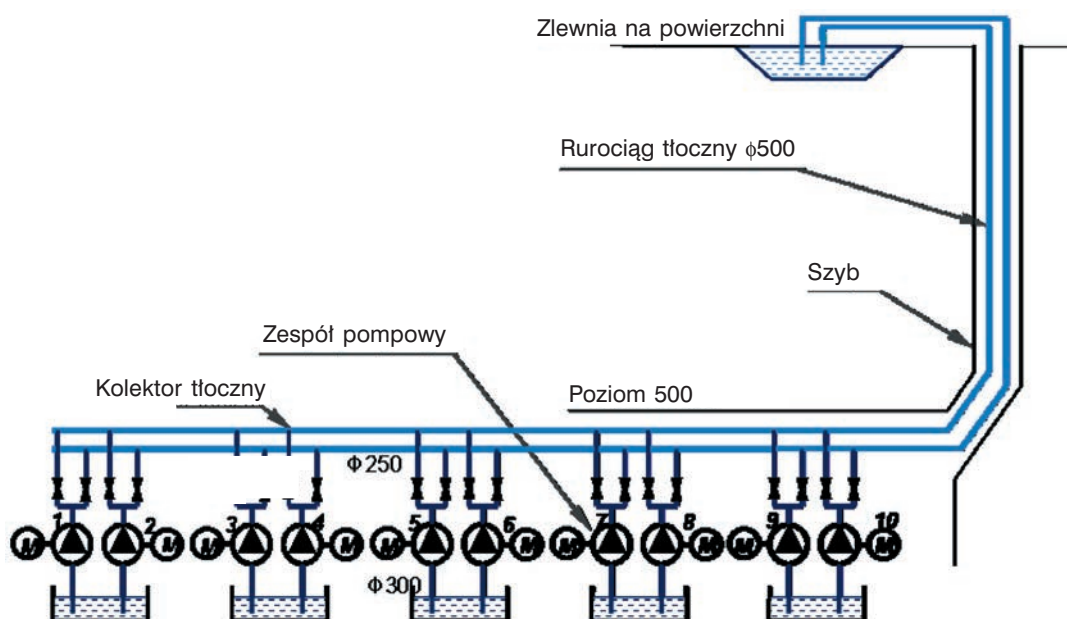
Wymagania w stosunku do urządzeń głównego odwadniania podlegają regulacjom zawartym w *Rozporządzeniu Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Wymagania, które muszą spełniać pompownie głównego odwadniania, są określone w Dziale VI: *Maszyny, urządzenia i instalacje oraz obiekty budowlane zakładu górniczego*, Rozdział 3: *Urządzenia i układy głównego odwadniania* [12].

Dla przeprowadzanych w pracy analiz najistotniejsze są wymagania, które stwierdzają, że odprowadzenie najwyższego dobowego dopływu wody musi być zrealizowane w czasie nie dłuższym niż 20 godzin; minimalną liczbę pomp w komorze pompowni głównego odwadniania oblicza się według wzoru:  $i = 2n + 1$  ( $n$  – liczba pomp w zespole). System głównego odwadniania wyposaża się w co najmniej dwa tłoczne rurociągi o łącznej przepustowości nie mniejszej niż łączna wydajność znamionowa wymaganej liczby zainstalowanych pomp przy prędkości przepływu nie większej niż 3 m/s [13, 14].

## 2. SYSTEM GŁÓWNEGO ODWADNIANIA KOPALNI PODZIEMNEJ

Analizowany system głównego odwadniania (rys. 1) w kopalni podziemnej znajduje się na poziomie 500 m. Wielostopniowe pompy zainstalowane są w komorze pompowni w pobliżu szybu. W pompowni głównego odwadniania zainstalowanych jest dziesięć zespołów pompowych składających się z pomp OW250/8 i silników SCUd134u. Każdy zespół pompowy podłączony jest do dwóch rurociągów tłocznych o średnicach 500 mm (rys. 1), którymi woda pompowana jest na powierzchnię. Na podstawie warunków hydrologicznych i wielkości podziemnych wyrobisk prognozowany dopływ wody wynosi  $16,83 \text{ m}^3/\text{min}$ , przy tym natężeniu strumienia wody dobowy dopływ jest równy  $24\,235 \text{ m}^3$ . Pojemność chodników wodnych, w których gromadzona jest woda, wynosi  $20\,196 \text{ m}^3$ . W przypadku zaprzestania pompowania wody czas napełnienia chodników wodnych wynosi około 24 godzin. Schemat badanego systemu głównego odwadniania znajduje się na rysunku 1.

Przy prognozowanym dopływie wód kopalnianych wymagana całkowita wydajność pomp, spełniająca ograniczenia przepisów górniczych, wynosi  $Q = 20,20 \text{ m}^3/\text{min}$ , natomiast wysokość podnoszenia pompy  $H_u = 530 \text{ m}$ . Zainstalowane w pompowni ośmiostopniowe pompy OW250/8 mają wydajność znamionową  $Q = 8,33 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ) i wysokość podnoszenia  $H_u = 560 \text{ m}$ . Wymagania określone przepisami górniczymi są spełnione przy ciągłej pracy dwóch pomp i trzeciej pracującej przez połowę czasu. Liczba wymaganych pomp wynosi siedem. W pompowni jest dziesięć zespołów pompowych, czyli analizowany układ głównego odwadniania jest przewymiarowany.



Rys. 1. Schemat systemu głównego odwadniania

Pompy typu OW250 są produkowane przez Grupę Powen – Wafapomp SA. Zabrze. Pompy typu OW są stacjonarnymi, poziomymi urządzeniami wielostopniowymi. Przeznaczone są do odwadniania kopalń głębinowych i pompowania wód lekko zanieczyszczonych mechanicznie i zasolonych. Mogą podnosić wodę do 800 m. Cechują się solidną konstrukcją przystosowaną do niekorzystnych warunków eksploatacyjnych typowych dla odwadniania kopalń.

Wody dopływające do pompowni są silnie zanieczyszczone mechanicznie, dlatego przed doprowadzeniem ich do studni pomp poddaje się je oczyszczeniu w osadnikach. W osadnikach z wody usuwane są największe frakcje zanieczyszczeń mechanicznych. Pompowana woda jest silnie zasolona (przewodnictwo właściwe mieści się w przedziale od 5,35 do 9,18 mS/cm) oraz zanieczyszczona zawiesinami o bardzo drobnym uziarnieniu w granicach 9,6–11,9  $\mu\text{m}$ .

### 3. CHARAKTERYSTYKI ZESPOŁÓW POMPOWYCH

W pompowni głównego odwadniania na poziomie 500 m zrealizowano pomiary, które były niezbędne do wykonania charakterystyk przepływowych pomp. Mierzono: strumień wody w kolektorze głównym, ciś-

nienia w króćcu ssawnym i tłocznym oraz moc elektryczną zasilającą silniki [15]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy zespół pompowy (nr 2 – silnik typu SCDdm 134u, pompa typu OW-250AM/8).

Do pomiarów strumienia wykorzystano przepływomierz ultradźwiękowy FlowKat 200. Ciśnienia były mierzone za pomocą manometrów tarczowych. Podciśnienie za pomocą wakuometru o zakresie 0–(–)0,1 MPa; ciśnienie na tłoczeniu za pomocą manometrów o zakresie pomiarowym 0–8 MPa. Pobór mocy elektrycznej był mierzony analizatorem SENTRON PAC3200. Dławienie pomp odbywało się za pomocą zasuw, które zainstalowane są w rurociągach łączących pompy z głównym kolektorem. Pomiary były robione po ustaleniu się warunków przepływu.

Użyteczną wysokość podnoszenia  $H_u$  wyznaczono z zależności:

$$H_u = \frac{p_t - p_s}{\rho g} + \frac{c_t^2 - p_s^2}{\rho g} + \Delta h_m \quad (1)$$

gdzie:

- $p_s, p_t$  – ciśnienie w króćcu ssawnym i tłocznym [Pa],
- $c_s, c_t$  – prędkość wody w króćcu ssawnym i tłocznym [m/s],
- $\rho$  – gęstość cieczy [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $\Delta h_m$  – wysokość przewyższenia manometru na tłoczeniu względem manometru na ssaniu [m].



Rys. 2. Zespół pompowy nr 2

Prędkości w króćcu ssawnym i tłocznym obliczono z wykorzystaniem strumienia objętości wody i pola przekroju króćców:

$$c = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2)$$

- $c$  – średnia prędkość wody w króćcach [m/s],
- $\dot{Q}$  – strumień objętości wody [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- $A$  – pole przekroju [ $\text{m}^2$ ].

Moc użyteczna, czyli przekazana do strumienia pompowanej wody, jest określana z zależności:

$$P_u = \rho g H_u \dot{Q} \quad (3)$$

Sprawność zespołu pompowego jest odniesiona do mocy doprowadzanej do silników elektrycznych:

$$\eta_{zp} = \frac{P_u}{P_{el}} = \frac{\rho g H_u \dot{Q}}{P_{el}} \quad (4)$$

Moc na wale pompy wyznaczono z uwzględnieniem sprawności silnika elektrycznego. Założono stałą wartość sprawności silnika ( $\eta_{sel} = 0,93$ ).

Moc na wale pompy:

$$P_m = \eta_{sel} P_{el} \quad (5)$$

Sprawność pompy:

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_m} = \frac{\eta_{zp}}{\eta_{sel}} \quad (6)$$

Zależności (1)–(6) zostały wykorzystane do obliczenia charakterystyk przepływowych pomp.

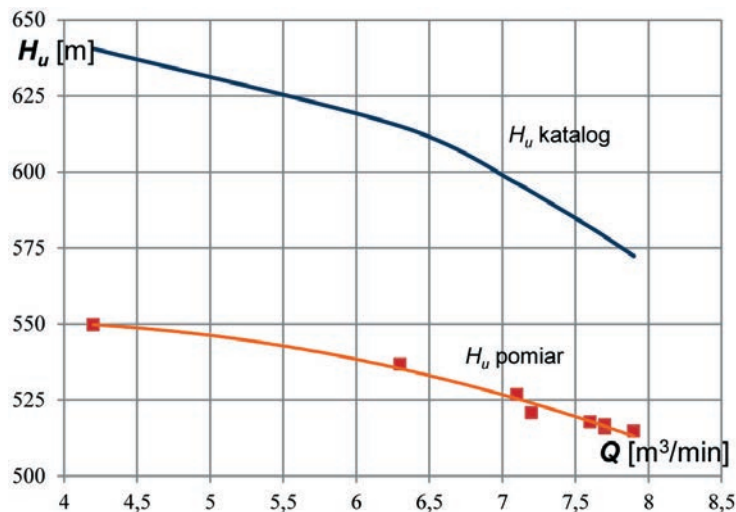
W czasie pomiarów wyznaczono charakterystyki wszystkich pomp. Pompy dławiono w niewielkim przedziale zmian ich wydajności. Postępowano tak z tego względu, że pompy głównego odwadniania są eksploatowane przy maksymalnej wydajności. W pracy przedstawiono charakterystyki tylko dwóch pomp: pompy nr 1, która była po przeprowadzonym remoncie oraz pompy nr 10, która jest najbardziej wyeksploatowana. W celu oceny stanu pomp na rysunkach

naniesione są również fragmenty katalogowych charakterystyk w zakresie mierzonych zmian wydajności pomp.

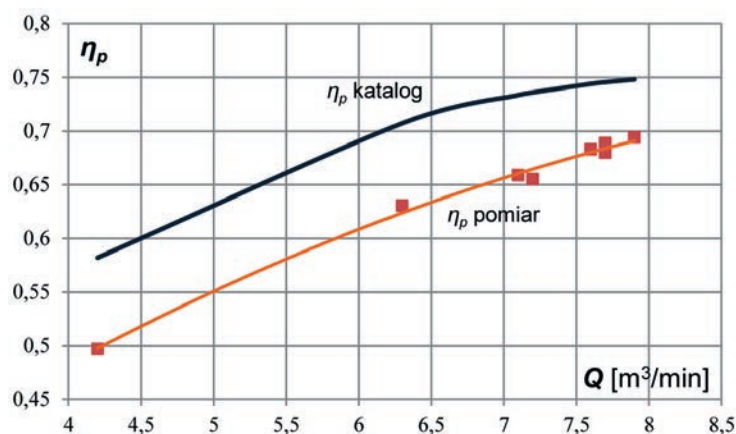
Na rysunkach 3 i 4 znajdują się charakterystyki pompy nr 1. Pompa nr 1 w okresie pomiarów pracowała po remoncie około 3340 godzin. Dzięki temu uzyskane charakterystyki znacznie mniej odbiegają od charakterystyk katalogowych w porównaniu z charakterystykami pomp, które eksploatowano powyżej 20 000 godzin. Sprawność tej pompy jest mniejsza od sprawności katalogowej od około 8% przy wydajności 8 m<sup>3</sup>/min do 14% przy wydajności 4,5 m<sup>3</sup>/min.

Czas eksploatacji badanej pompy nr 10 wynosił około 32 000 godzin. Długi okres eksploatacji szczególnie mocno odzwierciedla przebieg charakterystyki sprawności pompy. Sprawność pompy w porównaniu ze sprawnością katalogową obniżyła się o około 27%. W takim samym stopniu zwiększyła się energochłonność tego zespołu pompowego.

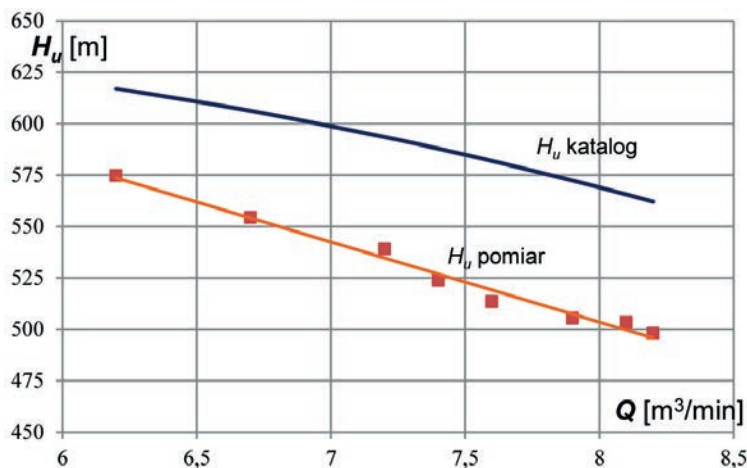
Charakterystyki pompy nr 10 zamieszczono na rysunkach 5–7. Jest to pompa najbardziej wyeksploatowana w badanej pompowni.



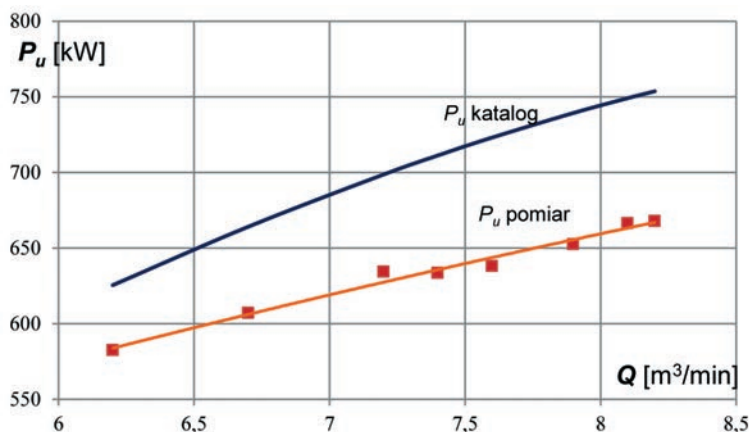
Rys. 3. Charakterystyka przepływu pompy nr 1 OW250/8



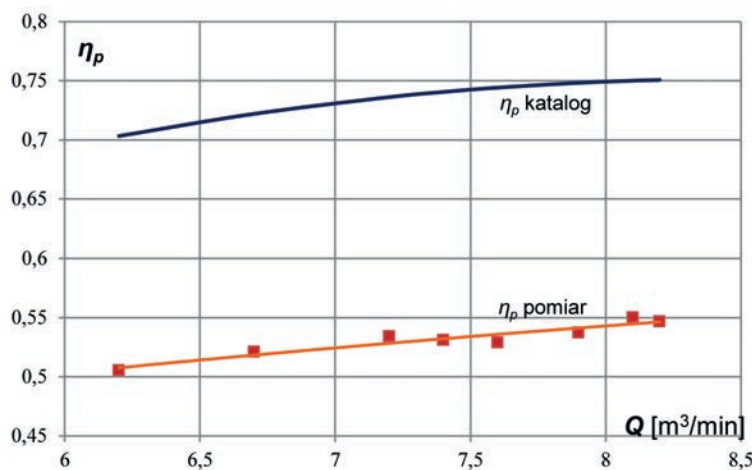
Rys. 4. Charakterystyka sprawności pompy nr 1 OW250/8



Rys. 5. Charakterystyka przepływu pompy nr 10 OW250/8



Rys. 6. Charakterystyka mocy użytecznej pompy nr 10 OW250/8



Rys. 7. Charakterystyka sprawności pompy nr 10 OW250/8

Charakter pracy pomp głównego odwadniania powoduje, że charakterystyka użytecznej wysokości podnoszenia w minimalnym stopniu zależy od dławienia. Decydującą rolę odgrywa geometryczna wysokość podnoszenia. Dla pompowni wynosi ona  $H_g = 489$  m. Przyrost ciśnienia w pompie zależy od oporów przepływu jest stosunkowo niewielki – wynosi on kilka procent

(2,0–9,5%, średnio około 5%) w odniesieniu do geometrycznej wysokości podnoszenia. Rezultatem takiej charakterystyki układu pompowego jest niewielka zależność parametrów pracy pompy od dławienia. Wyraźny efekt dławienia pomp występuje przy znacznym stopniu zamknięcia zasuwy. Dlatego pomiary pracy pomp obejmują wąskie przedziały zmiany wydajności pompy.

#### 4. WSKAŹNIKI EKSPLOATACYJNE POMP GŁÓWNEGO ODWADNIANIA

Pompy głównego odwadniania pracują z maksymalną wydajnością, jaka jest możliwa dla układu pompowego, czyli geometrycznej wysokości pompowania i oporów przepływu w rurociągach. Ze względu na straty energii nie stosuje się regulacji dławieniowej. Z tych powodów do analizy i oceny stanu pomp i ich energochłonności wystarczy wyznaczyć odpowiednie wskaźniki dla punktów pracy o największej wydajności.

Dla badanych zespołów pompowych głównego odwadniania wyznaczono współczynniki sprawności, energochłonności oraz jednostkowych kosztów pompowania. Uzyskane wyniki umieszczono w tabeli 1.

W tabeli 1 zawarto również względną wysokość podnoszenia pompy określoną jako stosunek użytecznej wysokości podnoszenia w warunkach rzeczywistych  $H_u$  do katalogowej wysokości podnoszenia pompy  $H_{uk}$  przy takim samym przepływie. Wartości tego

ułamka można interpretować jako miarę prawidłowości doboru pompy do realizacji zadania podnoszenia wody na wymaganą wysokość. Obliczone wartości  $H_u/H_{uk}$  pozwalają stwierdzić, że pompy są prawidłowo dobrane do wymagań układu pompowego. Wartość  $H_u/H_{uk}$  na poziomie 0,92 dla analizowanej pompowni głównego odwadniania świadczą o niewielkim stopniu przewymiarowania układu pompowego.

Wartość ułamka współczynnika sprawności  $\eta_p$  do sprawności katalogowej  $\eta_{pk}$  pompy przy ustalonym strumieniu wody można potraktować jako miarę jakości stanu pomp. Mniejsza wartość tego stosunku oznacza gorszy stan eksploatowanej pompy. Dla badanych pomp stosunek  $\eta_p/\eta_{pk}$  przyjmuje wartości z szerokiego przedziału. Dla pomp 1 i 3 ma on wartość powyżej 0,90, natomiast dla pompy 10 tylko 0,73. Stan pomp, dla których ułamek ten przyjmuje wartości poniżej 0,80, można uznać za niezadowalający. Wartość średnia dla wszystkich pomp w pompowni wynosi  $\eta_p/\eta_{pk} = 0,82$ .

Tabela 1

Zestawienie parametrów pracy pomp OW250/8 przy maksymalnej wydajności

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Średnia
Strumień objętości $Q$ [m <sup>3</sup> /min]	7,9	8,1	9,2	8,1	8,5	8,4	8,0	9,2	7,6	8,2	8,3
Użyteczna wysokość podnoszenia $H_u$ [m]	514,7	523,6	535,1	508,8	516,4	513,9	498,2	514,0	503,3	498,2	512,6
Względna wysokość podnoszenia $H_u/H_{uk}$ [-]	0,90	0,93	1,0	0,90	0,94	0,93	0,87	0,98	0,86	0,87	0,92
Moc elektryczna $P_{el}$ [kW]	1030	1214	1200	1195	1263	1275	1266	1399	1137	1314	1229
Sprawność pompy $\eta_p$ [-]	0,694	0,614	0,721	0,615	0,613	0,595	0,553	0,594	0,591	0,547	0,614
Względna sprawność pompy $\eta_p/\eta_{pk}$ [-]	0,93	0,82	0,97	0,82	0,81	0,79	0,74	0,80	0,79	0,73	0,82
Zużycie energii elektrycznej $q_p$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	2,173	2,498	2,174	2,459	2,476	2,530	2,638	2,534	2,493	2,671	2,465
Koszt pompowania wody $q_E$ [zł/1000 m <sup>3</sup> ]	1012	1163	1012	1145	1153	1178	1228	1180	1161	1244	1148
Czas pracy pompy $\Delta\tau$ [h]	3336	12 032	757	21 000	24 000	29 017	24 015	6015	23 473	32 041	17 569

P1, P2, ..., P10 – numery zespołów pompowych

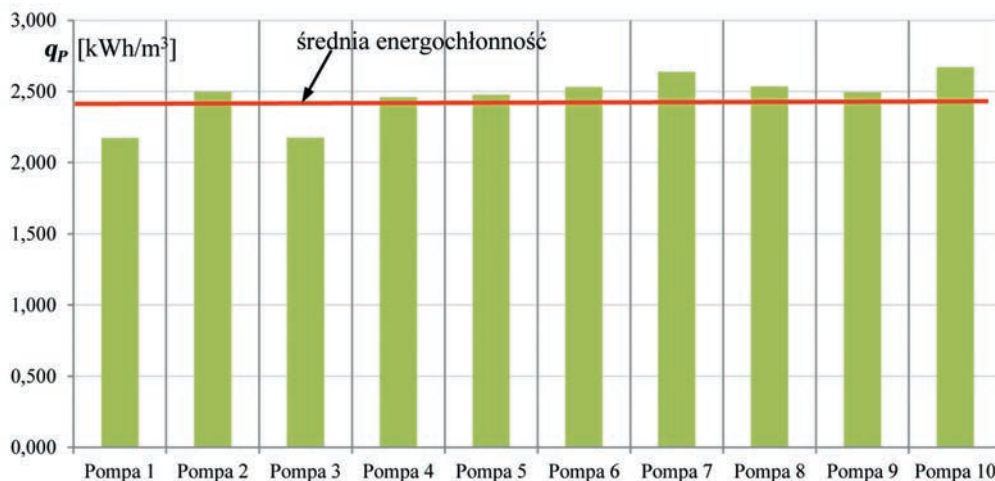
W tabeli 1 znajdują się również współczynniki określające energochłonność pomp  $q_p$  oraz koszty pompowania wody  $q_E$ . Współczynnik  $q_p$  [kWh] określa ilość energii elektrycznej potrzebnej do wypompowania 1 m<sup>3</sup> wody. Natomiast współczynnik  $q_E$  określa koszt wypompowania 1000 m<sup>3</sup> wody przy cenie 465,70 zł/MWh (wrzesień 2021).

Dla zespołów pompowych pracujących w pompowni energochłonność procesu wypompowania wody przyjmuje wartości  $q_p = 2,173$ – $2,671$  kWh/m<sup>3</sup>, wartość średnia wynosi  $q_p = 2,465$  kWh/m<sup>3</sup>. Koszty wypompowania 1000 m<sup>3</sup> wody wynoszą  $q_E = 1012$ – $1244$  zł/1000 m<sup>3</sup>, wartość średnia  $q_E = 1148$  zł/1000 m<sup>3</sup>. Energochłonność pompowania wody przedstawiona jest również

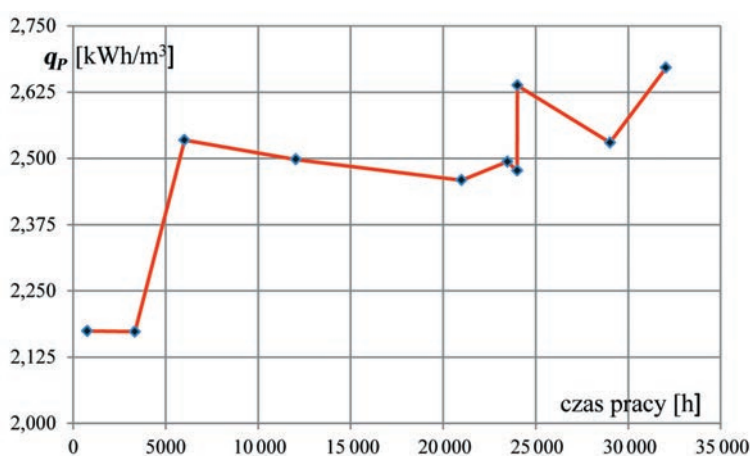
na rysunku 8, linią czerwoną zaznaczona jest średnia wartość dla pompowni głównego odwadniania.

W tabeli poszczególnym pompom przypisano ich czasy pracy. Analiza wartości wskaźników jakościowych obrazuje wpływ czasu eksploatacji na stan i energochłonność pomp. Zależność energochłonności od czasu pracy ilustruje rysunek 9.

Przebieg krzywej energochłonności jest przeciwnym, co jest oczywiste, charakterystyki sprawności od czasu pracy. Krótszym okresom pracy odpowiada niska energochłonność, pogorszenie stanu technicznego pomp wynikające z eksploatacyjnego zużycia powoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną do wypompowania 1 m<sup>3</sup> wody.



Rys. 8. Energochłonność procesu wypompowania wody



Rys. 9. Zależność energochłonności pomp od czasu pracy

## 5. PODSUMOWANIE

W analizowanej pompowni głównego odwadniania, znajdującej się na poziomie 500 m kopalni podziemnej, pracuje dziesięć zespołów pompowych. Do wypompowania dopływu wody, zgodnie z wymaganiami przepisów górniczych, potrzebnych jest siedem pomp. W pracy ciągłej powinno być 2,5 zespołu pompowego o sumarycznej wydajności 20,20 m<sup>3</sup>/min.

Wyniki pomiarów oraz wyznaczone na ich podstawie charakterystyki i wskaźniki jakościowe wskazują na niezadowalający lub zły stan większości pomp. Jest to konsekwencja długich czasów pracy pomp bez remontów (6 pomp powyżej 20 000 godzin). Zła jakość wody zawierającej zanieczyszczenia mechaniczne i silnie zasolonej zwiększa znacznie zużycie erozyjne wirników oraz innych elementów konstrukcyjnych pomp, co przekłada się na spadek sprawności pomp. Większość pomp ma sprawność około 20% niższą w odniesieniu do sprawności katalogowej pomp nowych. Tak niskie sprawności pomp w oczywisty sposób

przekładają się na wzrost energochłonności i kosztów jednostkowych wypompowania wody. Można stwierdzić, że energochłonność i koszty procesu wypompowania wody wzrastają w takim samym stopniu, w jakim obniża się sprawność, czyli o około 20%.

Pompy po remoncie (nr 1 i 3) mają znacznie korzystniejsze charakterystyki i wskaźniki eksploatacyjne. Świadczy to o konieczności prowadzenia regularnych przeglądów i remontów.

Stan pomp w omawianej pompowni głównego odwadniania należy uznać za niezadowalający. Eksploatacja tej pompowni obciążona jest wysokimi wartościami wskaźników energochłonności i kosztów eksploatacji.

### Literatura

- [1] Inung A., Adnyano A., Bagaskoro M.: *Technical study of mine dewatering system in coal mining*. PROMINE 2020, 1: 28–33.
- [2] Gonet A., Stryczek S., Brudnik K.: *Causes and Consequences of Water Flux on the Example of Transverse Heading Mina in the Salt Mine „Wieliczka”*. Archives of Mining Sciences 2012, 57: 323–334.

- [3] Bukowski P.: *Evaluation of Water Hazard in Hard Coal Mines in Changing Conditions of Functioning of Mining Industry in Upper Silesian Coal Basin – USCB (Poland)*. Archives of Mining Sciences 2015, 60, 2: 455–475.
- [4] Rybicki Cz., Dubiel S., Blicharski J., Falkowicz S.: *Water Inflow Prognosis for the Gas Wells*. Archives of Mining Sciences 2006, 51, 2: 241–251.
- [5] Miladinović B., Ristić Vakanjac V., Bukumirović D., Dragišić V., Vakanjac B.: *Simulation of Mine Water Inflow: Case Study of the Štavalj Coal Mine (Southwestern Serbia)*. Archives of Mining Sciences 2015, 60, 4: 955–969.
- [6] Qazizada M.E., Pivarčiová E.: *Reliability of parallel and serial centrifugal pumps for dewatering in mining process*. Acta Montanistica Slovaca 2018, 23(2): 141–152.
- [7] Chen T., Riley C., Van Hentenryck P., Guikema S.: *Optimizing inspection routes in pipeline networks*. Reliability Engineering & System Safety 2020, 195: 106700.
- [8] Hancock S., Wolkersdorfer C.: *Renewed demands for mine water management*. Mine Water Environ 2012, 31(2): 147–158.
- [9] Zhang C., Zhang Y.: *Common cause and load-sharing failures-based reliability analysis for parallel systems*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2020, 22 (1): 26–34.
- [10] Matysik A.: *Odwadnianie kopalń podziemnych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002.
- [11] Wojciechowski J., Mikoś M., Ptak J.: *Zastosowanie modelowania matematycznego do komputerowych obliczeń systemu głównego odwadniania kopalni*. Pompy. Pompownie 2006, 1 (120): 26–30.
- [12] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Dz.U. z 2017 r., poz. 1118.
- [13] Jędral W.: *Pompy wirowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [14] Wilk S., Golec K., Wilk A.: *Wirowe pompy stacjonarne, podręcznik doboru, instalowania i eksploatacji*. Zakład Mechaniki Przemysłowej ZAMEP Sp. z o.o., Gliwice 2015.
- [15] Szymański Z.: *Nowoczesne metody sterowania i badań diagnostycznych kopalnianych pomp głównego odwadniania*. Napędy i Sterowanie 2013, 2: 54–61.

prof. EDWARD MICHŁOWICZ  
dr inż. JERZY WOJCIECHOWSKI  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
{michlowi, jwojcie}@agh.edu.pl