



NAUKA – **TECHNIKA** – TECHNOLOGIA

S E R I A W Y D A W N I C Z A A G H

T O M 9



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2024

NAUKA – TECHNIKA – TECHNOLOGIA

S E R I A W Y D A W N I C Z A A G H

T O M 9



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2024

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2024

ISBN 978-83-68219-19-7

ISSN 3071-7027

Monografia elektroniczna dostępna online.

DOI: <https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7>

Publikacja może być rozpowszechniana zgodnie z licencją Creative Commons CC BY 4.0

Komitet Redakcyjny serii „Nauka – Technika – Technologia”:

redaktor: *prof. dr hab. inż. Andrzej Gonet* (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków)

sekretarz: *dr inż. Robert Rado* (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków)

Zamieszczone w tomie publikacje zostały pozytywnie zaopiniowane przez recenzentów wyznaczonych przez Komitet Redakcyjny serii.

Opracowanie redakcyjne i korekta: *Kamila Zimnicka*

Projekt okładki i strony tytułowej serii: *Paweł Sepielak*

Skład komputerowy: Andre

Wydawnictwa AGH

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

Spis treści

Joanna Augustyn-Nadzieja, Wiktoria Gut

- Druk 3D i mikromodyfikacje stopu Co-Cr-W-Mo.
Nowa generacja stomatologii cyfrowej 5

Adam Ciupa

- Analiza mikroklimatu pomieszczenia mieszkalnego 21

*Filip Durlik, Katarzyna Bańczyk, Radosław Dziubacki,
Dominik Latoń, Aleksander Skala, Jakub Grela*

- Modułowe oświetlenie skupione na człowieku
jako element systemu automatyki budynkowej – budowa i zastosowanie 43

Jakub Faber, Eugeniusz Ziółkowski

- Wybrane sensory w mikroprocesorowym monitorowaniu
parametrów środowiskowych powietrza 59

Zbigniew Fafara, Rafał Matuła

- Prędkość rozchodzenia się w rurociągu fali ciśnienia
powstałej po uderzeniu hydraulicznym 71

Alicja Ossera

- Termiczne przekształcanie odpadów
jako ekologiczny sposób na ich zagospodarowanie 91

Łukasz Ruba, Ryszard Błażej, Jakub Hulek, Roman Kokoszka, Joanna Janik-Kokoszka

- Łatwo dostępny spektroskop o dużej rozdzielczości
z dedykowaną aplikacją mobilną
pozwalającą na analizę otrzymanego spektrum 111

Jan Adam Soboń, Andrzej Bezkorowajny

- Wykorzystanie potencjału energetycznego
wód geotermalnych kompleksu jurajskiego
w północno-zachodnim rejonie Tarnowa 131

Yevhen Stavychnyi, Yaroslav Femiak, Oleg Vytyaz, Jan Ziaja

- Features of drilling and improving the quality of well
cementing in conditions of abnormally low reservoir pressures 147

Druk 3D i mikromodyfikacje stopu Co-Cr-W-Mo. Nowa generacja stomatologii cyfrowej

Joanna Augustyn-Nadzieja¹ , Wiktoria Gut²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Koło Naukowe Promat, Koło Naukowe Powierzchnia, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków

Streszczenie: Zastosowanie technologii druku 3D w sektorze protetycznym umożliwia dokładne odwzorowanie konkretnego przypadku braków uzębienia u pacjenta bez generowania odpadów materiałowych. Dzięki precyzji i dokładności coraz częściej stosowana jest technika selektywnego stapiania proszków metali DLMS (*direct metal laser sintering*). Badania naukowe wykonane w ramach prezentowanej pracy polegały na ocenie wpływu zmienności grubości warstwy drukowanych próbek (odpowiednio 20 μm i 30 μm) oraz późniejszej obróbki cieplnej na własności dentystycznego stopu Co-Cr z mikrododatkami wolframu i molibdenu. Wykorzystane do badań próbki metaliczne zostały wykonane w pracowni protetycznej przez technika protetyka w technologii DMLS z proszku metalicznego Co-Cr-W-Mo Adorbond CC firmy Ador ze zmiennym parametrem druku 3D, tj. wysokością druku warstwy odpowiednio 20 μm i 30 μm . Kolejno próbki zostały poddane obróbce cieplnej (wyżarzaniu w 1150°C przez 1 h). W pracy dokonano analizy porównawczej badanych próbek otrzymanych techniką addytywną (DLMS) z grubością warstwy druku 20 μm i 30 μm przed obróbką cieplną i po niej. Badania wykonano z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej (LM) oraz elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM) wraz z mikroanalizą składu chemicznego z zastosowaniem spektroskopii energodispersyjnej (EDS), dodatkowo badania uzupełniono o pomiary twardości.

Słowa kluczowe: druk 3D, DMLS, protetyka stomatologiczna, stop Co-Cr-W-Mo, fazy węglkowe, SEM, EDS

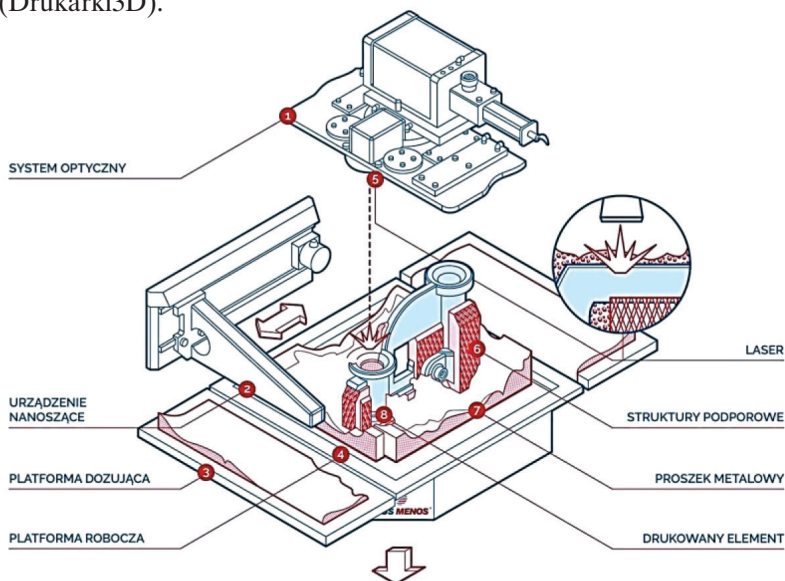
3D PRINTING AND CO-CR-W-MO ALLOY MICROMODIFICATIONS. THE NEW GENERATION OF DIGITAL DENTISTRY

Abstract: The advent of 3D printing technology in the prosthetics sector makes it possible to accurately reproduce a patient's specific case of missing teeth, without generating material waste. Due to its precision and accuracy, the technique of selective fusion of metal powders DLMS (*direct metal laser sintering*) is increasingly being used. The research that was carried out within the scope of the presented work consisted in the evaluation of the influence of 3D printing parameter variation and heat treatment on the properties of a dental Co-Cr alloy with tungsten and molybdenum micro-additives. The metallic specimens used in the study were fabricated in the prosthetic laboratory by a dental technician using DMLS technology from Ador's Co-Cr-W-Mo Adorbond CC metallic powder with a variable 3D printing parameter, i.e. layer printing thicknesses of 20 μm and 30 μm , respectively. The samples were then heat treated (annealed at 1150°C for 1 h). In this study, microstructural analysis using light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM) was compared and performed along with microanalysis of the chemical composition using energy-dispersive spectroscopy (EDS) for all the tested samples produced with print layer thicknesses of 20 and 30 μm before and after heat treatment.

Keywords: 3D printing, DMLS, dental prosthetics, Co-Cr-W-Mo alloy, carbide phases, SEM, EDS

1. Wprowadzenie

Od wieków cywilizacja boryka się z problemami dotyczącymi uzębienia, co utrudnia dodatkowo indywidualna anatomia szczękowa pacjenta. Współczesne pracownie protetyki stomatologicznej mają za zadanie nie tylko leczenie, ale także uzupełnianie ubytków braków zębowych protezami, które spełniają wymagania dotyczące komfortu psychicznego i fizycznego pacjenta (Augustyn-Pieniążek i in. 2015). Ważne są również walory estetyczne, trwałość czy biokompatybilność elementu w specyficznym środowisku jamy ustnej (Hedberg i in. 2014, Lu i in. 2014). Nowoczesna technika przyrostowa DMLS (*direct metal laser sintering*) jest zbliżona do metody SLS (*selective laser sintering*). Różnice w tego rodzaju technikach druku 3D spowodowane są tym, że sproszkowany materiał nie jest spiekany, tylko całkowicie przetapiany. Pozwala to na dalszą obróbkę bez zmiany własności drukowanego elementu (Budzik i in. 2022). Na rysunku 1 przedstawiono schemat budowy przykładowej drukarki 3D pracującej w technologii DMLS (Drukarki3D).



Rys. 1. Budowa drukarki 3D projektu graficznego A. Janiszewskiej

Proces druku DMLS składa się z trzech głównych etapów:

1. Wypełnienie komory roboczej gazem obojętnym oraz podgrzanie temperatury.
2. Rozprowadzenie przez zgarniacz na platformie roboczej cienkiej warstwy proszku, którą następnie skanujący laser selektywnie przetapia, tworząc przetopioną powierzchnię metaliczną.
3. Obniżenie platformy roboczej o wartość odpowiadającą wysokości warstwy druku i przykrycie jej kolejną warstwą proszku. W ten sposób powtarza się proces aż do uzyskania gotowego wyrobu.

Najważniejszym parametrem ograniczającym pracę drukarki 3D jest wielkość przestrzeni roboczej (SKRIM). W urządzeniach dostępnych na rynku wynosi maksymalnie 400 mm × 400 mm × 400 mm. Bardzo ważnym parametrem wpływającym bezpośrednio na jakość elementu drukowanego jest wysokość warstwy druku. Grubość uzyskanej warstwy druku zależy przede wszystkim od użytego proszku oraz jego własności, tj. kształtu, wielkości cząstek, sypkości czy gęstości. Wielkość cząstek proszku użytego w technice przyrostowej DLMS mieści się w przedziale 20–80 μm. Należy pamiętać, że im cieńsza warstwa, tym czas powstania elementu (druku) się wydłuża. Parametr ustawienia wysokości druku warstwy wpływa także na jakość uzyskanej powierzchni, jej chropowatość oraz precyzję wykonania elementu protetycznego. Kolejnym parametrem jest dokładność druku, która w przypadku metody DLMS wynosi ±0,1 mm. Należy go obowiązkowo uwzględnić przy druku próbek o narzuconych wymiarach, np. uregulowanych przez normę.

2. Charakterystyka materiału użytego do badań i metodologia badań

Próbki do badań zostały uzyskane w wyniku druku 3D techniką DMLS. Zastosowano globularny proszek Co-Cr-W-Mo o nazwie Adorbond CC Pulver (Ador Dental Solutions), którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1. Własności użytego do eksperymentu proszku Co-Cr-W-Mo wymieniono w tabeli 2.

Tabela 1

Skład chemiczny [% mas.] proszku Co-Cr-W-Mo Adorbond CC Pulver

Co	Cr	W	Mo	Si	Nb
62,5	24,6	8,5	2,9	1,3	<1

Tabela 2

Własności proszku Co-Cr-W-Mo Adorbond CC Pulver

Gęstość ρ [g/cm ³]	8,3
Twardość HV10	285
Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa]	490
Moduł sprężystości E [GPa]	210
Wydłużenie przy zerwaniu A [%]	10

Modele próbek do badań zostały wykonane przy użyciu oprogramowania SolidWorks firmy Dassault Systèmes. W ramach projektu konieczne było stworzenie specjalnych

struktur wzmacniających (supportów) między poszczególnymi próbkami, aby zminimalizować potencjalne wysokie naprężenia podczas post-processingu. Drukowanie próbek do badań zostały wydrukowane na drukarce 3D EOS M100 w atmosferze ochronnej azotu. Założonym podczas eksperymentu zmiennym parametrem druku 3D próbek była wysokość warstwy druku. Podczas drukowania wynosiła ona odpowiednio 20 μm i 30 μm . Pozostałe parametry druku zostały dostosowane do ustawień drukarki: moc lasera – 200 W, średnia ogniskowa – 40 μm . Po zakończonym procesie DLMS przeprowadzono oczyszczanie próbek, stosując piaskowanie z użyciem piaskarki firmy Renfert. Kolejno usunięto struktury podporowe (supporty) i wykonano etapy szlifowania oraz polerowania próbek. Kontynuując eksperyment własny po etapie druku 3D, przeprowadzono obróbkę cieplną próbek (wyżarzanie). Obróbkę termiczną wykonano w piecu komorowym w atmosferze ochronnej azotu. Próbki podgrzewano wraz z piecem przy wzroście temperatury wynoszącym 20°C/min. Wyżarzanie w temperaturze 1150°C trwało godzinę. Kolejno próbki zostały chłodzone wraz z piecem do temperatury 650°C, po czym kontynuowano ich ochładzanie na powietrzu, aż do osiągnięcia temperatury pokojowej.

Preparatyka metalograficzna próbek obejmowała następujące po sobie procesy: szlifowania (papiery ściernie SiC o gradacji: 280, 500, 800 i 1200), polerowania mechanicznego (sukna polerskie z dodatkiem zawiesin diamentowych o gradacji: 3 μm , 1 μm , 0,25 μm), trawienia elektrolitycznego, w odczynniku o składzie: 60 cm³ HCl + 15 cm³ HNO₃ + 15 cm³ CH₃COOH + 15 cm³ wody destylowanej. Czas trawienia wynosił 20–60 s, napięcie 5,4–5,7 V. Badania mikrostruktury próbek przeprowadzono przy użyciu mikroskopu świetlnego LEICA DM 4000M oraz skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom XL. Analizy EDS z mikroobszarów na próbkach prowadzono w programie Thermo-Calc 2020a, korzystając z bazy danych TC-SSOL5.

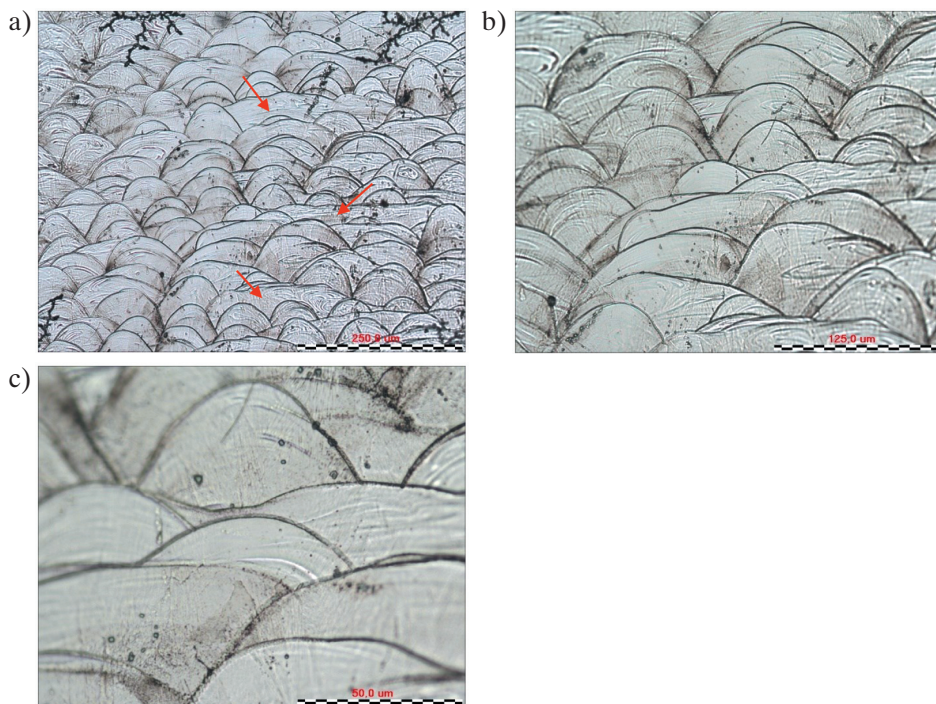
Próbki do badań poddano także pomiarom twardości z zastosowaniem metody Vickersa, korzystając z aparatu ZHU firmy Zwick/Roell. Dla każdej próbki wykonano po dziesięć pomiarów w losowo wybranych miejscach. Pojedynczy pomiar twardości trwał 10 s przy obciążeniu wgłębnika siłą 10 kG.

3. Wyniki badań i ich dyskusja

3.1. Wyniki obserwacji mikroskopowych

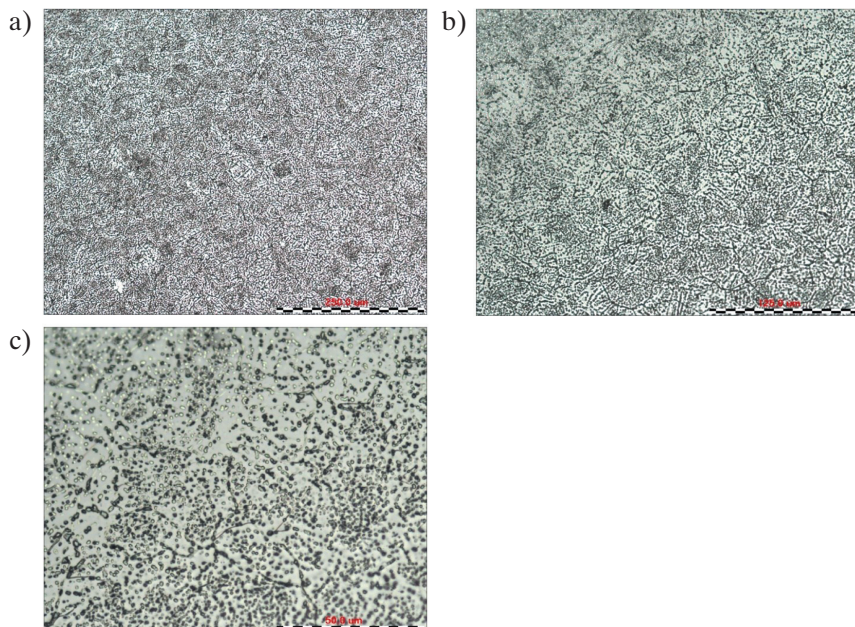
Badania mikroskopowe miały określić wpływ zmiany parametru druku (wysokości warstwy druku) oraz wpływu zastosowanej obróbki cieplnej na mikrostrukturę badanego protetycznego stopu Co-Cr-W-Mo. Otrzymane obrazy mikrostruktur przedstawiono na rysunkach 2–5.

Mikrostruktura próbki wykonanej metodą druku 3D (DMLS) z wysokością druku warstwy wynoszącej 20 μm wykazywała charakterystyczny wzór przypominający łuski ryby (rys. 2). Mikrostruktura powstała w wyniku oddziaływania strumienia wiązki lasera podczas działającego procesu przetapiania laserowego metalicznego proszku. Na otrzymanej mikrostrukturze zaobserwowano zjawisko mieszania się stopionego metalu w obszarze spoiny (rys. 2b).



Rys. 2. Mikrostruktura próbki ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku wynoszącej 20 μm – próbka niewyżarzana. Obrazy LM wykonano z powiększeniem: 100 razy (a), 200 razy (b) i 500 razy (c)

Obróbka cieplna próbki w temperaturze 1150°C przez godzinę spowodowała zanik wyraźnych jeziorok mieszania się przetopionego materiału stopu Co-Cr-W-Mo na rzecz mikrostruktury zaprezentowanej na rysunku 3. Proces wyżarzania w takich warunkach spowodował modyfikację mikrostruktury próbki, która przypominała łuski ryby, w strukturę ziarnistą (rys. 3). Przy powiększeniu 500 razy (rys. 3c) zaobserwowano drobne, sferoidalne (globularne) wydzielania rozmieszczone w całej objętości stopu. Według danych literaturowych (Barucca in. 2015, Mengucci i in. 2016) wydzielena te to prawdopodobnie fazy węglkowe.

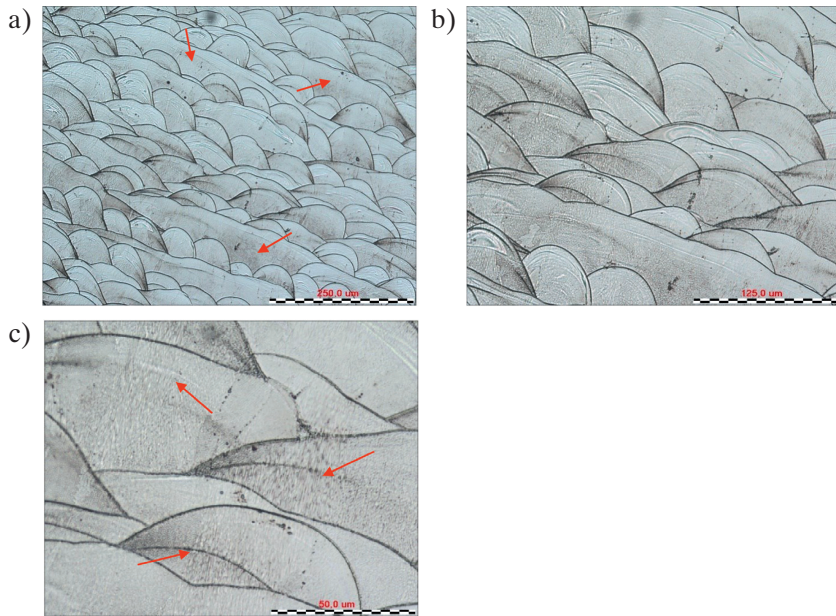


Rys. 3. Mikrostruktura próbki ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku wynoszącej 20 μm – próbka wyżarzana. Obrazy LM wykonano z powiększeniem: 100 razy (a), 200 razy (b) i 500 razy (c)

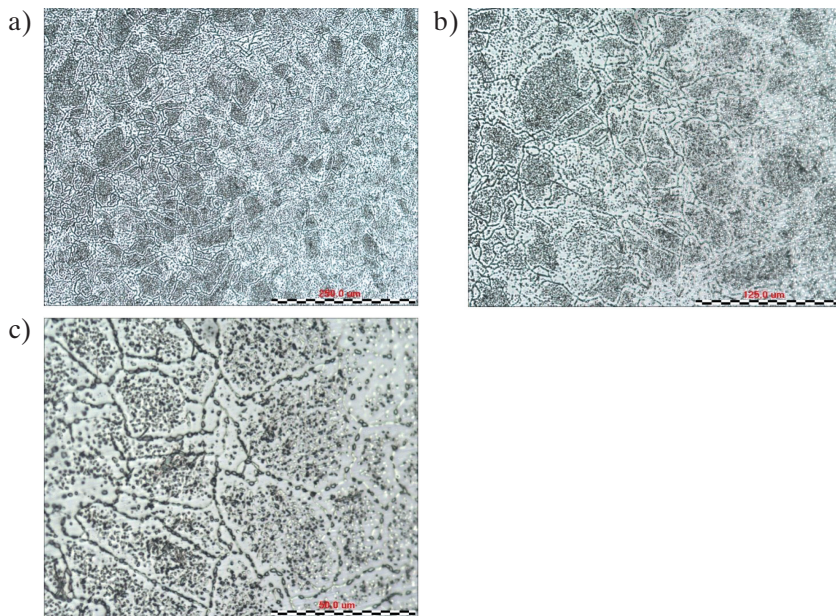
Zwiększenie wysokości druku warstwy do 30 μm (rys. 4) spowodowało powstanie przetopów mających nieco inny charakter niż w przypadku próbki po druku z wysokością warstwy 20 μm (rys. 3). Na otrzymanej mikrostrukturze (rys. 4) zaobserwowano ciągle obszary bez efektu łuski ryby (rys. 4a – wskazano strzałkami). Dodatkowo zaobserwowano zjawisko mieszania się stopionego metalu w obszarze spoiny (rys. 4b), a także wielokierunkową krystalizację rosnących ziaren (rys. 4c – wskazano strzałkami). Zauważono różnice w szerokości ścieżki przetopu wiązki lasera tworzącej tzw. ścieg przetopu (rys. 2a i 4a – wskazano strzałkami).

W wyniku obróbki cieplnej (1150°C/1 h) nastąpiła zmiana mikrostruktury próbki drukowanej z wysokością warstwy 30 μm (rys. 5). Ujawniono mikrostrukturę ziarnistą z charakterystycznymi sferoidalnymi wydzieleniami znajdującymi się zarówno na granicach, jak i wewnątrz ziaren (rys. 5c). Granice ziaren są wyraźnie zarysowane (rys. 5b), a widoczne na nich wydzielania tworzą łańcuszki i mają większe wymiary niż wydzielania znajdujące się wewnątrz ziaren (rys. 5c). Zgodnie z danymi literaturowymi obserwowane wydzielania to prawdopodobnie węgliki.

Ponadto należy podkreślić, że w próbce z druku 3D z wysokością warstwy 30 μm (rys. 5), w porównaniu z próbką z warstwą druku 20 μm (rys. 3), zaobserwowano nieco większy wymiar powstałego ziarna w stopie Co-Cr-W-Mo, a sferoidalne wydzielania na granicach cechuje większy wymiar i charakterystyczne łańcuszkowe rozmieszczenie po granicach ziaren.



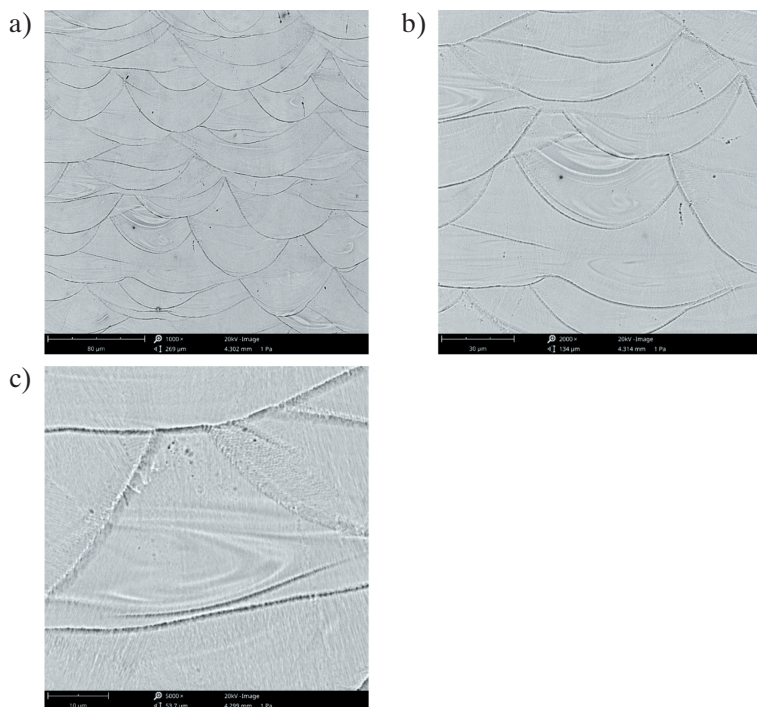
Rys. 4. Mikrostruktura próbki ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku wynoszącej 30 μm – próbka niewyżarzana. Obrazy LM wykonano z powiększeniem: 100 razy (a), 200 razy (b) i 500 razy (c)



Rys. 5. Mikrostruktura próbki ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku wynoszącej 30 μm – próbka wyżarzana. Obrazy LM wykonano z powiększeniem: 100 razy (a), 200 razy (b) i 500 razy (c)

3.2. Skaningowa mikroskopia elektronowa wraz z analizą EDS

Badania SEM wykonano w celu ujawnienia szczegółów mikrostruktury badanych próbek ze stopu Co-Cr-W-Mo zarówno po etapie druku metodą DMLS (rys. 6, 7 i 10), jak i po wykonanej obróbce cieplnej (rys. 8 i 11). Analizy EDS przeprowadzono, aby zweryfikować skład chemiczny w wybranych mikroobszarach badanych próbek (rys. 9 i 12).



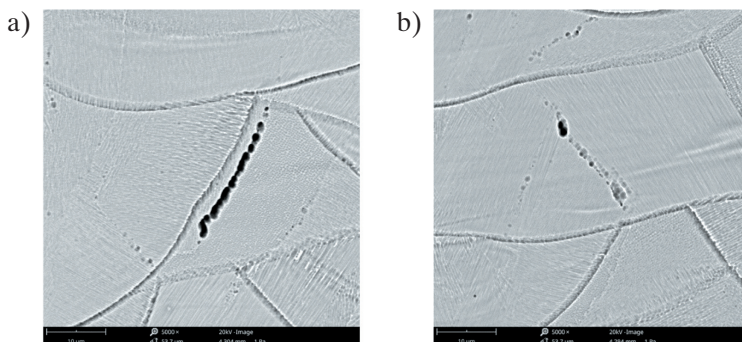
Rys. 6. Obrazy SEM próbki drukowanej ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku 20 µm – próbka niewyżarzana. Zdjęcia wykonano z powiększeniem: 1000 razy (a), 2000 razy (b) i 5000 razy (c)

W próbce po druku z wysokością warstwy 20 µm widoczna była charakterystyczna mikrostruktura łuski ryby (rys. 6). Krystalizacja stopu zachodziła w wielu kierunkach (rys. 6c), zaobserwowano tworzenie się dendrytów, które przechodzą we wzrost komórkowo-dendrytyczny (rys. 6c) oraz jeziorka mieszania się materiału (rys. 6b). Próbka została również oceniona pod kątem obecności artefaktów, takich jak pory, pustki czy przetopienia. W próbce po druku 3D z grubością warstwy 20 µm nie dostrzeżono istotnych rażących wad druku wymienionych wyżej. Zaobserwowano jedynie nieliczne pustki w postaci łańcuszków (rys. 7).

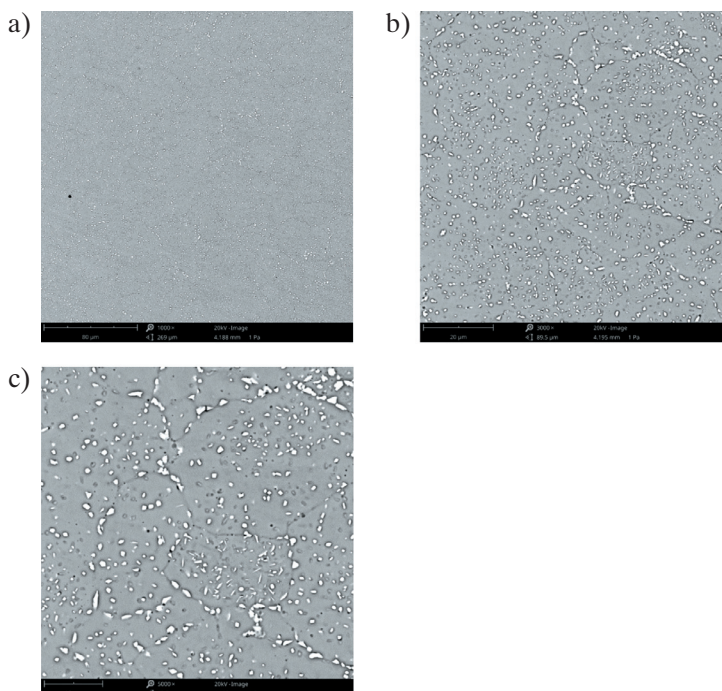
Stwierdzono, że pomimo niewielkiego udziału pustek w próbce ze stopu Co-Cr-W-Mo będącym na poziomie około 2–4% w stosunku do całości obserwowanej mikrostruktury świadczy o nieprawidłowościach procesu DLMS, może być także problematyczne podczas wykonywania np. prób wytrzymałościowych czy późniejszej eksploatacji elementu,

ponieważ obecne w stopie drukowanym pustki mogą stanowić potencjalne miejsca inicjacji mikropęknięć, wynikających z braku ciągłości materiału metalicznego.

Zaplanowany i wykonany eksperyment obróbki cieplnej spowodował modyfikację mikrostruktury drukowanej próbki z wysokością warstwy 20 μm ze stopu Co-Cr-W-Mo (rys. 8). Obserwowano wyraźnie zarysowaną strukturę ziarnistą, bogatą w liczne wydzielenia zlokalizowane zarówno wewnątrz ziaren, jak i na ich granicach (rys. 8b).

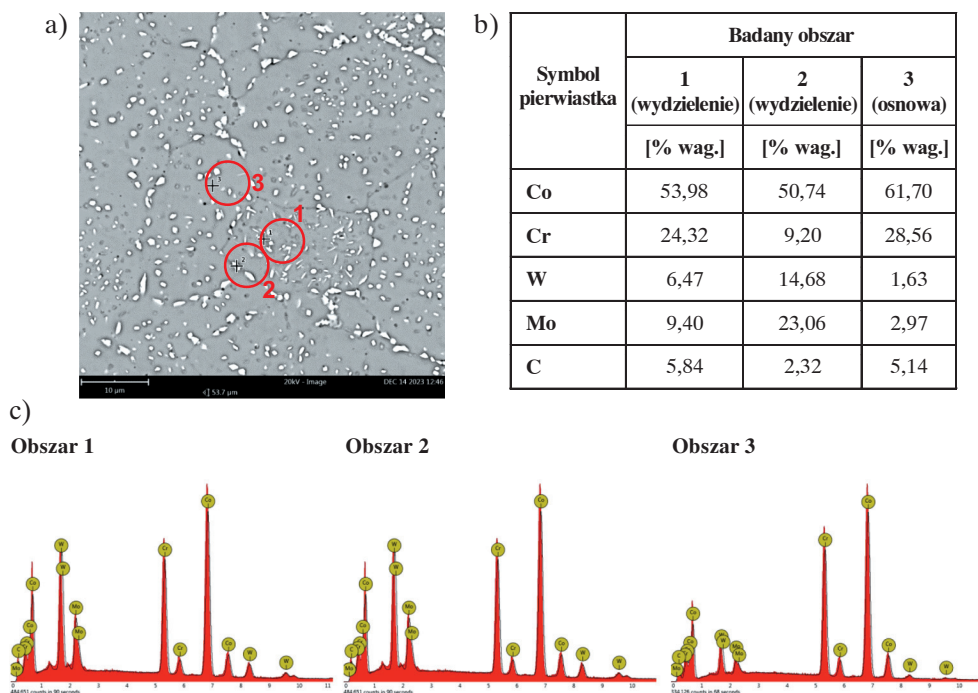


Rys. 7. Obrazy SEM próbki drukowanej ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku 20 μm – próbka niewyżarzana. Zdjęcia wykonane z powiększeniem: 5000 razy dla różnych miejsc na obszarze próbki (a i b)



Rys. 8. Obrazy SEM próbki drukowanej ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku 20 μm – próbka wyżarzana. Zdjęcia wykonane z powiększeniem: 1000 razy (a), 3000 razy (b) i 5000 razy (c)

Porównując wydzielenia wewnątrz ziaren z tymi znajdującymi się na ich granicach, stwierdzono, że mają one wydłużony kształt, większy wymiar oraz układają się w charakterystyczne łańcuszki (rys. 8c). Wydzielenia wewnątrz ziaren tworzyły konglomeraty różniące się między sobą kształtem, wielkością i dyspersją (rys. 8c). W celu identyfikacji składu chemicznego ujawnionych wydzieleni próbkę przeanalizowano z wykorzystaniem spektroskopii energodispersyjnej (EDS) (rys. 9).



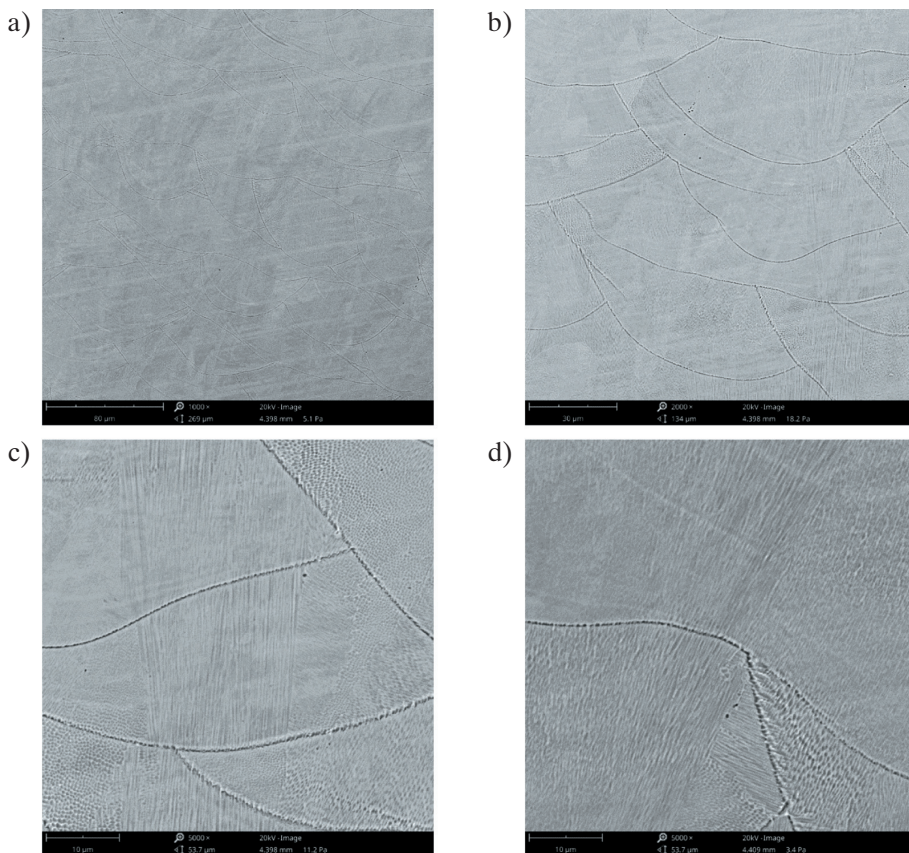
Rys. 9. Obraz SEM (a) oraz ilościowa zawartość pierwiastków (b) wraz z widmami rentgenowskimi (c) drukowanej próbki ze stopu Co-Cr-W-Mo z wysokością warstwy 20 μm poddanej wyżarzaniu w 1150°C przez godzinę

Zauważono, że wydzielenia wewnątrz ziaren (rys. 9 – obszar 1) charakteryzują się podwyższoną zawartością chromu (Cr) oraz domieszkami molibdenu (Mo) i wolframu (W). Porównując skład chemiczny wydzieleni na granicach ziaren (rys. 9 – obszar 2), stwierdzono ponad dwukrotnie podwyższoną zawartość W i Mo przy zaniżonej wartości Cr. Segregacja pierwiastków stopowych, węglotwórczych do badanych obszarów 1 i 2 świadczyła o występowaniu faz węglkowych.

Na podstawie analizy EDS z mikroobszarów i literatury (Zhou i in. 2018, Zou i in. 2022) stwierdzono, że wydzielenia wewnątrz ziaren mogą być typu MC, M_2C , M_7C_3 z przewagą węgla typu $M_{23}C_6$, zaś na granicach występują fazy węglkowe typu MC, M_2C i M_7C_3 . Należy zaznaczyć, że określona zawartość węgla w badanej próbce (rys. 9)

nie była badaniem jednoznacznym, a jedynie szacunkowym ze względu na problematyczność określenia tego pierwiastka w badaniu EDS (C jest pierwiastkiem z grupy lekkich).

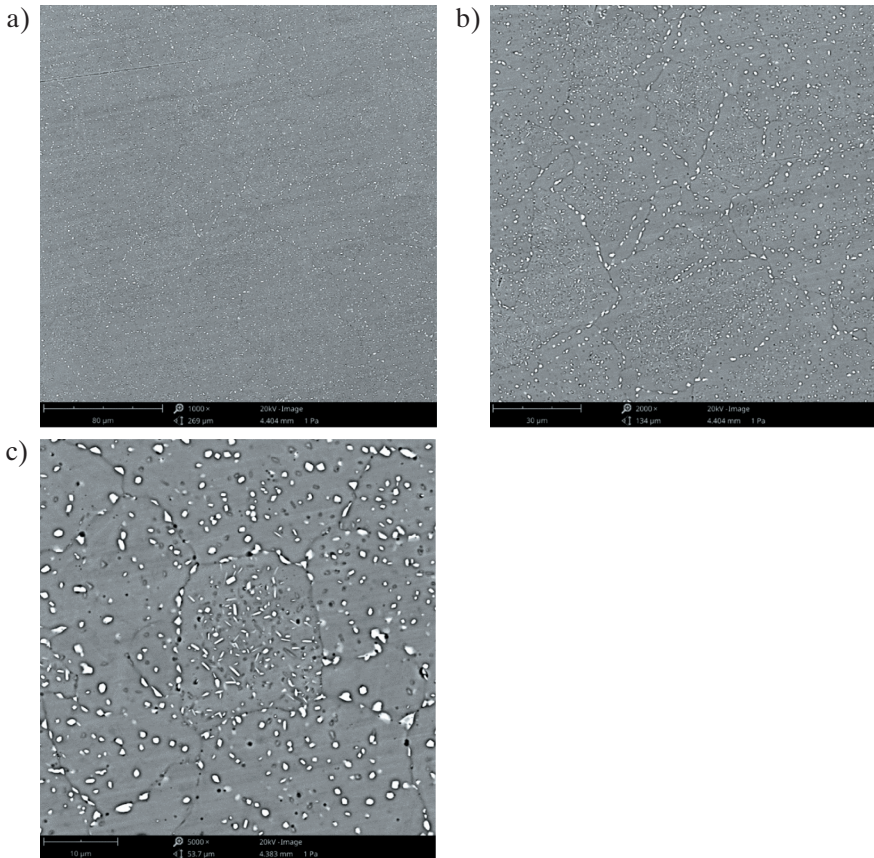
Mikrostruktura przypominająca kształt łuski ryby, jaka powstała w stopie (o wysokości warstwy druku 30 μm) w wyniku działania wiązki lasera podczas procesu DMLS wydaje się mieć większe łuski w porównaniu z próbką o grubości warstwy druku wynoszącej 20 μm (rys. 10). Widoczne są różne fronty krystalizacji dendrytów, a drobna mikrostruktura dendrytyczna przechodzi w strukturę komórkowo-dendrytyczną.



Rys. 10. Obrazy SEM próbki drukowanej ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku 30 μm – próbka niewyżarzana. Zdjęcia wykonano z powiększeniem: 1000 razy (a), 2000 razy (b) i 5000 razy (c)

Przeprowadzony zabieg termiczny (wyżarzanie 1150°C/1 h) podobnie jak w przypadku próbki z warstwą druku 20 μm (rys. 8) spowodował zmianę mikrostruktury przypominającej łuskę ryby na ziarnistą z obecnością wydzielań węglkowych zlokalizowanych zarówno wewnątrz ziarna, jak i po jej granicach (rys. 11). Zauważono, że wydzielania

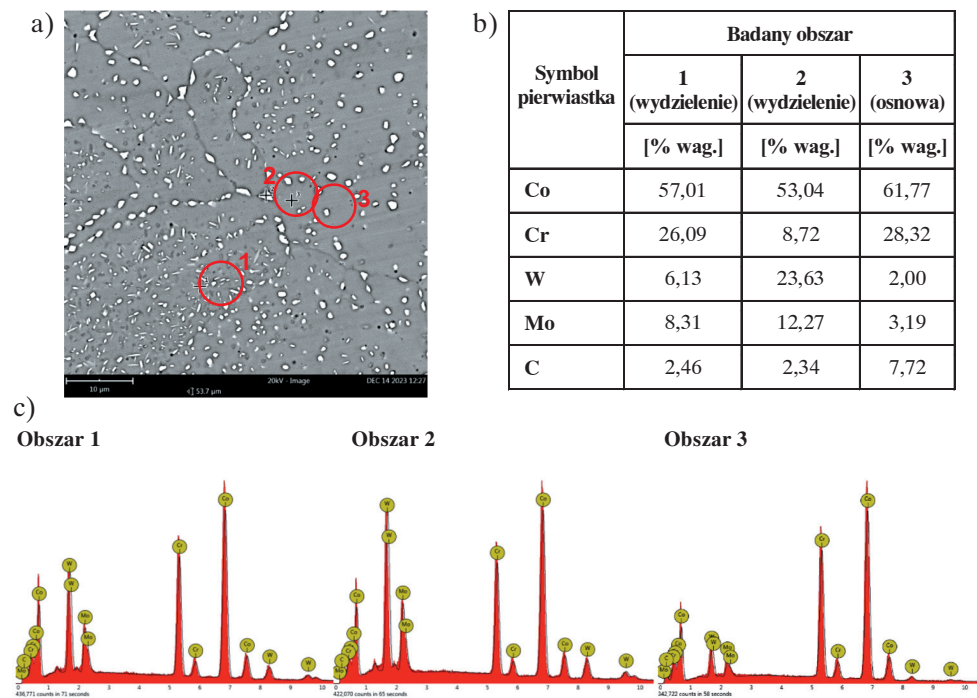
te mają różnorodną postać (morfologię) ze względu na lokalizację w badanych stopie (rys. 11c). Te znajdujące się we wnętrzu ziaren są drobniejsze, przyjmowały bardziej wydłużoną, kanciastą formę (postać) i były one zorientowane w różnych kierunkach (rys. 11c). Należy dodać, że wydzielania po granicach ziaren były większe i przyjmowały postać zbliżoną do kulistej (sferoidalnej) i uformowaną w kształt łańcuszków (rys. 11b i c).



Rys. 11. Obrazy SEM próbki drukowanej ze stopu Co-Cr-W-Mo o wysokości warstwy druku 30 µm – próbka wyżarzana. Zdjęcia wykonano z powiększeniem: 1000 razy (a), 2000 razy (b) i 5000 razy (c)

Na rysunku 12 przedstawiono analizę EDS z ujawnionych wydzielen w badanej próbce stopu Co-Cr-W-Mo. Analiza składu chemicznego potwierdziła obecność faz węglkowych. Podobnie jak w przypadku próbki z wysokością druku warstwy 20 µm (rys. 9) obserwowano segregację W i Mo do obszarów ujawnionych wydzielen (rys. 12b). Zauważono jednak różnicę – nastąpiło odwrócenie zawartości W i Mo, choć nadal stwierdzono, że pierwiastki te tworzą fazy węglkowe typu MC, M₂C, M₇C₃, z przewagą

węglika typu $M_{23}C_6$ w wydzieleniach wewnątrz ziaren. Na granicach ziaren nadal wskazano obecność faz węglkowych typu MC, M_2C i M_7C_3 .

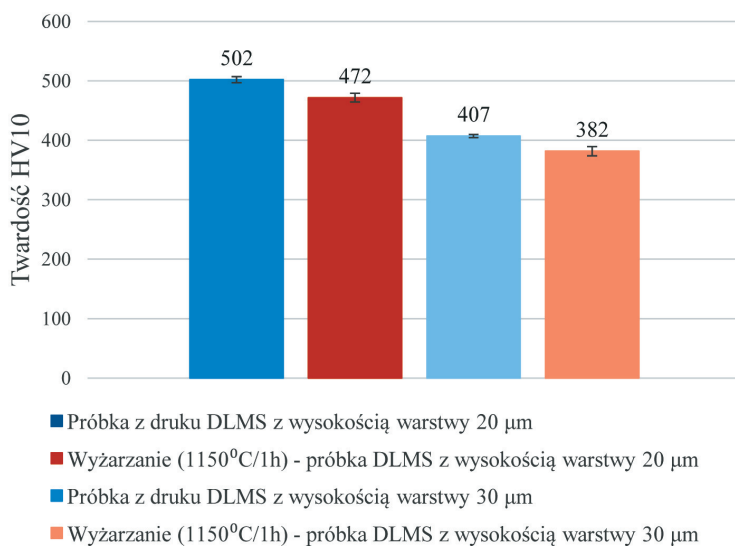


Rys. 12. Obraz SEM (a) oraz ilościowa zawartość pierwiastków (b) wraz z widmami rentgenowymi (c) próbki drukowanej o grubości warstwy 30 μm ze stopu Co-Cr-W-Mo poddanej wyżarzaniu w 1150°C przez godzinę

3.3. Wynik pomiarów twardości

Na podstawie analizy średnich twardości zmierzonych metodą Vickersa (HV10) zaobserwowano spadek twardości próbek po wykonanej obróbce cieplnej w stosunku do próbek Co-Cr-W-Mo drukowanych metodą DMLS z wysokością warstwy 20 μm i 30 μm (rys. 13). Próbka drukowana ze zmiennym parametrem (wysokość warstwy 20 μm) wykazywała wyższą średnią twardość niż próbka drukowana z wysokością warstwy 30 μm . Różnica pomiędzy grubością druku w materiale rodzimym prawdopodobnie spowodowana była grubością przetopu przechodzącej wiązki lasera i „gęstością” ściegu przetopu. Według danych literaturowych obróbka cieplna sprzyja wydzielaniu się faz węglkowych zarówno na granicach, jak i wewnątrz ziarna. Wydzielenia te różniły się wielkością, dyspersją i morfologią (kształtem). Okazało się, że proces DLMS pozwolił uzyskać próbki o mikrostrukturze bardziej stabilnej i jednorodnej pod względem jednorodności oraz podwyższonej twardości. Pomimo że w obu badanych próbkach (tj. po wysokości druku warstwy 20 μm i 30 μm poddanych obróbce cieplnej) istniały fazy węglkowych, które jak

podaje literatura, powinny umacniać stop, to w tym przypadku wydzielenia te nie były równomiernie ułożone w całej objętości stopu, co mogło mieć wpływ na pomiar i wynik końcowy badania. Znaczenie dla rezultatów miało nie tylko rozmieszczenie faz węglkowych (wewnątrz ziarna lub na jej granicach), ale także ich wielkość, typ i szeroko rozumiana morfologia. Dodatkowo należy zauważyć, że pomiar twardości był wynikiem penetracji węgelnika (HV) obejmującym zarówno osnowę stopu, jak i drobne wydzielenia węglkowe. Ostateczny wynik twardości będzie w dużym stopniu zależał od udziału objętościowego węglków i osnowy w obszarze objętym przez węgelnik podczas pomiaru.



Rys. 13. Zestawienie średnich wartości twardości Vickersa (HV10) dla próbek drukowanych metodą DMLS ze stopu Co-Cr-W-Mo oraz próbek poddanych wyżarzaniu w temperaturze 1150°C/h

4. Wnioski

Próbki wykonane metodą druku 3D w technice DLMS, z uwzględnieniem zmiennego parametru, jakim była wysokość warstwy druku (20 µm i 30 µm), oraz przeprowadzony w ramach badań eksperyment, umożliwiły szczegółową analizę i wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Próbki 3D wydrukowane metodą DLMS były zwarte, jednorodne bez widocznych wad i artefaktów. Przejścia (ścieżki) przetopienia warstwy proszków w wyniku działania wiązki lasera kształtem przypominały „łuskę ryby” o mikrostrukturze dendrytycznej przechodzącej w komórkowo-dendrytyczną z frontami krystalizacji w różnych kierunkach.

- 2) W przypadku próbki z wysokością warstwy 20 μm ujawniono mikrostrukturę podziarnową przypominającą łuski ryby, czego nie zaobserwowano w próbce z wysokością warstwy druku 30 μm .
- 3) Porównując mikrostrukturę próbki z wysokością druku warstwy wynoszącej 30 μm do próbki z wysokością warstwy 20 μm , zaobserwowano zmianę jakościową w morfologii materiału, który wykazał tendencję do powstania w wyniku przetopienia laserowego wydłużonych kształtem jezierek.
- 4) Obserwacje SEM wraz z analizą EDS potwierdził skład chemiczny badanego stopu Co-Cr-W-Mo. Wyżarzanie w temperaturze 1150°C przez godzinę spowodowało wydzielanie się faz węglkowych zarówno na granicy, jak i wewnątrz ziaren o zwiększonej zawartości wolframu, molibdenu i chromu. Na podstawie danych literaturowych stwierdzono, że było to spowodowane segregacją węglkotwórczych pierwiastków wolframu (W), molibdenu (Mo), a także chromu (Cr) do obszarów granicznych i wnętrza ziarna. Powstałe fazy węglkowe były typu MC, M_2C , M_{23}C_6 oraz M_7C_3 , które stanowiły umocnienie stopu.
- 5) Porównując próbki z wysokością druku warstwy 20 μm i 30 μm poddanych wyżarzaniu, zaobserwowano, że wydzielania wewnątrz ziaren w próbce wysokością druku warstwy odpowiednio 30 μm i charakteryzowały się zróżnicowanym kształtem, dyspersją i wielkością. Miały one kształt drobnych wydłużonych wydzieleni faz węglkowych przypominających igły, zaś na granicach morfologiczne fazy węglkowe miały kształt globularnych wydzieleni.
- 6) Stwierdzono, że próbki drukowane z wysokością warstwy 20 μm zarówno przed obróbką cieplną, jak i po niej charakteryzowały się wyższą twardością w porównaniu z próbkami z druku z warstwą 30 μm .

Literatura

- Ador Dental Solutions, Adorbond CC Plus powder, <https://www.ador-dental.de/en/product/adorbond-cc-plus-pulver-10-30-koernung/> [dostęp: 12.07.2024].
- Augustyn-Pieniążek J., Łukaszczyk A., Loch J., 2015, *Badania materiałowe i korozyjne konwencjonalnych stopów Co-Cr-Mo-W przeznaczonych na odlewy konstrukcji szkieletowych w protetyce dentystycznej*, Inżynieria Biomateriałów, R. 18, nr 130, s. 2–9.
- Barucca G., Santecchia E., Majni G., Girardin E., Bassoli E., Denti L., Gatto A., Iuliano L., Moskalewicz T., Mengucci P., 2015, *Structural characterization of biomedical Co-Cr-Mo components produced by direct metal laser sintering*, Materials Science and Engineering: C, March, vol. 48, s. 263–269, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.009>.
- Budzik G., Woźniak J., Przeszlowski Ł., *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.

- Drukarki3D, *Technologia DMLS. Selekttywne przetapianie laserowe proszków metalowych*, <https://drukarki3d.pl/technologie/technologia-dmls/> [dostęp: 12.07.2024].
- Hedberg Y.S., Qian B., Shen Z., Virtanen S., Wallinder I.O., 2014, *In vitro biocompatibility of CoCrMo dental alloys fabricated by selective laser melting*, *Dental Materials*, vol. 30, iss. 5, s. 525–534, <http://doi.org/10.1016/j.dental.2014.02.008>.
- Lu Y., Wu S., Gan Y., Li J., Zhao C., Zhuo D., Lin J., 2015, *Investigation on the microstructure, mechanical property and corrosion behavior of the selective laser melted CoCrW alloy for dental application*, *Materials Science and Engineering: C*, April, vol. 49, s. 517–525, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.023>.
- Mengucci P., Barucca G., Gatto A., Bassoli E., Denti L., Fiori F., Girardin E., Bastianoni P., Rutkowski B., Czyrska-Filemonowicz A., 2016, *Effects of thermal treatments on microstructure and mechanical properties of a Co-Cr-Mo-W biomedical alloy produced by laser sintering*, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, July, vol. 60, 2016, s. 106–117, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.12.045>.
- SKRIM, *Popularne metody wykańczania części po druku 3D*, <https://skrim.pl/popularne-metody-wykanczania-czesci-po-druku-3d/> [dostęp: 12.07.2024].
- Zhou Y., Li N., Yan J., Zeng Q., 2018, *Comparative analysis of the microstructures and mechanical properties of Co-Cr dental alloys fabricated by different methods*, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, October, vol. 120, iss. 4, s. 617–623, <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.11.015>.
- Zou S., Zhao Z., Xu W., Ni X., Zhang L., Wu W., Kong D., He X., Wang L., Dong C., 2022, *Effects of scanning speeds on the 43 wear behavior of CoCrW alloy fabricated by selective laser melting*, *Optics & Laser Technology*, vol. 147, nr art 107652, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107652>.

Analiza mikroklimatu pomieszczenia mieszkalnego

Adam Ciupa 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Kraków

Streszczenie: Niniejszy artykuł opisuje sposób zapewnienia odpowiednich warunków w pomieszczeniach mieszkalnych, systemy wentylacji i centralnego ogrzewania w budownictwie z okresu Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej (PRL). Ponadto przedstawiona została charakterystyka mikroklimatu pomieszczenia mieszkalnego na rzeczywistym przykładzie. Na podstawie uzyskanych wyników wysunięto wnioski dotyczące przyszłej modernizacji pomieszczenia. Wyniki badań z łatwością mogą zostać przeniesione na inne pomieszczenia tego typu, znajdujące się na terenie Polski.

Badania wykazały, iż we wskazanym pomieszczeniu należy dokonać wymiany starych i niespełniających swoich funkcji drzwi balkonowych i okna na nowe z nawiewnikami automatycznymi i dokładnymi filtrami oraz grzejnika żeliwnego członowego na płytowy. Dodatkowo rurą instalacji c.o. powinien zostać zaizolowany. Ponadto konieczne będzie wstawienie nawilżacza powietrza. Co więcej, zaleca się inwestycję w oczyszczacz powietrza.

Słowa kluczowe: mikroklimat, badanie, pomieszczenie mieszkalne, mieszkanie, wentylacja, zapylenie, PM10, PM2.5, wilgotność, wilgotność względna, powietrze, jakość powietrza, ciepłownictwo, grzejniki, Polska, Śląsk, Tychy

MICROCLIMATE ANALYSE OF A LIVING QUARTER

Abstract: This article presents the essence of ensuring appropriate conditions in living quarters, ventilation and central heating systems in the civil engineering from the period of the Polish People's Republic (PRL) and the course of research into the microclimate of a living quarter on an actual example. Based on the obtained results, appropriate conclusions concerning the modernization were made. They can be applied to many rooms of this type in Poland.

The research showed that in the indicated room, the outdated window and balcony door should be replaced with new ones with automatic air diffusers with a fine filters and a sectional cast iron radiator with a plate one. Central heating installation pipes should be insulated. In addition, it will be necessary to place an air humidifier. What's more, it is recommended to invest in an air purifier.

Keywords: microclimate, research, living quarter, apartment, ventilation, dust, PM10, PM2.5, humidity, relative humidity, air, air quality, district heating, radiators, Poland, Silesian Voivodeship, Tychy

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7_2

1. Wprowadzenie

1.1. Mikroklimat

Aby dobrze zrozumieć problematykę tego artykułu, wyjaśniono poniżej pojęcie mikroklimatu i omówiono jego wpływ na organizm ludzki. Mikroklimat to zbiór parametrów fizycznych i chemicznych, zmiennych w czasie i przestrzeni, wywierających wpływ na każdy żywy organizm (Pełech 2008). Wydajność, samopoczucie i zdrowie człowieka są uzależnione m.in. od następujących parametrów środowiskowych, charakteryzujących jego otoczenie:

- temperatura powietrza,
- wilgotność powietrza,
- prędkość przepływu powietrza,
- charakterystyka klimatu akustycznego,
- temperatura przegród w pomieszczeniu w porównaniu z temperaturą powietrza wtórnego,
- stężenie dwutlenku węgla w powietrzu,
- zapylenie powietrza.

Polska Norma (PN-B-03421:1978) określa pożądane wartości temperatury, wilgotności i maksymalną prędkość przepływu powietrza w zależności od aktywności fizycznej człowieka osobno dla lata oraz zimy. Na ogół przyjęło się, że w pomieszczeniach mieszkalnych temperatura powietrza ma wynosić około 20°C, wilgotność względna od 40% do 60% (zakres optymalny jednocześnie dla ludzi, przegród budowlanych i wyposażenia budynków), a maksymalna prędkość przepływu powietrza wynosi 0,2 m/s. W przypadku doboru nieodpowiedniej temperatury danego pomieszczenia jego użytkownicy mogą odczuwać dyskomfort, który powoduje dodatkowy wysiłek organizmu ludzkiego. Może się to objawiać dreszczami bądź nadmierną potliwością. Nieodpowiedni poziom wilgotności względnej może negatywnie wpłynąć nie tylko na ludzi, ale także na stan ich otoczenia, między innymi na przegrody budowlane i wyposażenie pomieszczeń. Gdy ww. parametr osiąga wartość mniejszą od 40%, przy temperaturze powietrza w pomieszczeniu wynoszącej około 20°C (w przypadku wentylacji bez kontroli wilgoci – głównie zimą), człowiek jest narażony np. na alergie skórne oraz uczucie drapania w gardle, zaś drewniane elementy wyposażenia na uszkodzenia wskutek zbyt dużego skurczenia się materiału. Przy wilgotności względnej wyższej od 60% i temperaturze powietrza w pomieszczeniu wynoszącej około 20°C (w przypadku wentylacji bez kontroli wilgoci – głównie latem) człowiek bardziej odczuwa temperaturę, co może skutkować uczuciem duszności. Drewniane elementy wyposażenia mogą ulec uszko-

dzeniu z powodu zbyt dużego napęcznienia. Co więcej, na przegrodach budowlanych może tworzyć się grzyb. Podczas projektowania instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej należy zwrócić uwagę na prędkość przepływu powietrza w strefie przebywania ludzi. W pomieszczeniach mieszkalnych nie powinna ona przekraczać około 0,2 m/s. Wartość ta jest zależna od temperatury w pomieszczeniu. Zbyt wysoka prędkość powietrza może powodować odczuwanie przeciągu przez ludzi.

Charakterystyka akustyczna określonych rodzajów pomieszczeń została określona w normie (PN-B-02151-02:1987). Zgodnie z nią dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A, charakteryzujący hałas przenikający do pomieszczenia, łącznie ze wszystkich źródeł, w przypadku:

- pomieszczenia mieszkalnego wynosi 40 dB(A) dla dnia oraz 30 dB(A) dla nocy,
- kuchni i pomieszczenia sanitarnego w mieszkaniach wynosi 45 dB(A) dla dnia oraz 40 dB(A) dla nocy,
- pomieszczenia do pracy umysłowej, wymagającej silnej koncentracji uwagi, wynosi 35 dB(A) dla dnia.

Zbyt wysoki poziom ciśnienia akustycznego może powodować u ludzi między innymi bóle głowy, problemy z koncentracją oraz podwyższone ciśnienie krwi.

Temperatura przegród budowlanych danego pomieszczenia, według warunków komfortu, nie powinna różnić się od temperatury powietrza w tym pomieszczeniu o więcej niż 3°C. Jeżeli temperatura przegród będzie zbyt wysoka, strumień ciepła oddawanego przez ciało człowieka do otoczenia w wyniku promieniowania będzie zbyt niski, co może powodować uczucie nadmiernego ciepła. W przypadku zbyt niskiej temperatury przegród strumień ten wzrośnie, a człowiek będzie odczuwał chłód (Pelech 2008).

Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu pomieszczeń mieszkalnych nie powinno przekraczać 1000 ppm (1,8 g/m³). Powyżej tego poziomu człowiek może odczuwać zmęczenie. Ponadto istnieje zagrożenie utraty przytomności, ponieważ dwutlenek węgla jest gazem duszącym, czyli utrudniającym organizmowi dostęp do tlenu.

Ostatnim elementem jakości mikroklimatu, który wzięto pod uwagę, jest zapylenie powietrza. Zgodnie z obowiązującym w Polsce prawem średnie stężenie pyłu PM10 w skali roku nie powinno przekroczyć 40 µg/m³, natomiast w odniesieniu do doby – 50 µg/m³. Dopuszczalna liczba przekroczeń średniodobowego stężenia PM10 w skali roku wynosi 35. Dopuszczalne średniodobowe stężenie pyłu PM2.5 wynosi 20 µg/m³. Dla tego rodzaju pyłu nie podano stężenia rocznego oraz dopuszczalnej ilości przekroczeń stężenia średniodobowego w skali roku (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska). Wdychane przez człowieka pyły mogą negatywnie wpływać na jego układ oddechowy, krwionośny, immunologiczny, a nawet nerwowy. Im pył jest drobniejszy, tym

łatwiej wnika do układu oddechowego człowieka. Co równie istotne, pyły mogą zawierać substancje rakotwórcze, takie jak np. WWA (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne). Wyższe poziomy zapylenia powietrza zewnętrznego notuje się głównie w okresie zimowym ze względu na pracę indywidualnych instalacji spalania paliw stałych przestarzałej technologii w domach jednorodzinnych. Nie posiadają one filtrów wysokiej sprawności (np. elektrofiltrów) oraz zdarza się, że są eksploatowane w niewłaściwy sposób. W przypadku wysokiego zapylenia powietrza zewnętrznego oraz funkcjonującej wentylacji bez filtracji bądź z filtracją o niskiej sprawności obszar objęty tą wentylacją będzie charakteryzował się podwyższonym zapyleniem powietrza, w stosunku do odpowiednich warunków.

1.2. Instalacje w budynkach starego budownictwa

Budynki mieszkalne starego budownictwa, wybudowane w czasach Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej (PRL), cieszą się obecnie dużym popytem. Na podstawie danych opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny (Adamczyk et al. 2013) oszacowano, że nadal spora część społeczeństwa polskiego korzysta z tego typu obiektów. Budynki te wyróżnia na ogół dobra lokalizacja, prostota modernizacji oraz duża przestrzeń dookoła nich. Ich wadą w stosunku do nowego budownictwa jest wyposażenie w instalacje sanitarne starszej technologii. W tekście skupiono się na instalacjach wentylacyjnych oraz centralnego ogrzewania.

Dawniej w budynkach mieszkalnych stosowano przeważnie wentylację grawitacyjną. Jej działanie jest zdeterminowane głównie przez siłę grawitacji oraz różnicę gęstości pomiędzy powietrzem zewnętrznym i wewnętrznym. Gęstość powietrza jest odwrotnie proporcjonalna do jego temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza jego gęstość maleje, natomiast wraz z jej spadkiem – rośnie. Idea przepływu powietrza w pomieszczeniu z wentylacją grawitacyjną polega na tym, że ciepłe powietrze wtórne unosi się ku górze, skąd jest usuwane na zewnątrz budynku przez wywiewniki, przewody wentylacyjne oraz wywietrzaki. Powoduje to powstanie podciśnienia w dolnej części pomieszczenia, czego rezultatem jest zasysanie do wnętrza świeżego powietrza z zewnątrz przez nieszczelności w przegrodach bądź nawiewniki. Taki proces wymiany powietrza utrzymuje się praktycznie przez całą zimę. Wówczas w pomieszczeniach jest cieplej niż na zewnątrz. Inaczej sytuacja wygląda latem, kiedy temperatura wewnątrz często jest niższa od panującej na zewnątrz. W efekcie w dolnej części pomieszczenia panuje nadciśnienie i zimniejsze powietrze jest usuwane przez nieszczelności, a świeże powietrze przedostaje się do wnętrza za pośrednictwem wywietrzaka, przewodów wentylacji grawitacyjnej oraz wywiewników. Proces ten określa się jako odwrócony ciąg (znany również jako ciąg wsteczny). Inną przyczyną tego zjawiska, która może występować zarówno zimą, jak i latem, jest silny wiatr przy zastosowaniu nie-

właściwego typu wywiewników. Wywiewniki umieszczone na dachach budynków powinny, przy prawidłowym działaniu wentylacji grawitacyjnej, usuwać powietrze wtórne. Jednak podczas silnego wiatru świeże powietrze może przedostać się do przewodów wentylacyjnych, a następnie do pomieszczeń. Aby temu zapobiec, zamiast podstawowych wywiewników stałych stosuje się deflektory cylindryczne i typu H, urządzenia samonastawne bądź obrotowe. Ich konstrukcja sprzyja tworzeniu się podciśnienia w przewodach wentylacyjnych podczas silnych wiatrów. Zjawisko ciągu wstecznego jest niekorzystne, ponieważ:

- nieprzefiltrowane powietrze napływa do pomieszczeń,
- powietrze nawiewane przez wywiewniki może zawierać zanieczyszczenia z przewodów wentylacyjnych, a nawet substancje wywiewane przez przewody dymowe bądź spalinowe,
- istnieje możliwość napływu zimnego powietrza do tzw. pomieszczeń brudnych, takich jak łazienka bądź toaleta.

Wentylacja grawitacyjna ze względu na swój charakter uniemożliwia sterowanie temperaturą powietrza nawiewanego. Krotność wymian powietrza nie jest dostosowywana do potrzeb w przypadku nawiewu przez nieszczelności lub nawiewniki nieautomatyczne (wyjątek stanowi ręczne otwieranie okien, drzwi itp. oraz tymczasowe doszczelnianie okien np. tkaninami, co wciąż bywa praktykowane). Nawiewniki higrosterowane, ciśnieniowe oraz dwusystemowe pozwalają na automatyczne sterowanie strumieniem objętościowym powietrza nawiewanego. W okresie PRL popularna była również mechaniczna wentylacja wywiewna. Polega ona na wymuszonym wywiewaniu powietrza z pomieszczeń z wykorzystaniem co najmniej jednego wentylatora. Proces ten powoduje zasysanie do pomieszczeń świeżego powietrza przez nieszczelności lub nawiewniki. W tym przypadku również istnieje możliwość sterowania strumieniem powietrza nawiewanego (przez zastosowanie ww. nawiewników oraz sterowanie pracą wentylatora), lecz nadal nie ma możliwości sterowania temperaturą powietrza nawiewanego. Zarówno wentylacja grawitacyjna, jak i mechaniczna wywiewna nie umożliwia odzyskiwania ciepła z powietrza wywiewanego. Ponadto w obu przypadkach problem stanowią często stan i konstrukcja stolarki okiennej. Dawniej nieszczelności w oknach służyły jako przestrzeń napływu powietrza do pomieszczeń. Obecnie okna są często wymieniane na szczelniejsze w celu zmniejszenia strat ciepła. W takim przypadku brak odpowiednich nawiewników odbija się negatywnie narotności wymian powietrza. Warto zaznaczyć, że powietrze przedostające się do pomieszczenia przez nieszczelności jest niefiltrowane. Obecnie zaleca się instalowanie w starym budownictwie szczelnej stolarki okiennej oraz nawiewników okiennych bądź ściennych z filtrami powietrza (przynajmniej wstępny).

W skład instalacji grzewczych w starym budownictwie wchodziły żeliwne grzejniki członowe (inaczej żeberkowe). Ich sposób oddawania energii do otoczenia opiera się w głównej mierze na konwekcji, a w mniejszym stopniu na promieniowaniu. Charakteryzują się one dużą pojemnością czynnika grzewczego, co jest przyczyną ich wysokiej bezwładności cieplnej. Taki grzejnik powoli się nagrzewa, a po osiągnięciu zadanej temperatury w pomieszczeniu jeszcze długo oddaje ciepło. Utrudnia to utrzymanie stabilnej temperatury z niewielkimi odchyleniami. Ze względu na swoją konstrukcję jest również trudny do czyszczenia z kurzu. W nowych układach grzewczych stosowane są zazwyczaj grzejniki płytowe bądź płaszczyznowe. Grzejniki płytowe charakteryzują się małą bezwładnością cieplną. Ich konstrukcja pozwala na łatwe czyszczenie. Oddają ciepło do otoczenia głównie na zasadzie konwekcji podobnie jak grzejniki żeberkowe. Ogrzewanie płaszczyznowe najczęściej występuje w formie ogrzewania podłogowego. Oddaje ono ciepło do otoczenia praktycznie w całości w wyniku promieniowania (przez co nie powoduje unoszenia się kurzu, jak w przypadku ogrzewania konwekcyjnego). Preferowany przez ludzi rozkład temperatury w pionie na ogół wygląda następująco – im wyżej, tym zimniej, przy czym różnica pomiędzy temperaturą przy stopach a przy głowie nie powinna być większa niż 3°C (Pełech 2008). W związku z tym ogrzewanie podłogowe najbardziej odzwierciedla idealny profil rozkładu temperatury w pomieszczeniu. Grzejniki płytowe i żeberkowe powodują utrzymanie się wysokiej temperatury przy suficie. W przypadku tych grzejników, usytuowanych przy przegrodach zewnętrznych, rozkład temperatury przy posadzce jest korzystniejszy, niż gdyby były umieszczone przy przegrodzie wewnętrznej. W związku z powyższym stosowane grzejniki członowe z okresu PRL nie sprzyjają zapewnieniu komfortu cieplnego w pomieszczeniu, pożądanej czystości powietrza oraz prostych warunków czyszczenia.

2. Cel i zakres badania

Celem niniejszych badań jest określenie wybranych parametrów mikroklimatu pomieszczenia mieszkalnego, opis zaimplementowanej instalacji wentylacyjnej i centralnego ogrzewania oraz wyciągnięcie wniosków. W zakres pracy wchodzi następujące czynności:

- przeprowadzenie wywiadu z użytkownikami badanego pomieszczenia wraz z jego oględzinami;
- rozmowa z kierownikiem GZM nr 6 Spółdzielni Mieszkaniowej „Oskard” oraz analiza dokumentacji technicznej budynku;
- konfiguracja serwerów FTP do zapisu danych z czujnika jakości powietrza „Smog-Tok” (część danych została zapisana na darmowym serwerze, a pozostałe na płatnym, żeby porównać ich funkcjonalność);

- umiejscowienie i konfiguracja czujnika jakości powietrza, określającego następujące parametry:
 - ciśnienie atmosferyczne,
 - stężenie pyłów PM2.5 oraz PM10,
 - temperaturę według termometru suchego,
 - wilgotność względną;
- wykonanie pomiarów czujnikiem jakości powietrza w okresie zimowym oraz letnim;
- pobranie danych dotyczących zapylenia powietrza zewnętrznego z pobliskiej stacji monitorującej jakość powietrza, z okresu przeprowadzenia badań jakości powietrza wewnętrznego;
- zbadanie przegród kamerą termowizyjną (z określeniem temperatury wewnętrznej i zewnętrznej tuż przed badaniem i zaraz po nim) oraz pirometrem;
- sprawdzenie wystąpienia nieszczelności w przegrodach, określenie ich charakteru za pomocą kamery termowizyjnej oraz termoanemometru;
- analiza instalacji wentylacyjnej i centralnego ogrzewania;
- utworzenie wizualizacji 3D badanego pomieszczenia;
- analiza uzyskanych wyników i wyciągnięcie wniosków.

3. Charakterystyka badanego pomieszczenia

Badane pomieszczenie znajduje się w zachodniej części budynku tzw. starego budownictwa, powstałego w okresie Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej. Budynek ten jest usytuowany w Tychach (woj. śląskie) przy ulicy Władysława Reymonta 63.



Rys. 1. Usytuowanie budynku ze wskazaniem badanego pomieszczenia
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem Google Earth

Jak wynika z rysunku 1, w najbliższej okolicy badanego pomieszczenia znajdują się nie tylko budynki wielorodzinne, ale także domy jednorodzinne. Rysunki 2 i 3 przedstawiają orientacyjnie badane pomieszczenie oraz usytuowanie czujnika jakości powietrza „SmogTok”. Grafiki te zostały utworzone z wykorzystaniem programu AutoCAD 2020 oraz wybranych bloków ze strony internetowej Archispace.



Rys. 2. Wizualizacja 3D badanego pomieszczenia – widok na stronę zachodnią



Rys. 3. Wizualizacja 3D badanego pomieszczenia – widok na stronę wschodnią

Czynności wykonywane w tym pomieszczeniu to praca biurowa oraz odpoczynek, w tym spanie. Z wywiadu z jego użytkownikami wynika, że w ciągu doby przebywają tam zazwyczaj maksymalnie dwie osoby.

W mieszkaniu, w skład którego wchodzi badane pomieszczenie, zastosowano wentylację mechaniczną wywiewną, bez nawiewników okiennych. Dlatego zakłada się, że powietrze jest nawiewane przez nieszczelności w oknie i drzwiach balkonowych.

Badane pomieszczenie jest ogrzewane żeliwnym grzejnikiem członowym, zamontowanym pod parapetem, zastawionym narożnym biurkiem. Zainstalowane okno i drzwi balkonowe są dwuszybowe, a ich framugi wykonane z PVC.

4. Metodyka pomiarowa

Przyjęta metodyka badawcza opierała się na wykorzystaniu czujnika jakości powietrza „SmogTok”, który przedstawiono na rysunku 4. Służy on do określenia ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza według termometru suchego, wilgotności względnej powietrza oraz jego zapylenia PM10 i PM2.5. Składa się w szczególności z dwóch miniaturowych elementów, tj. sensora laserowego oraz termohigrometru (SmogTok). Czujnik ten został usytuowany na biurku narożnym (rys. 2 i 3). To miejsce reprezentatywne, ponieważ najczęściej przebywają w nim ludzie (siedząc na krześle bądź śpiąc na wersalce). Urządzenie dokonywało pomiarów co 9 minut, a wyniki były na bieżąco zapisywane na serwerze FTP. Serie pomiarowe były kumulowane częściowo na darmowym oraz płatnym serwerze FTP w celu porównania ich funkcjonalności.



Rys. 4. Czujnik jakości powietrza „SmogTok”

Pomiary kamerą termowizyjną zostały wykonane z wewnętrznej części pomieszczenia, z wykorzystaniem smartfona CAT S60, wyposażonego w moduł termowizyjny FLIR Lepton drugiej generacji (Nowakowski). Dokonano ich w dniu 17.02.2021 r. około godziny 18.45, kiedy słońce znajdowało się za horyzontem, a różnica pomiędzy temperaturą wewnętrzną a zewnętrzną wynosiła $20,1^{\circ}\text{C}$ ($t_w = 24^{\circ}\text{C}$, $t_z = 3,9^{\circ}\text{C}$). Temperaturę wnętrza zmierzono za pomocą urządzenia „SmogTok”, zaś w przypadku temperatury

na zewnątrz posłużono się wskazaniem stacji pogodowej firmy Philips, korzystającej z czujnika zewnętrznego AJ260. Celem tej części badania było określenie umiejscowienia mostków cieplnych oraz szczelności przegród. Temperatury przegród zweryfikowano pirometrem Benetech GM550 z uwzględnieniem ich współczynników emisyjności (EMS) według dołączonej do urządzenia dokumentacji. Używając termoanemometru SmartSonda testo 405i, sprawdzono, czy występują nieszczelności przy mostkach cieplnych.

5. Wyniki badań

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki oraz analizę badań składających się z wywiadów, oględzin i pomiarów.

5.1. Wywiad z użytkownikami badanego pomieszczenia i kierownikiem GZM nr 6 Tyskiej Spółdzielni Mieszkaniowej „Oskard”

Przed rozpoczęciem pomiarów przeprowadzono wywiad z mieszkańcami korzystającymi z badanego pomieszczenia. Uzyskano informacje, że zimą odczuwają dyskomfort spowodowany przeciągiem. Wówczas głowica termostatyczna grzejnika jest ustawiona na maksymalną temperaturę (26°C), ponieważ mieszkańcom jest na ogół zimno. Ponadto zimą w godzinach wieczornych, nocnych oraz porannych w pomieszczeniu często czuć smog, co utrudnia prawidłowe funkcjonowanie organizmu. Użytkownicy mają przez to problem ze skupieniem się oraz zasypianiem. Wystąpienie smogu stwierdzili na podstawie informacji z internetu oraz własnych odczuć. Podczas mycia okien i drzwi balkonowych rzuca się w oczy pył nagromadzony na framugach zarówno po stronie zewnętrznej, jak i wewnętrznej. Od ponad dziesięciu lat poza codzienną eksploatacją i konserwacją okien tych nie poddawano innym zabiegom.

W wyniku rozmowy z kierownikiem GZM nr 6 Tyskiej Spółdzielni Mieszkaniowej „Oskard” i analizy dokumentacji technicznej odpowiedniego budynku okazało się, że w mieszkaniu, w którego skład wchodzi badane pomieszczenie, została zastosowana wentylacja mechaniczna wywiewna bez nawiewników. Ponadto są w nim zamontowane żeliwne grzejniki członowe.

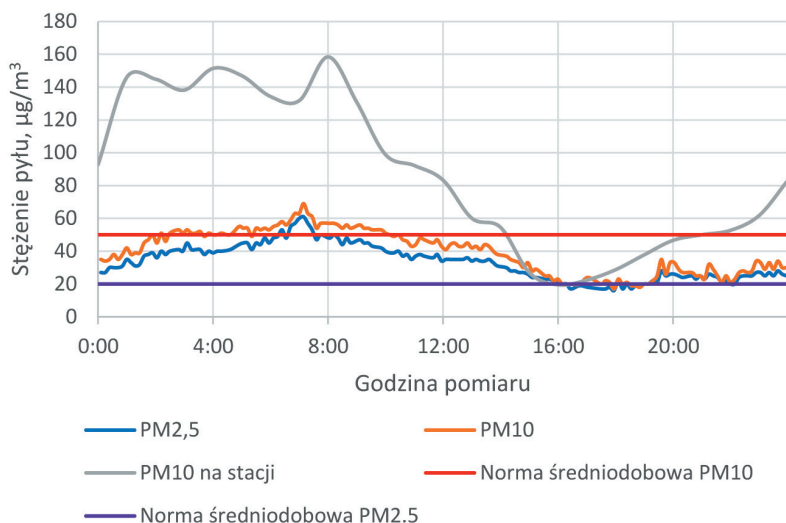
5.2. Zapylenie i wilgotność względna powietrza

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów zapylenia PM10 i PM2.5, temperatury według termometru suchego oraz wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w okresie zimowym i letnim. W celu porównania zapylenia wewnętrznego z zewnętrznym przedstawiono zapylenie powietrza zewnętrznego, jakie panowało podczas okresu pomiarowego na podstawie danych ze strony GIOŚ (Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska). Dotyczą one stacji „Tychy, ul. Tołstoja” (około 2,38 km od badanego

pomieszczenia), na której w okresie badawczym dokonywano pomiarów zapylenia powietrza pyłem PM10. Aby ułatwić interpretację wyników pomiarowych, przedstawiono je w formie wykresów (rys. 5–13), z naniesionymi wartościami granicznymi oraz pożądanymi zakresami wartości danych parametrów. Część informacji znajduje się w komentarzach do rysunków 5–13. Każdy wykres wilgotności względnej przedstawiający jej wartości w czasie zawiera dodatkowo krzywą tego parametru po skorygowaniu temperatury we wnętrzu do 20°C zimą i 26°C latem (wartości zalecane przez PN-B-03421:1978, przy warunkach panujących w badanym pomieszczeniu). Dzięki temu można było wysunąć dodatkowe wnioski. Krzywe wilgotności względnej uzyskano, wykorzystując zależności na wilgotność względną powietrza i ciśnienie nasycenia pary wodnej. Powyższe zmiany temperatury powietrza nie stwarzałyby zagrożenia wykraplania się pary wodnej w pomieszczeniu. Poza tym każdy tego typu wykres zawiera zakres optymalnej wartości wilgotności względnej (dla temperatury w pomieszczeniu równej około 20°C, przy małej aktywności fizycznej jego użytkowników) w postaci zielonych słupków. Każdy słupek oznacza jeden pomiar, co przy okazji pozwala na sprawdzenie funkcjonowania systemu zapisu danych na serwerze FTP. W przypadku braku danego pomiaru interpolowano wartości poszczególnych parametrów jakości powietrza, przypadające na czas, w którym powinno dojść do tego pomiaru. Wartości tych parametrów dla czasu pomiędzy pomiarami również zostały interpolowane.

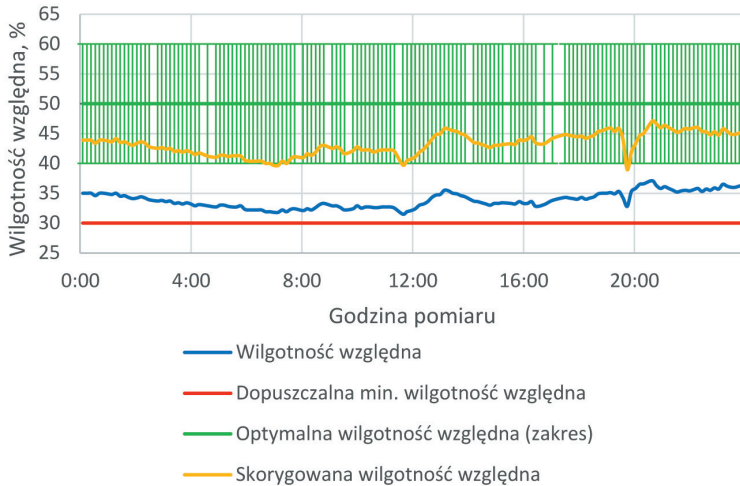
Poniżej przedstawiono wyniki z dwóch reprezentatywnych dni (pod kątem wybranych parametrów jakości powietrza), osobno dla lata oraz zimy. Dni te zostały wybrane na podstawie analizy wszystkich zebranych danych.

Pomiary dla wybranych dwóch dni z okresu zimowego



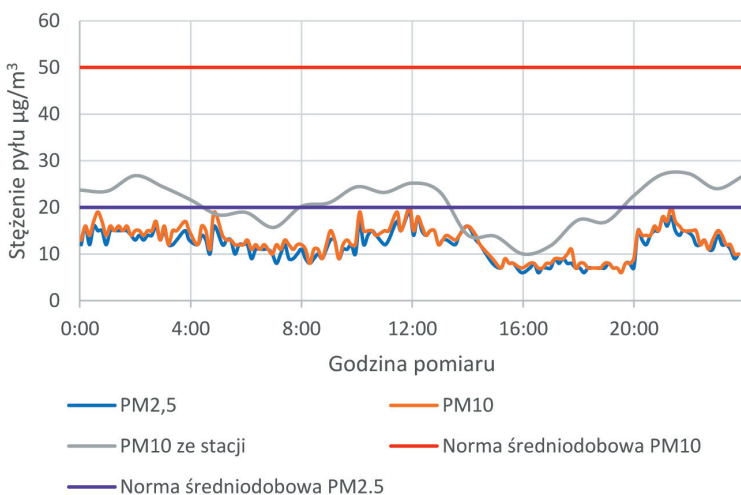
Rys. 5. Wykres zapylenia powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w dniu 22.02.2021 r.

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 5 stwierdzono, że średniobowe stężenie PM10 powietrza wewnętrznego wynosiło $39,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (79,3% normy), natomiast średniobowe stężenie PM2.5 powietrza wewnętrznego wynosiło $33,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (166,9% normy). Omawiane dane były kumulowane na darmowym serwerze FTP.



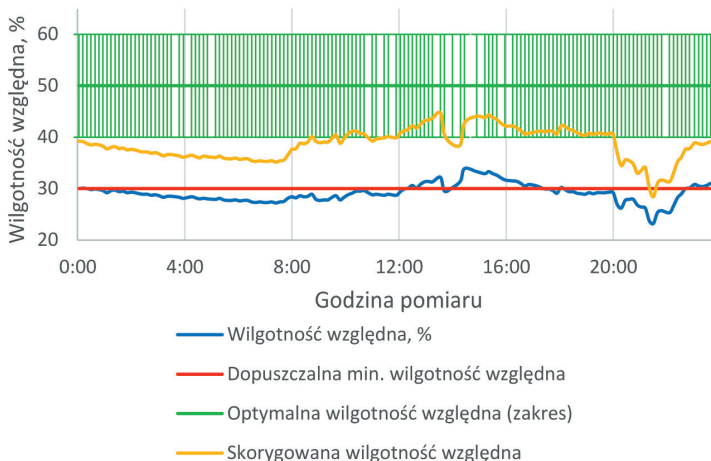
Rys. 6. Wykres wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w dniu 22.02.2021 r.

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 6 stwierdzono, że średniobowa wilgotność powietrza wewnętrznego wynosiła 33,9% (43,2% po obliczeniowym skorygowaniu temperatury wewnętrznej do 20°C), natomiast średniobowa temperatura powietrza w pomieszczeniu wynosiła $24,0^{\circ}\text{C}$. Dane były kumulowane na darmowym serwerze FTP.



Rys. 7. Wykres zapylenia powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w dniu 6.02.2021 r.

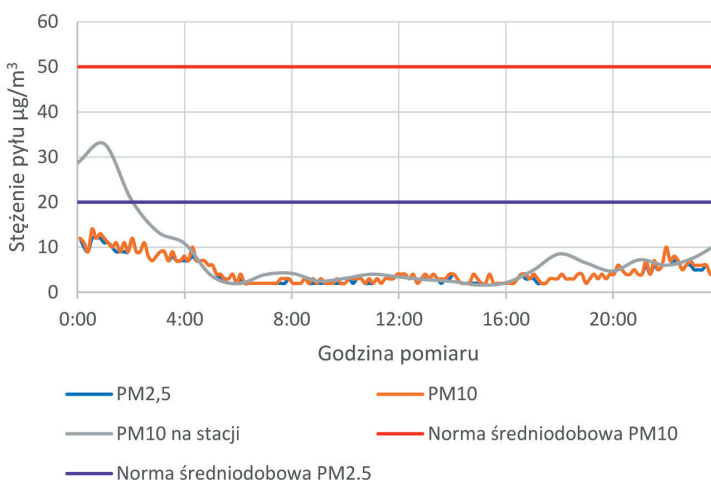
Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 7 stwierdzono, że średniobowe stężenie PM10 powietrza w pomieszczeniu wynosiło $12,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (25,2% normy), natomiast analogiczne stężenie PM2.5 wynosiło $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (58,4% normy). Dane z pomiarów były kumulowane na darmowym serwerze FTP.



Rys. 8. Wykres wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w dniu 6.02.2021 r.

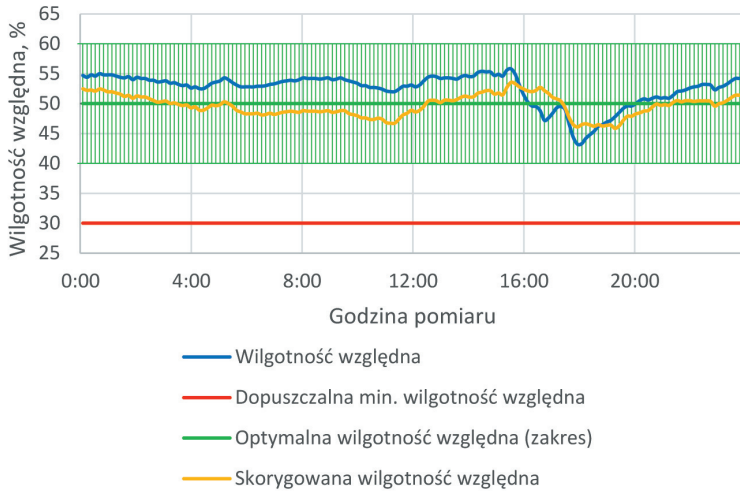
Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 8 stwierdzono, że średniobowa wilgotność powietrza w pokoju wynosiła 29,0% (38,5% po obliczeniowym skorygowaniu temperatury wewnętrznej do 20°C), natomiast średniobowa temperatura powietrza wewnętrznego wynosiła $24,6^{\circ}\text{C}$. Dane z pomiarów były kumulowane na darmowym serwerze FTP.

Pomiary dla wybranych dwóch dni z okresu letniego



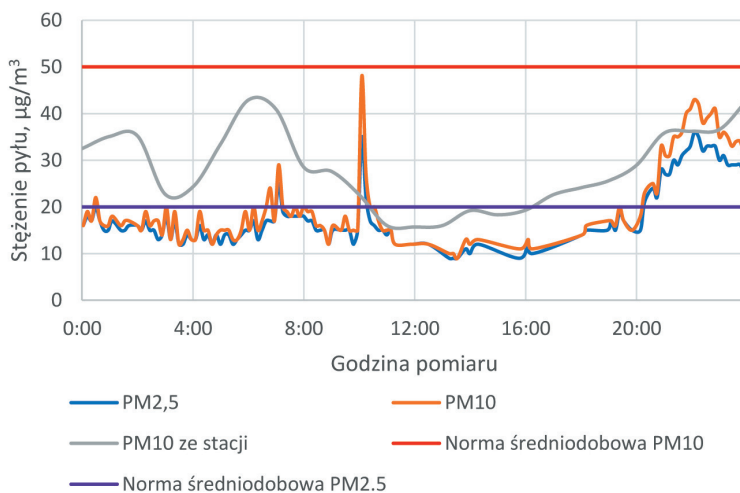
Rys. 9. Wykres zapylenia powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w dniu 8.08.2021 r.

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 9 stwierdzono, iż średniodobowe stężenie PM10 powietrza wewnętrznego wynosiło $4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (9,3% normy), natomiast średniodobowe stężenie PM2.5 powietrza wewnętrznego $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (22,2% normy). Dane z pomiarów były kumulowane na płatnym serwerze FTP.



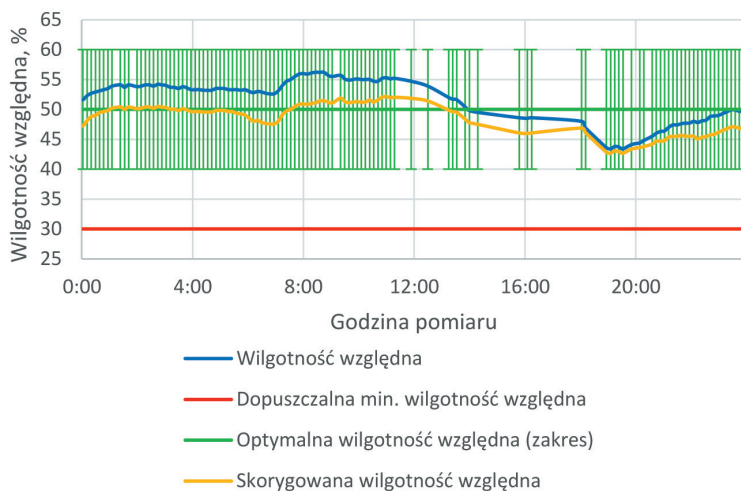
Rys. 10. Wykres wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w dniu 8.08.2021 r.

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 10 stwierdzono, że średniobowa wilgotność powietrza wewnętrznego wynosiła 52,5% (49,7% po obliczeniowym skorygowaniu temperatury wewnętrznej do 26°C), natomiast średniobowa temperatura powietrza wewnętrznego $25,1^{\circ}\text{C}$. Dane z pomiarów były kumulowane na płatnym serwerze FTP.



Rys. 11. Wykres zapylenia powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w dniu 23.07.2021 r.

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 11 stwierdzono, że średniodobowe stężenie PM10 powietrza wewnętrznego wynosiło $24,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (49,8% normy), natomiast średniodobowe stężenie PM2.5 powietrza wewnętrznego – $18,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (90,3% normy). Dane z pomiarów były kumulowane na darmowym serwerze FTP.



Rys. 12. Wykres wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w dniu 23.07.2021 r.

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 12 stwierdzono, że średniodobowa wilgotność powietrza wewnętrznego wynosiła 51,8% (48,5% po obliczeniowym skorygowaniu temperatury wewnętrznej do 26°C), natomiast średniodobowa temperatura powietrza wewnętrznego wynosiła $24,9^{\circ}\text{C}$. Dane z pomiarów były kumulowane na darmowym serwerze FTP.

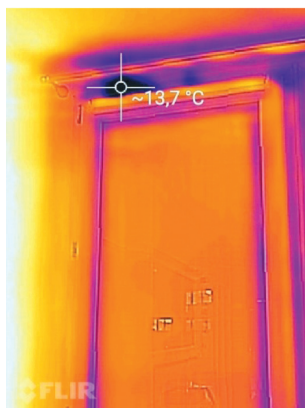
Na podstawie zgromadzonych danych nasuwa się wniosek, że w okresie zimowym dochodzi do nadmiernego zapylenia powietrza wewnętrznego. Dane pomiarowe z czujnika „SmogTok” wskazują na to, że dużą część pyłu PM10 w powietrzu wtórnym stanowi pył PM2.5. Bazując na korelacji pomiędzy stężeniem PM10 w powietrzu zewnętrznym a PM10 i PM2.5 powietrza wtórnego oraz rozkładom stężeń tych pyłów w czasie, szacuje się, że pył zawarty w powietrzu zewnętrznym można w większości zakwalifikować do pyłu PM2.5. Ponadto w okresie zimowym występuje niska wilgotność względna powietrza wewnętrznego (patrz rys. 6 i 8). Samo obniżenie temperatury wewnętrznej do zalecanej, wynoszącej 20°C , spowodowałoby wzrost wilgotności względnej do tego stopnia, że jej średniodobowy poziom zawierałby się w optymalnym przedziale wartości. Wilgotność względna w okresie letnim zarówno bez korekty, jak i z korektą temperatury powietrza wewnętrznego, zawierała się w optymalnym przedziale wartości. Z przeprowadzonych badań wynikają wnioski nie tylko dotyczące jakości powietrza, ale również funkcjonalności serwera FTP. Wykresy przedstawione na rysunkach 6 i 8 wskazują na

występowanie problemów z zapisem danych na wybranym darmowym serwerze FTP, w przeciwieństwie do wersji płatnej (patrz rys. 10).

5.3. Rozkład temperatury przegród wraz z określeniem charakteru ich nieszczelności

W tej części zaprezentowano rozkład temperatury wewnętrznych powierzchni przegród budowlanych, sprawdzony z użyciem kamery termowizyjnej oraz pirometru. Ponadto wykazano prędkości przepływu powietrza przez nieszczelności i jego temperatury zmierzone termoanemometrem.

Temperatury większości przegród badanego pomieszczenia spełniały wymagania komfortu cieplnego. Problem stanowiły zewnętrzne przegrody przezroczyste i niektóre części zewnętrznych przegród nieprzezroczystych w okresie zimowym. Ich temperatura nie znajdowała się w akceptowalnym zakresie, wymienionym we wprowadzeniu. W warunkach opisanych w rozdziale 4, dotyczących pomiarów termowizyjnych, temperatura szyb wynosiła około 17°C , natomiast pozostałe zimniejsze obszary przedstawiono na rysunkach 13, 15, 17 i 18.



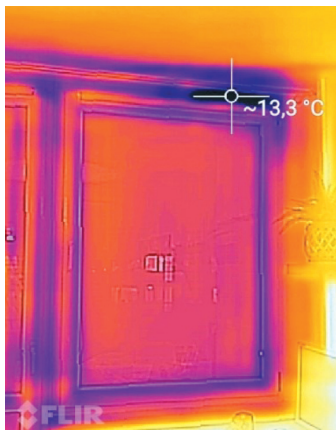
Rys. 13. Pomiar górnej części drzwi balkonowych kamerą termowizyjną

Nieszczelność przedstawioną na rysunku 13 zweryfikowano termoanemometrem i stwierdzono, że w zaznaczonym miejscu prędkość przepływu powietrza wynosiła $2,32\text{ m/s}$, a temperatura powietrza nawiewanego $15,4^{\circ}\text{C}$.



Rys. 14. Górna część ościeżnicy drzwi balkonowych z częściowo wyciętą uszczelką

Miejsce wyciętej uszczelki z powyższej grafiki (rys. 14) to środek szerokości drzwi balkonowych. Pole o obniżonej temperaturze przy tej nieszczelności jest widoczne na rysunku 13, na prawo od zaznaczonej na nim nieszczelności.



Rys. 15. Pomiar okna kamerą termowizyjną

Nieszczelność przedstawioną na rysunku 15 zweryfikowano termooanemometrem i na tej podstawie stwierdzono, że w zaznaczonym miejscu prędkość przepływu powietrza wynosiła 1,80 m/s, a temperatura powietrza nawiewanego 15,4°C.

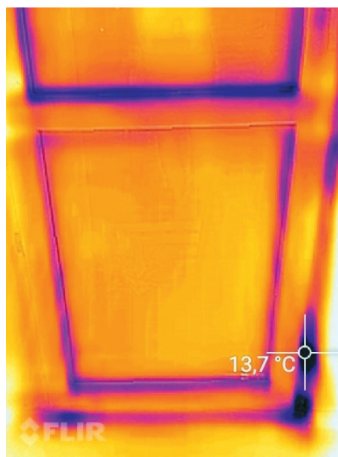


Rys. 16. Górna część ościeżnicy okna z częściowo wyciętą uszczelką

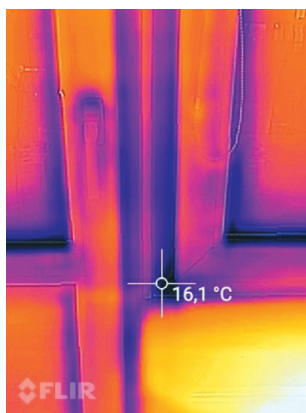
Miejsce wyciętej uszczelki (rys. 16) to środek szerokości okna. Pole o obniżonej temperaturze przy tej nieszczelności jest widoczne na rysunku 15 na lewo od wskazanej na nim nieszczelności.

Nieszczelność przedstawioną na rysunku 17 zweryfikowano termooanemometrem i stwierdzono, że w zaznaczonym miejscu prędkość przepływu powietrza wynosiła 0,50 m/s, a temperatura powietrza nawiewanego 15,4°C.

Nieszczelność przedstawioną na rysunku 18 zweryfikowano termooanemometrem i stwierdzono, że w zaznaczonym miejscu prędkość przepływu powietrza wynosiła 0,29 m/s, a temperatura powietrza nawiewanego 15,4°C.



Rys. 17. Pomiar dolnej części drzwi balkonowych kamerą termowizyjną



Rys. 18. Pomiar dolnego lewego rogu części okna kamerą termowizyjną

Na podstawie powyższych informacji stwierdzono, że zainstalowane przegrody przezroczyste są nieszczelne do tego stopnia, że użytkownicy tego pomieszczenia odczuwają przeciąg. Nieszczelności występują nie tylko w górnej części pomieszczenia, ale także w dolnej. W związku z tym zimą dochodzi do sytuacji, w której na nogi użytkowników jest nawiewane zimne powietrze (np. o temperaturze około 15°C). Ponadto w górnej części drzwi balkonowych oraz okna znajdują się uszczelki z wyciętymi fragmentami. Najprawdopodobniej jeden z poprzednich właścicieli mieszkania zrobił to, aby zwiększyć krotność wymian powietrza w pomieszczeniu. Minusem tego rozwiązania jest to, że taki prowizoryczny nawiewnik nie ma filtra, przez co do wnętrza pomieszczenia trafia duży procent zanieczyszczeń z powietrza zewnętrznego. Warto zaznaczyć, że większość pyłów zarówno w powietrzu wewnętrznym, jak i zewnętrznym stanowiły

pyły PM2.5. Następną wadą tego rozwiązania jest brak możliwości sterowania strumieniem powietrza nawiewanego bez zmiany pracy wentylatora.

5.4. Instalacja centralnego ogrzewania

Z przeprowadzonych oględzin wynika, że orurowanie systemu centralnego ogrzewania, przechodzące przez badane pomieszczenie, jest nieizolowane, a zamontowany grzejnik członowy mocno osłonięty. Zimą przy nastawie głowicy termostatycznej na maksymalną temperaturę, czyli 26°C, czujnik „SmogTok” znajdujący się na biurku (patrz rozdz. 3) wskazywał 24°C. Warto zaznaczyć, że głowica nie jest wyposażona w rurkę kapilarną. Na rysunkach 19 i 20 przedstawiono fragment grzejnika, jego głowicę termostatyczną i najbliższe otoczenie.



Rys. 19. Widok I na głowicę termostatyczną grzejnika członowego i jej okolice



Rys. 20. Widok II na głowicę termostatyczną grzejnika członowego i jej okolice

W takim wariantcie instalacji c.o. inwestycja w samą rurkę kapilarną, umożliwiającą odczyt temperatury przez głowicę termostatyczną w innym miejscu, najprawdopodobniej pogorszyłaby komfort cieplny osoby pracującej przy biurku i zwiększyła koszty eksploatacyjne. Montaż kratki na biurku byłby ryzykowny. Obecnie niemal cała jego powierzchnia jest zajęta przedmiotami. W przypadku redukcji elementów znajdujących się na biurku i zamontowaniu ww. kratki istnieje wysokie ryzyko jej zastawienia w przyszłości.

6. Podsumowanie i wnioski

W 2021 roku przeprowadzono badanie mikroklimatu pomieszczenia mieszkalnego, znajdującego się w budynku starego budownictwa z okresu PRL. Celem analizy było określenie zapylenia, wilgotności względnej i temperatury powietrza wewnętrznego, zapylenia powietrza zewnętrznego, charakterystyki zaimplementowanej instalacji wentylacyjnej oraz centralnego ogrzewania, rozkładu temperatur przegród pomieszczenia i charakteru ich nieszczelności. Aby uzyskać jak największą ilość informacji z różnych źródeł, przeprowadzono oględziny pomieszczenia, wywiad z jego użytkownikami, spotkanie z kierownikiem GZM nr 6 Spółdzielni Mieszkaniowej „Oskard” oraz analizę dokumentacji technicznej budynku.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że mieszkanie, w którym znajduje się badane pomieszczenie, jest objęte wentylacją mechaniczną wywiewną. Co ważne, w badanym pomieszczeniu nie zamontowano profesjonalnych nawiewników. Źródłem ogrzewania jest w nim żeliwny grzejnik członowy z nieizolowanym orurowaniem. Znajdujące się w nim okno i drzwi balkonowe są w znaczącym stopniu nieszczelne. Analiza wskazuje na to, że wymagana jest jego modernizacja.

Z wywiadu z użytkownikami pomieszczenia wynika, że w okresie zimowym odczuwają duży dyskomfort, objawiający się przeciągami, odczuciem chłodu oraz niską jakością powietrza, szczególnie pod względem jego czystości. Problemy te wpływają negatywnie na zdolność koncentracji i utrudniają zasypianie. Zamontowane dwuszybowe przegrody przezroczyste PVC mają ponad dziesięć lat, więc znajdujący się w nich gaz izolacyjny (prawdopodobnie argon) w większości się ulotnił i został zastąpiony powietrzem, które charakteryzuje się większym współczynnikiem przewodzenia ciepła. Z powodu ich znacznej nieszczelności użytkownicy tego pomieszczenia odczuwają przeciąg. Zaleca się wymianę okna i drzwi balkonowych na szczelne, z nawiewnikami automatycznymi, z filtrami dokładnymi oraz wstawienie oczyszczacza powietrza. Szczelniejsze okno i drzwi balkonowe prawdopodobnie wyeliminują potrzebę intensywnego ogrzewania pomieszczenia, jak to ma obecnie miejsce.

Z uwagi na występującą niską wilgotność względną powietrza w pomieszczeniu zimą (patrz rys. 6 i 8) zaleca się w tym okresie stosowanie nawilżacza powietrza oraz utrzymanie temperatury na poziomie od 20°C do 22°C.

Okazało się również, że grzejnik jest bardzo zabudowany, a głowica termostatyczna bez rurki kapilarnej częściowo zasłonięta metalową nogą biurka. W rezultacie temperatura powietrza w pomieszczeniu jest na ogół niższa aż o 2°C od temperatury powietrza przy głowicy termostatycznej. Po całościowej analizie zamocowanego grzejnika i jego otoczenia zaleca się jego wymianę na grzejnik płytowy. Ponadto konieczne jest zapewnienie większej przestrzeni przy grzejniku, np. przez wymianę biurka narożnego na mniejsze i umiejscowienie go z uwzględnieniem odpowiedniego dystansu. Orurowanie instalacji c.o. w pomieszczeniu powinno zostać zaizolowane, co przyniesie największe korzyści w przypadku izolacji rur całej instalacji w budynku.

Ostatni wniosek jest taki, że przeprowadzając takie badanie, warto zainwestować w płatny serwer FTP. Jego cena jest znikoma w skali roku, a funkcjonalność zapewni odpowiedni zapis danych.

Literatura

- Adamczyk I.K., Andrusiuk, A. Dec, E. Knyszewska, M. Przybylska, B. Różańska, M. Sobczyk, *Zamieszkane Budynki. Narodowy Spis Powszechny Ludności i Mieszkań 2011*, Główny Urząd Statystyczny, https://stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/L_zamieszk_budynki_nsp_2011.pdf [dostęp: 21.02.2022].
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, *Poziomy dopuszczalne zanieczyszczeń w powietrzu ze względu na ochronę zdrowia ludzi i ochronę roślin, terminy ich osiągnięcia oraz okresy, dla których uśrednia się wyniki pomiarów*, https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/annual_assessment_air_acceptable_level [dostęp: 21.02.2022].
- Nowakowski M., *CAT S60, pancernik z termowizją: test i recenzja*, <https://mobility-news.pl/cat-s60-pancernik-z-termowizja-test-i-recenzja/> [dostęp: 8.06.2023].
- Pełech A., 2008, *Wentylacja i klimatyzacja – podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- PN-B-03421:1978, *Wentylacja i klimatyzacja – Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-B-02151-02:1987, *Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach – Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- SmogTok, *Opis czujnika SmogTok*, <https://smogtok.com/description> [dostęp: 8.06.2023].

Modułowe oświetlenie skupione na człowieku jako element systemu automatyki budynkowej – budowa i zastosowanie

Filip Durlik , Katarzyna Bańczyk , Radosław Dziubacki, Dominik Latoń , Aleksander Skała , Jakub Grela 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: W pracy opisano ideę oświetlenia skupionego na człowieku (HCL, ang. *Human Centric Lighting*) oraz zastosowanie modułowego oświetlenia zgodnego z tą koncepcją, jako elementu systemu automatyki budynkowej. Omówiono proces projektowania i prototypowania opraw świetlnych, uwzględniając zaawansowane funkcje adaptujące oświetlenie do panujących w pomieszczeniu warunków i aktualnych potrzeb użytkowników. Prace wykazały potencjał ruchomych źródeł światła do precyzyjnego oświetlania określonych obszarów oraz znaczenie algorytmów sterowania dla pełnego wykorzystania tego potencjału.

Zaprezentowano trójwarstwową architekturę systemu (poziom obiektowy, sterowania lokalnego i nadrzędnego), umożliwiającą dopasowanie parametrów do preferencji użytkowników oraz optymalizację pracy według kryteriów, takich jak efektywność energetyczna. Praca zawiera podstawy teoretyczne, analizę literatury naukowej, proces budowy modułu od strony technicznej oraz wyniki badań fotometrycznych prototypów modułów.

Słowa kluczowe: oświetlenie skupione na człowieku, Internet Rzeczy, automatyka budynkowa, wielopoziomowe systemy sterowania

DESIGN AND APPLICATION OF HUMAN CENTRIC LIGHTING MODULES AS PART OF A BUILDING AUTOMATION SYSTEM

Abstract: The paper describes the concept of Human Centric Lighting (HCL, or Human Centric Lighting), and the application of modular lighting according to this concept as part of a building automation system. The process of designing and prototyping luminaires was discussed, taking into account advanced features that adapt the lighting to the ambient conditions in the room and the current needs of the users. The work demonstrated the potential of moving light sources to precisely illuminate specific areas and the importance of control algorithms to fully realize this potential.

A three-layer system architecture (object, local control and supervisory) was presented, allowing parameters to be adjusted according to user preferences and optimizing operation according to criteria such as energy efficiency. The theoretical foundations based on the analysis of scientific articles and the actual technical process of building the lighting module, as well as the results of photometric tests of module prototypes are presented in the paper.

Keywords: Human Centric Lighting, Internet of Things, building automation, multi-level control system

1. Wprowadzenie

Biologiczny zegar i naturalne reakcje organizmu związane z codzienną rutyną to tematy od lat będące przedmiotem badań naukowych zarówno w obszarze nauk biologicznych, jak i psychologii. Ciekawymi aspektami ściśle związanymi z tym zagadnieniem są wszystkie zewnętrzne czynniki wpływające na cykliczność funkcjonowania ludzkiego ciała na co dzień oraz procesy w nim zachodzące. Wartość tych mechanizmów i badań ich dotyczących została podkreślona w 2017 roku przez Norweski Komitet Noblowski, który przyznał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii i medycyny zespołowi opisującemu zasady cyklu okołodobowego na organizmie modelowym. Opis przygotowany w ramach pracy naukowej noblistów koncentrował się na genach i białkach kontrolujących dobowy rytm u muszek owocowych. W pracy podkreślano analogiczne zachowania również u innych organizmów, włączając w to ludzi (Nauka w Polsce n.d.).

Badania nad zegarem biologicznym człowieka coraz częściej potwierdzają wpływ światła na aspekty pozawzrokowe naszego funkcjonowania, co znacząco wpływa na projektowanie oświetlenia. Obserwacje potwierdziły, że ekspozycja na dynamicznie zmieniające się światło dzienne jest kluczowa dla prawidłowego funkcjonowania organizmu i jego zdrowego rozwoju (Petrinska i Nikolova 2023). Coraz częściej uwzględnia się nowo zdefiniowane biologiczne potrzeby użytkowników, co prowadzi do prób odwzorowania naturalnych warunków oświetleniowych również wewnątrz pomieszczeń. Cała koncepcja odpowiadająca tym działaniom została nazwana oświetleniem skoncentrowanym na człowieku lub w skrócie HCL (ang. *Human Centric Lighting*).

Oświetlenie skoncentrowane na człowieku – idea oświetlenia przyjaznego biologicznie

Koncepcja HCL obejmuje przede wszystkim dostosowywanie intensywności oświetlenia, jego temperatury barwowej oraz ich dynamiczne zmiany w czasie. Kolejnym istotnym zadaniem podejmowanym w ramach HCL jest personalizacja oświetlenia zgodnie z preferencjami użytkownika, wynikającymi między innymi z wieku, płci, rodzaju wykonywanej pracy, historii ekspozycji na światło, a nawet naturalnych preferencji i adaptacji wynikających z lokalizacji geograficznej. Wszystkie te czynniki podlegają dalszym badaniom laboratoryjnym i środowiskowym, których celem jest sprecyzowanie i ustalenie bezpośredniego wpływu poszczególnych konfiguracji na stan psychofizyczny człowieka, efektywność jego pracy i możliwości wydłużenia czasu skupienia (Wantuch i Durlik 2023).

Postęp technologiczny w dziedzinie techniki oświetleniowej dostarczył projektantom i użytkownikom narzędzi, jakimi są diody elektroluminescencyjne (LED). Ich wynalezienie i powszechne stosowanie stanowiło istotny przełom w dziedzinie sztucznego

oświetlenia. Parametry optyczne diod LED i sposób, w jaki można nimi sterować, umożliwiają realizację założeń koncepcji HCL w praktyce. Dynamiczna regulacja parametrów, takich jak temperatura barwowa i natężenie strumienia świetlnego, pozwala na niemalże perfekcyjne odwzorowanie zmian oświetlenia naturalnego. Jednakże koncepcja ta stawia w centrum człowieka, dlatego istotne jest badanie reakcji organizmu na zmiany warunków oświetleniowych i wykorzystanie uzyskanych odczytów do tworzenia algorytmów automatycznego sterowania oświetleniem. Do tego celu wykorzystuje się czujniki parametrów życiowych sprzężone z technologią Internetu Rzeczy (IoT).

Rosnąca złożoność aplikacji oświetleniowych rozwijanych zgodnie z koncepcją HCL, podobnie jak wiele procesów technologicznych, polega na ciągłej analizie ogromnych ilości danych przez wyspecjalizowane systemy komputerowe, a nawet na implementacji samouczącego się oprogramowania oraz sztucznej inteligencji.

Równie kluczowa jak systemy realizujące sterowanie i obsługujące skomplikowane algorytmy jest strona sprzętowa opraw i modułów oświetleniowych, dzięki którym możliwe jest dostarczanie światła. Element wykonawczy nie powinien być przy tym ograniczeniem, a raczej częścią urządzenia, która rozszerza możliwości tworzonych instalacji, dając projektantom i instalatorom swobodę realizacji często skomplikowanych i złożonych scen oświetleniowych w sposób wspierający użytkowników.

Za cel projektu badawczego obrano zaprojektowanie oraz wykonanie modułu oświetleniowego, który poza łatwością instalacji i konfiguracji oferować będzie mechanizmy umożliwiające realizację algorytmów wspomagających naturalny cykl dobowy człowieka. Założono również rozszerzenie możliwości modułu, poza samą regulacją parametrów oświetlenia, o rozwiązania umożliwiające jak najszersze wykorzystanie naturalnego światła słonecznego docierającego do pomieszczeń przez okna. Wskutek rozważań nad istniejącymi na rynku rozwiązaniami oraz możliwościami, jakich dostarczają systemy sterowania automatyką budynkową, zdecydowano się rozwinąć projekt o mechanikę realizującą ruch źródła światła. Tym sposobem poza zadawaniem nastaw natężenia i barwy światła możliwe jest skierowanie strumienia w obszar pomieszczenia, w którym jest go mniej ze względu na kąt padania promieni słonecznych lub większą odległość od okien.

2. Aktualny stan wiedzy

W literaturze naukowej temat *Human Centric Lighting* (HCL) jest szeroko omawiany i analizowany z różnych perspektyw. Światło, poza wpływem na wzrokowe odbieranie jego barwy i jasności przez człowieka, oddziałuje także na receptory pozawzrokowe, które znajdują się w ludzkim oku. Stymulacja tych receptorów ma wpływ na syntezę przez organizm melatoniny – hormonu odpowiadającego za regulację cyklu dobowego,

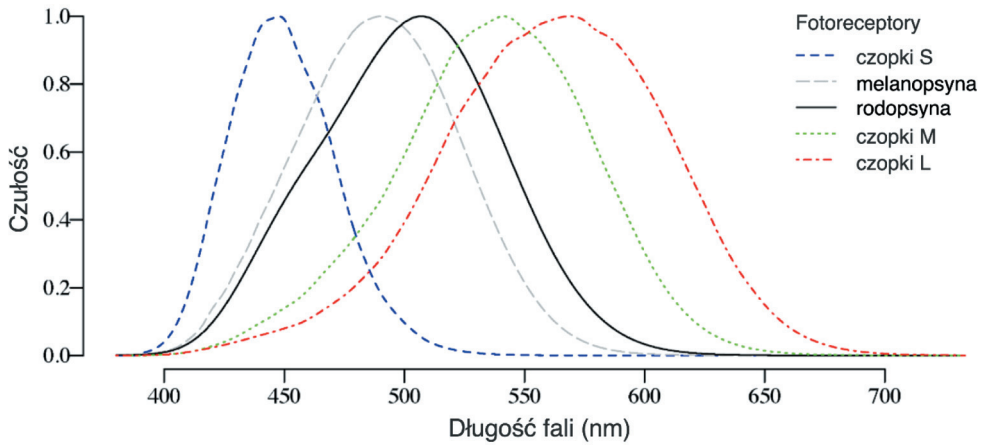
temperatury ciała i trybu działania, na jaki zorientowany jest organizm. Dostępne na rynku oprawy oświetleniowe najczęściej kontrolowane są przez uniwersalny protokół DALI-2, który proces rozjaśniania oraz przyciemniania opraw realizuje po nieliniowej krzywej dostosowanej do czułości ludzkiego oka (rys. 1).



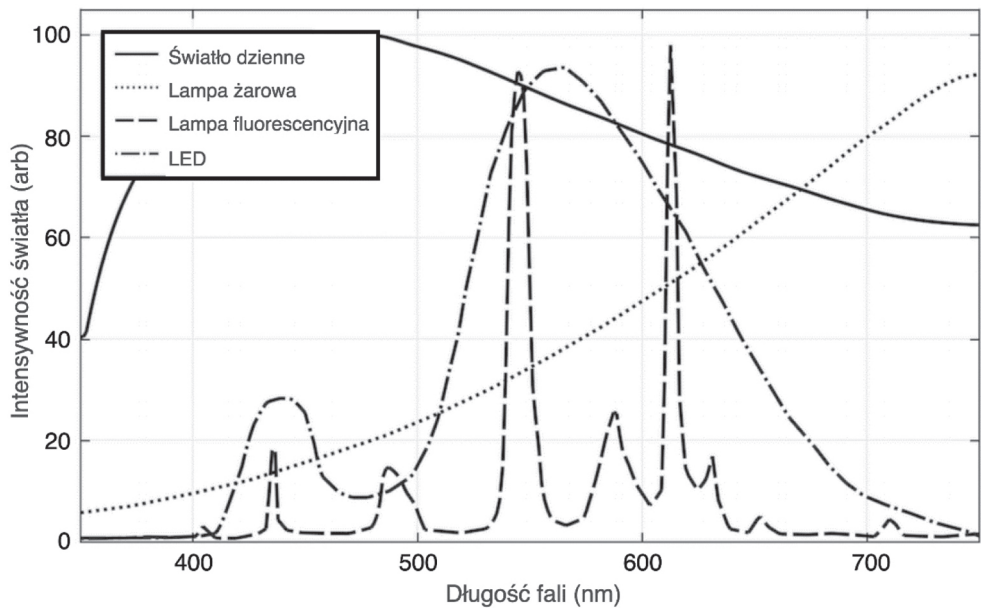
Rys. 1. Porównanie spektrum światła: a) klasyczny LED o ciepłej białej barwie; b) biały LED o zmodyfikowanej charakterystyce; c) światło słoneczne
Źródło: opracowanie własne na podstawie www.led-professional.com

Podstawowym wsparciem rozwoju technologii oświetleniowej oraz samej idei oświetlenia skupionego na człowieku są prowadzone na całym świecie badania naukowe tych obszarów, które właściwie każdego roku wnoszą coś nowego do stanu wiedzy. Od strony inżynierskiej i biologicznej HCL w postaci, która znana jest aktualnie, wywodzi się z przełomowego odkrycia dodatkowego, piątego typu receptorów w oku człowieka, a właściwie wszystkich ssaków. W odróżnieniu od receptorów wzrokowych, czyli pręcików – odpowiadających za widzenie kolorów i czopków, dzięki którym możliwe jest widzenie w słabych warunkach oświetleniowych, receptory ipRGC odpowiadają za zjawiska pozawzrokowe. Receptory te zwane są melanopsynowymi i nie są w ogóle zaangażowane w tworzenie obrazów wizualnych. Istnienie receptorów ipRGC odkryto w 2000 roku podczas badania wpływu światła na cykl dobowy myszy, których organizmy nie wytworzyły pozostałych receptorów (Hankins i in. 2008). Ich czułość na poszczególne długości fali elektromagnetycznych nie pokrywa się z żadnym rodzajem receptorów wizualnych (rys. 2). Badania ujawniały bezpośredni wpływ melanopsyny na mechanizm rozszerzania i zwięzania źrenic oraz co ważniejsze dla HCL – hamowanie syntezy melatoniny w szyszynce (Petrska i Nikolova 2023).

Analiza charakterystyki popularnych typów źródeł światła (rys. 3) pozwoliła na zauważenie poważnych braków w emisji fali o długości, na którą badane receptory są najczulsze (490 nm). Rozwój techniki i tym samym technologii wytwarzania diod LED dał producentom narzędzia umożliwiające formowanie spektrum świecenia w celu jeszcze lepszego naśladowania naturalnego światła słonecznego. Możliwe jest to na przykład przez oparcie emisji światła na fioletowych (410 nm) chipach w miejsce stosowanych dotychczas niebieskich (450 nm), a następnie pokrycie fosforem wywołującym rozsyłanie światła o szerokim spektrum (Wantuch i Durlik 2023).



Rys. 2. Czułość poszczególnych typów receptorów na światło o różnej długości fali
Źródło: opracowanie własne na podstawie Conus i Geiser (2020)



Rys. 3. Porównanie spektrum popularnych źródeł światła
Źródło: opracowanie własne na podstawie *Calculating the Emission Spectra from Common Light Sources*

W wielu pracach badawczych naukowcy skupiają swoją uwagę na aspekcie wpływu HCL na zdrowie. W artykule Blume'a i in. (2019) autorzy podkreślają znaczenie światła w synchronizacji rytmów dobowych człowieka, które wpływają na cykle snu i czuwania oraz inne procesy biologiczne. Autor opisuje, jak rytmiczne zmiany, w oświetleniu

środowiskowym, wpływają na zachowania, takie jak odpoczynek podczas snu i aktywność podczas czuwania oraz ich biologiczne podstawy. Zwraca także uwagę na znaczący wpływ sztucznego światła, zwłaszcza wieczorami, na zakłócanie rytmów dobowych i snu, co może prowadzić do zaburzeń snu i czuwania. Również w publikacji Browna i in. (2022) autorzy podają wytyczne dotyczące optymalnego doboru światła w ciągu dnia, wieczorem i w nocy, aby wspierać fizjologię, sen i czujność. Skupili się oni na analizie wrażliwości ludzkich reakcji cyrkadianych, neuroendokrynnych oraz alarmowych na światło, które są wyrażone w ilości melanopowego równoważnika światła dziennego. Podobne badania są prowadzone już od wielu lat – przykładem tego jest artykuł (Wever i in. 1983), który opublikowany został już w latach 80. ubiegłego wieku. Przeprowadzone w nim eksperymenty wykazały, że wyższa intensywność światła (powyżej 4000 luksów), która hamuje wydzielanie melatoniny, może skuteczniej synchronizować ludzkie rytmy dobowe, wydłużając górną granicę synchronizacji do ponad 29 godzin.

Kluczową konkluzją, wynikającą z tych publikacji, jest informacja, że światło może być skuteczną, nieinwazyjną opcją terapeutyczną poprawiającą sen, nastrój i ogólne samopoczucie. Jednak rola oświetlenia nie kończy się na wspomaganiu samopoczucia, ma ono bowiem także działanie terapeutyczne. Przykładem są badania prowadzone na pacjentach z chorobą Alzheimera (Campbell i in. 1988). Ze względu na swoją specyfikę i często występujące zakłócanie rytmów okołodobowych choroba ta prowadzi do nieregularnych wzorców snu, nocnego wędrowania i zwiększonego niepokoju lub dezorientacji. Badania pokazały, że regularna ekspozycja na światło, szczególnie rano, może pomóc zresetować zegar okołodobowy i złagodzić te objawy. Terapia światłem o dużej intensywności wykazała poprawę jakości i czasu trwania snu, zredukowanie objawów depresji oraz zmniejszenie agitacji u pacjentów z chorobą Alzheimera.

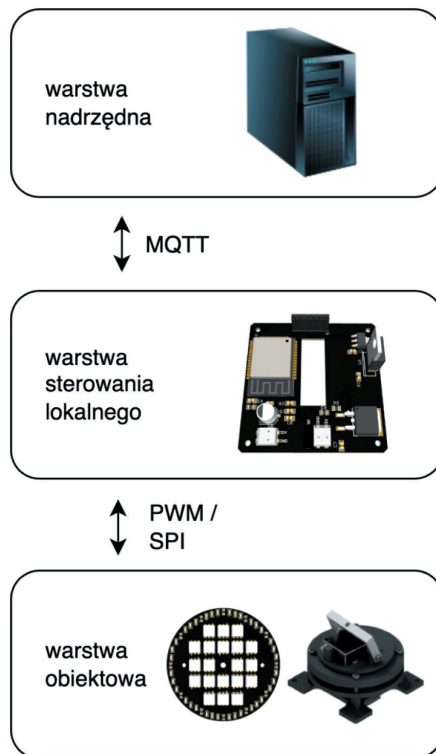
Prowadzone badania pozwalają zrozumieć, jak ważnym elementem jest właściwe oświetlenie i na ile aspektów w życiu wpływa. Jednak w celu poprawnej aplikacji oświetlenia w budynkach pod uwagę należy wziąć wiele parametrów i uwzględnić profil użytkownika w projekcie. W artykule (Jalali i in. 2024) autorzy oprócz badania wpływu oświetlenia na człowieka podjęli także temat rzeczywistego stosowania i implementacji idei HCL w codziennym życiu. Badanie to wypełnia lukę między naukowym zrozumieniem a praktyczną implementacją. Artykuł podkreśla również wyzwania związane z wdrażaniem HCL, takie jak konieczność precyzyjnych systemów sterowania oraz współpracy między różnymi interesariuszami. Zastosowania HCL obejmują różne środowiska, w tym biura, placówki zdrowotne, szkoły i domy mieszkalne, gdzie odpowiednie oświetlenie może poprawić nastrój, jakość snu oraz ogólny dobrostan użytkowników.

Opisywana w artykułach i badaniach rola oświetlenia i jego wpływ na poprawne funkcjonowanie zarówno jednostki, jak i społeczeństwa są kluczowe dla zapewnienia zdrowia i dobrego samopoczucia. Jednak zastosowanie standardowo dostępnych rozwiązań na rynku w większości przypadków nie pozwala na spersonalizowane tworzenie instalacji

oświetleniowej, która pod względem barwy, jasności, ale także padania wiązki świetlnej umożliwiłaby dostosowanie warunków do potrzeb jednostki. Jest to więc segment rynku charakteryzujący się niewykorzystanym potencjałem. Z tego względu wykonano moduły świetlne, które umożliwiają sterowanie tymi parametrami i spełniają ideę HCL.

3. Wykonanie modułu oświetleniowego

W wyniku prac zespołu opracowano moduł oświetleniowy dający możliwość realizacji funkcji oświetlenia skupionego na człowieku. Główną ideą projektu była jego funkcjonalność w kontekście zastosowania jako elementu zautomatyzowanej instalacji oświetleniowej sterowanej systemem automatyki budynkowej. Schematyczny obraz modelu instalacji, której główną częścią jest moduł oświetleniowy, został przedstawiony na rysunku 4. Moduł oświetleniowy jest częścią warstwy sterowania lokalnego, a także warstwy obiektowej. Funkcję warstwy nadrzędnej może pełnić główny sterownik systemu automatyki budynkowej, który umożliwi komunikację przy użyciu protokołu MQTT.

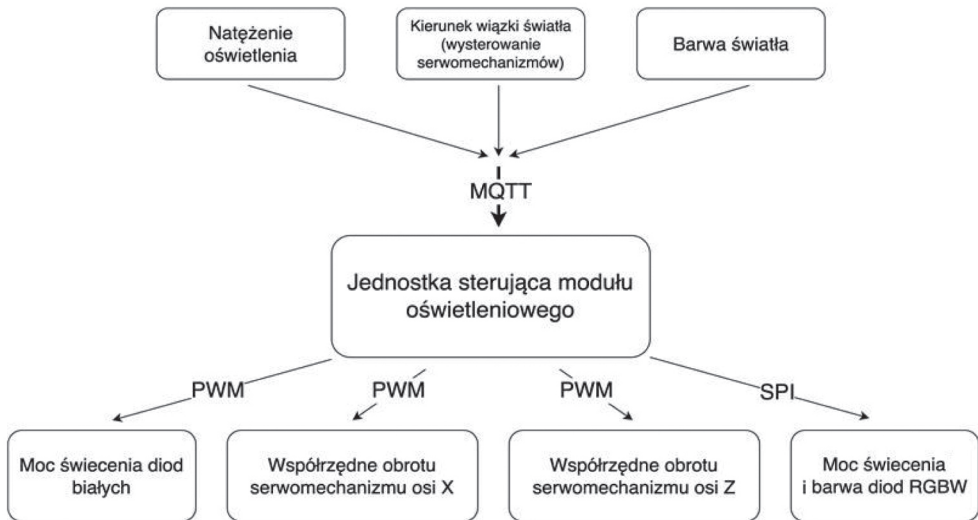


Rys. 4. Wielopoziomowa architektura systemu oświetleniowego z zaprojektowanym modułem

Schemat blokowy wykonanego urządzenia przedstawiono na rysunku 5. Moduł poprzez interfejs obsługujący protokół MQTT odbiera zadane przez jednostkę nadrzędną dane o docelowych parametrach światła oraz kierunku skupienia jego wiązki. Następnie za pomocą algorytmu zrealizowanego w układzie sterującym modułem przelicza te wartości na nastawy poszczególnych elementów wykonawczych, takich jak kąt obrotu serwomechanizmów czy barwa i natężenie światła diod LED.

Dzięki zastosowanym rozwiązaniom technicznym uzyskano następujące parametry i funkcje modułu:

- zakres regulacji barwy światła w przedziale około 2700–9000 K,
- regulacja natężenia z krokiem co 0,39%, w sumie 256 stanów,
- bezprzewodowa komunikacja przez Wi-Fi oraz protokół MQTT,
- kierowanie światła w określoną stronę podczas ruchu matrycy w dwóch osiach,
- możliwość łączenia modułów w oprawy (lampy).

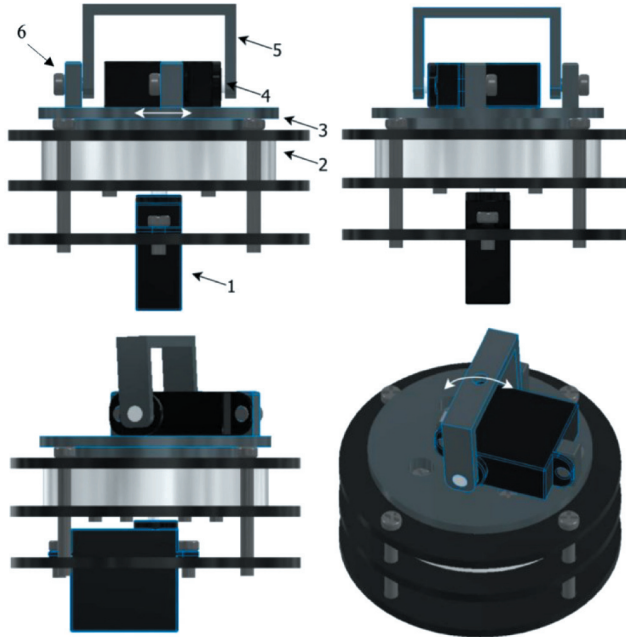


Rys. 5. Schemat blokowy działania modułu oświetleniowego

3.1. Budowa modułu

Moduł oświetleniowy złożony jest z trzech głównych części, którymi są układ napędowy, matryca LED oraz płytką z jednostką sterującą. Projekt układu napędowego wynikał z konstrukcji segmentu ruchomego, który umożliwia bezpieczne i kontrolowane sterowanie matrycą. Istotne było, aby umożliwić ruch matrycy wokół dwóch osi, co pozwala na jej wysterowanie w dowolnym kierunku. Wybór metody sterowania determinował niewielki rozmiar modułu świetlnego. Z tego względu zdecydowano się na zastosowanie serwomechanizmów o niewielkich rozmiarach, które umożliwiają stabil-

ny i kontrolowany ruch. W całej konstrukcji umieszczone zostały dwa serwomechanizmy sterujące ruchem obrotowym względem osi X oraz Z. Projekt segmentu mechanicznego (rys. 6) wykonano za pomocą oprogramowania Autodesk Inventor.



Rys. 6. Budowa segmentu mechanicznego

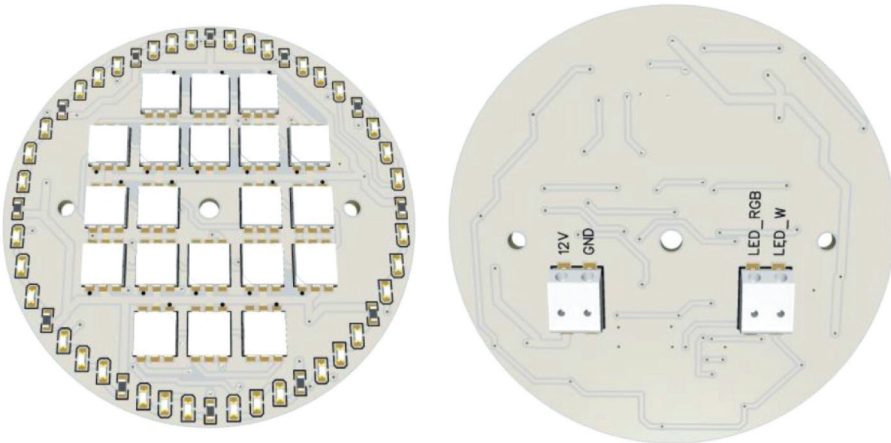
Poszczególne elementy konstrukcji oznaczono na pierwszym rzucie (widok z przodu):

1. serwomechanizm realizujący ruch obrotowy względem osi Z,
2. łożysko zmniejszające opory ruchu,
3. podstawa mocująca drugi serwomechanizm,
4. serwomechanizm realizujący ruch w osi X,
5. ramię utrzymujące matrycę LED,
6. łożysko kulkowe mocujące ramię.

W kolejnym etapie zaprojektowana została matryca LED. Jej budowa związana była z określeniem kilku podstawowych parametrów, które determinowały jej funkcjonalność. Był to jej rozmiar, dobór diod LED oraz sposób montażu do części mechanicznej.

Matryca została zaprojektowana w oprogramowaniu EasyEDA. Jej średnica wynosi 54 mm. Do jej wykonania zastosowano dwa typy diod. Pierwszym z nich są adresowalne diody RGBW, które pozwalają na sterowanie natężeniem oraz barwą światła każdej diody indywidualnie. Drugim typem są białe diody z możliwością regulacji ich

jasności z zastosowaniem odpowiedniego wypełnienia w sygnale PWM. Diody białe znajdują się po zewnętrznej stronie matrycy, co zostało pokazane na rysunku 7. Połączone szeregowo po trzy tworzą one łańcuchy wraz z rezystorem ograniczającym prąd. Następnie szeregi połączone zostały równoległe, co dało w sumie dwanaście sekcji po trzy diody. Ma to dodatkowe korzyści. W przypadku awarii, w której ucierpiałyby jedna dioda, odcięty od zasilania zostaje tylko jeden łańcuch, a pozostałe pracują bez zmian w parametrach zasilania. Adresowalne diody RGBW zostały umieszczone w środkowej części matrycy, a dzięki ich systematycznemu rozmieszczeniu możliwe jest tworzenie prostych znaków świetlnych. Kolejnym istotnym aspektem jest dobór sposobu montażu matrycy do segmentu mechanicznego. Predystynowany jest on przez możliwości układu napędowego do poruszania matrycą. Zdecydowano się na montaż przy użyciu trzech śrub, co zapewnia trwałość konstrukcji. W celu zasilania matrycy i połączenia ze sterownikiem zaprojektowano dwa konektory z czterema wyprowadzeniami.

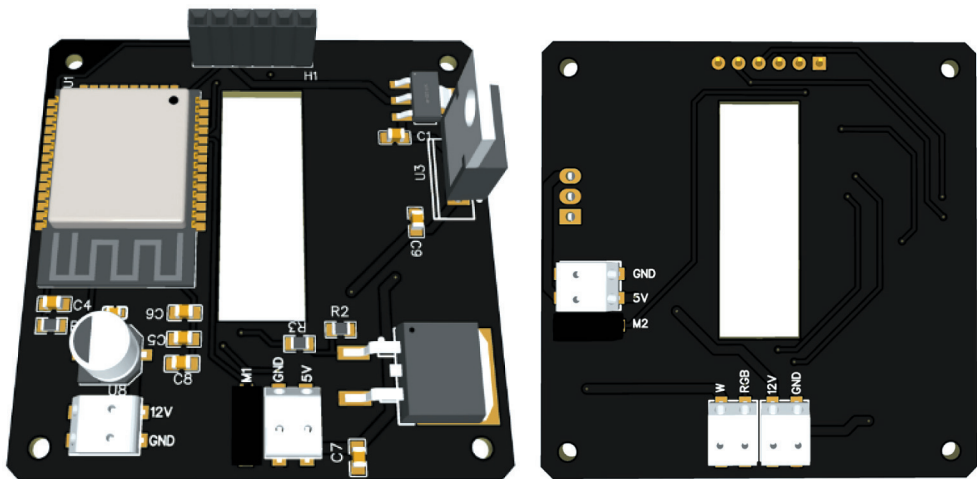


Rys. 7. Budowa matrycy LED

W ostatnim etapie tworzenia części sprzętowej wykonano płytkę sterującą, która zajmuje sięysterowaniem matrycy LED oraz serwo mechanizmów. Sercem całego układu jest mikrokontroler ESP32, który umożliwia kompleksowe sterowanie wszystkimi niezbędnymi elementami oraz posiada moduł Wi-Fi. Pozwala to na wykorzystanie protokołu MQTT. W celu wykonania płytki sterującej niezbędne było dobranie odpowiednich komponentów umożliwiających m.in. konwersję poziomów napięć zasilania, sterowanie diodami LED oraz zabezpieczenie układu. Do tych celów wykorzystano elementy, takie jak: stabilizatory, tranzystory, rezystory, kondensatory oraz diody zabezpieczające (rys. 8).

Sterownik posiada port, który umożliwia wgranie oprogramowania do komunikacji z serwerem nadrzędnym, przetwarzania otrzymywanych sygnałów oraz realizacji

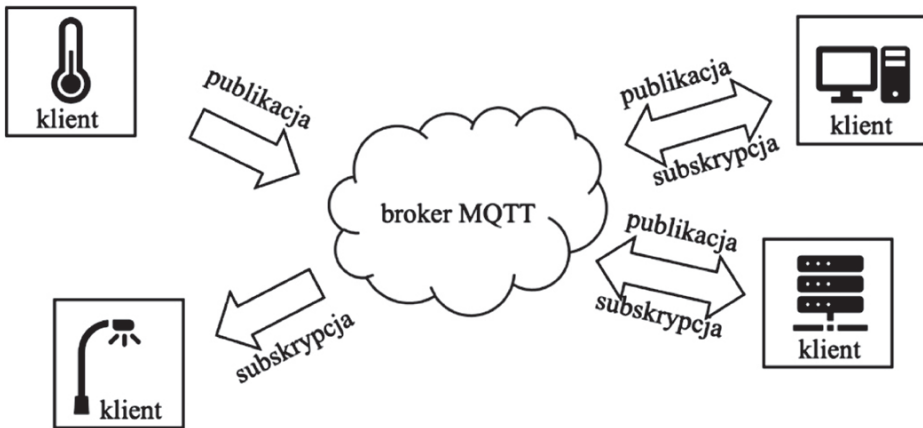
algorytmów sterowania przez odpowiednieysterowanie elementów wykonawczych, takich jak serwomechanizmy i diody emitujące światło. Umieszczono na nim także pięć konektorów, które służą do połączenia sterownika z matrycą, dwoma serwomechanizmami oraz podłączenia napięcia zasilającego o wartości 12 V. Kształt sterownika został dobrany w taki sposób, aby możliwe było umieszczenie go w spodniej części modułu mechanicznego, a tym samym maksymalne wykorzystanie przestrzeni urządzenia.



Rys. 8. Sterownik urządzenia wykonany w oprogramowaniu EasyEDA

3.2. Architektura oprogramowania

Algorytm sterujący modulem oświetleniowym został zaimplementowany z użyciem narzędzia ESPHome. Jest to środowisko umożliwiające konfigurację mikrokontrolerów za pomocą instrukcji tekstowych oraz zdalne sterowanie nimi przez systemy automatyki domowej. Pomimo uproszczonej składni implementacja poszczególnych funkcji wymaga znajomości problematyki realizowanego zagadnienia w celu odpowiedniego wykorzystania dostępnych w środowisku bibliotek. Kluczowy w tym przypadku jest właściwy dobór wartości konfiguracyjnych, takich jak na przykład częstotliwość sygnału czy współczynniki korygujące dla konkretnych podzespołów. Łączność z modulem oparta została na protokole MQTT, który przewiduje komunikację na zasadzie wymiany danych między pojedynczą jednostką centralną, zwaną brokerem, oraz klientami, którzy subskrybują wybrane, zdefiniowane w brokerze tematy. Klienci mogą również publikować swoje wiadomości w wybranych tematach i w ten sposób wymieniać dane z pozostałymi klientami. W przypadku opracowanego modułu każdy element wykonawczy ma swój unikatowy temat, podczas zmiany wartości którego dochodzi do skorygowania odpowiedniego parametru (rys. 9).



Rys. 9. Schemat komunikacji za pośrednictwem protokołu MQTT

Sposób przetwarzania sygnałów przez układ sterujący modułem przewiduje zmianę jednostek parametrów odczytanych z brokera na odpowiednie sygnały sterujące podzespołami. Przykładowo wartość barwy światła odczytaną w kelwinach należy przetworzyć na składowe RGB, a kierunek podany w postaci współrzędnych (x, y) na kąty obrotu poszczególnych serwomechanizmów, a następnie na współczynnik wypełnienia sygnału PWM.

Wartość mocy świecenia diod LED SMD2835 (diody białe) zadawana jest poprzez sygnał PWM o częstotliwości 50 Hz, a zasadniczo przez zmianę współczynnika jego wypełnienia. W tym przypadku wykorzystywany jest pełen zakres regulacji, czyli 0–100%.

Diody LED RGBW WS2812 sterowane są za pomocą protokołu SPI, w którym zakodowane są wartości dotyczące koloru oraz natężenia świecenia diod. Chcąc uzyskać światło o ciepłej barwie, należy wysterować diody w taki sposób, aby wartości składowej czerwonej przeważały nad wartościami definiującymi inne kolory. Budowa diod pozwala również na ustalanie parametrów osobno dla każdej z nich, gdyż każda ma własny adres. W efekcie umożliwia to dowolne włączenie i wyłączenie, a także ustalanie koloru każdej diody z osobna.

Do zadawania położenia serwomechanizmów wykorzystywany jest również sygnał PWM, jednak w celu zadania kąta obrotu stosowany jest wąski zakres wartości współczynnika wypełnienia pomiędzy 0,5% a 1% przy częstotliwości 50 Hz.

Sygnały dostarczane przez MQTT do modułu mogą pochodzić z wielu różnych źródeł, takich jak czujniki natężenia oświetlenia, czujniki ruchu czy stacji pogodowych. Wykorzystywane mogą być również kamery z algorytmami rozpoznawania i śledzenia postaci, dzięki którym możliwe jest określenie obecności i położenia osób w pomieszczeniu w celu dostosowania odpowiednich wartości oświetlenia oraz jego kierunku.

W instalacji wykonanej w ramach projektu pojedynczym modułem oświetleniowym zarządza serwer z zainstalowanym systemem Home Assistant, który przesyła wartości parametrów oświetlenia do jednostki sterującej modułem. Takie rozwiązanie zapewnia stabilność, a także możliwość magazynowania i odtwarzania danych historycznych, które następnie umożliwiają analizę zachowań użytkownika i lepsze dopasowywanie jasności i barwy do indywidualnych potrzeb, zgodnie z ideą HCL.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję realizacji oświetlenia skupionego na człowieku oraz skonstruowany i wytworzony autorski moduł oświetleniowy zrealizowany zgodnie z tą ideą. Opracowane urządzenie spełnia założenia HCL, takie jak: regulowana barwa i natężenie emitowanego światła, łączność bezprzewodowa umożliwiająca zadawanie wspomnianych parametrów oraz możliwość łączenia pojedynczych modułów w macierze. Cechy te znacznie ułatwiają tworzenie bardziej złożonych instalacji opartych na modułach oraz dostosowywanie ich pod konkretne pomieszczenia. Elastyczność rozwiązania zapewniona jest także przez niezależne sterowanie nie tylko każdym modułem, ale w przypadku diod RGB nawet każdym pojedynczym elementem.

Niespotykanym na rynku rozwiązaniem oświetlenia budynkowego jest zdolność modułu do pozycjonowania matrycy. Ukierunkowanie wiązki światła przez obrót i pochylenie elementu wykonawczego rozszerzają znacznie jego możliwości adaptacji do oświetlanych powierzchni oraz warunków wewnątrz pomieszczenia. Odpowiednie algorytmy oraz dane wejściowe z czujników pozwalają na przykład skierować światło w obszary, gdzie znajdują się ludzie, albo ograniczyć oświetlanie miejsc, gdzie dociera więcej światła słonecznego na rzecz tych bardziej oddalonych lub osłoniętych od promieni wpadających przez okna. Takie funkcje nie tylko wspierają człowieka oraz jego naturalny cykl dobowy, ale również pozwalają na oszczędność energii zużywanej przez oświetlenie.

Przeprowadzone badania i zrealizowane testy wskazały drogę i kierunek dalszych prac zmierzający do rozwoju opracowanej koncepcji. Jest to przede wszystkim opracowanie stabilniejszej formy komunikacji, która w odróżnieniu od wi-fi nie będzie aż tak wrażliwa na zmiany parametrów otoczenia i przeszkody w postaci ścian i drzwi. Następnie warto rozważyć dobór diod LED jako lepiej przystosowanych do rozwiązań oświetlenia skupionego na człowieku. Cechą modułu wymagającą jeszcze dopracowania jest również ogniskowanie (skupianie i rozpraszanie) wiązki światła. W tym przypadku remedium okazuje się optyka w postaci soczewki skupiającej światło emitowane

przez matrycę lub pojedyncze diody. Rezultatem projektu jest również rozpoznanie różnych poziomów realizacji tej optyki jako rozwiązania systemowego (na poziomie diody, na poziomie obudowy diody, na poziomie matrycy diodowej lub na poziomie źródła światła). To pozornie trywialne zagadnienie ma kluczowe znaczenie podczas kastomizacji takiego systemu i wpływa na możliwości operowania wiązką światła.

Niniejsza praca powstała w ramach dofinansowania projektów Kół Naukowych w ramach programu IDUB – Wsparcie Kół Naukowych, Działanie 12 pt. „System inteligentnego oświetlenia z możliwością śledzenia obiektów przy wykorzystaniu rozwiązań wizyjnych zarządzany za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji” – numer wniosku 8966. Dodatkowo pragniemy serdecznie podziękować firmie UT sp. z o.o. za udzielone wsparcie materiałowe.

Literatura

- Blume C., Garbazza C., Spitschan M., 2019, *Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood*, Somnologie, vol. 23(3), s. 147–156, <https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x>.
- Brown T.M., Brainard G.C., Cajochen C., Czeisler C.A., Hanifin J.P., Lockley S.W., Lucas R.J., Münch M., O’Hagan J.B., Peirson S.N., Price L.L.A., Roenneberg T., Schlangen L.J.M., Skene D.J., Spitschan M., Vetter C., Zee P.C., Wright K.P., 2022, *Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults*, PLoS Biology, vol. 20(3), <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>.
- COMSOL Blog, *Calculating the Emission Spectra from Common Light Sources*, <https://www.comsol.com/blogs/calculating-the-emission-spectra-from-common-light-sources> [dostęp: 6.06.24].
- Conus V., Geiser M., 2020, *A Review of Silent Substitution Devices for Melanopsin Stimulation in Humans*. Photonics, vol. 7, <https://doi.org/10.3390/PHOTONICS7040121>.
- Hankins M.W., Peirson S.N., Foster R.G., 2008, *Melanopsin: an exciting photopigment*, Trends in Neurosciences, vol. 31(1), s. 27–36, <https://doi.org/10.1016/J.TINS.2007.11.002>.
- Jalali M.S., Jones J.R., Tural E., Gibbons R.B., 2024, *Human-Centric Lighting Design: A Framework for Supporting Healthy Circadian Rhythm Grounded in Established Knowledge in Interior Spaces*, Buildings, vol. 14(4), <https://doi.org/10.3390/buildings14041125>.
- Nauka w Polsce, *Medyczny Nobel za zegar biologiczny*, <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C459900%2Cmedyczny-nobel-za-zegar-biologiczny.html> [dostęp: 6.06.24].

- Petrinska I., Nikolova K., 2023, *Investigation of the Non Image Forming Effects of Existing Human Centric Lighting Systems*, 2023 Eight Junior Conference on Lighting (Lighting), 23–25 września 2023 Sozopol, Bułgaria, IEEE, s. 1–5, <https://doi.org/10.1109/Lighting59819.2023.10299458>.
- Wantuch A., Durlík F., 2023, *Analiza parametrów oświetlenia elektrycznego mających wpływ na zdrowie i samopoczucie człowieka*, XXXII Symposium Środowiskowe PTZE, 11–14 czerwca 2023, Łochów, Polska, Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu, s. 274–276.
- Wever R.A., Polásek J., Wildgruber C.M., 1983, *Bright Light Affects Human Circadian Rhythms*, Pflugers Archiv: European Journal of Physiology, vol. 396(1), s. 85–87, <https://doi.org/10.1007/BF00584704>.

Wybrane sensory w mikroprocesorowym monitorowaniu parametrów środowiskowych powietrza

Jakub Faber , Eugeniusz Ziółkowski 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, Kraków

Streszczenie: W artykule omówiono zagadnienie jakości powietrza w środowisku pracy oraz jego wpływu na pracowników – ich zdrowie, samopoczucie i produktywność. Przytoczono często spotykane parametry środowiskowe wpływające na jakość powietrza, źródła powstawania i negatywne skutki wystawienia się na ich działanie. Na podstawie popularnych zanieczyszczeń powietrza spotykanych w przemyśle odlewniczym dobrano sensory oraz mikrokontroler o zadowalających parametrach, w celu skonstruowania prototypu mikroprocesorowego systemu do pomiaru parametrów środowiskowych. Układ zmontowano oraz dokonano odpowiednich działań programistycznych w celu sfinalizowania przyjętych założeń. Przedstawiono metody odczytu parametrów, zmierzono natężenie prądu i rozważono dalsze możliwości modyfikacji i rozbudowy systemu.

Słowa kluczowe: jakość powietrza, sensory, mikrokontroler, przemysł odlewniczy, parametry środowiskowe

SELECTED SENSORS IN MICROPROCESSOR-BASED MONITORING OF ENVIRONMENTAL AIR PARAMETERS

Abstract: This article discusses the issue of air quality in the workplace and its impact on employees – their health, well-being, and productivity. It debates commonly encountered environmental parameters affecting air quality, sources of their formation, and the negative effects of exposure to them. Based on popular air pollutants found in the foundry industry, sensors and a microcontroller with satisfactory parameters were selected to construct a prototype microprocessor system for measuring environmental parameters. The system was assembled and appropriate programming actions were taken to finalize the adopted assumptions. Methods for reading parameters were presented, current measurements were conducted, and further possibilities for system modification were considered.

Keywords: air quality, sensors, microcontroller, foundry industry, environmental parameters

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7_4

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost świadomości na temat jakości powietrza oraz jego wpływu na zdrowie i życie. Przeprowadzane są kolejne badania, mające na celu zgłębienie wiedzy o danych substancjach, analizę konsekwencji wystawiania się na ich działanie w różnym natężeniu, a także sporządzenie odpowiednich rekomendacji i wytycznych dotyczących dopuszczalnych stężeń dla ochrony zdrowia i życia człowieka. Telebimy umieszczane w często uczęszczanych sferach miasta, informujące o aktualnym stanie jakości powietrza oraz ostrzegające w przypadku przekroczenia norm nie są już rzadkością, tak samo jak szereg aplikacji i stron internetowych o podobnym działaniu.

Tematyka ta jest nie mniej ważna w kontekście miejsca pracy ze względu na ilość czasu, jaki spędza w nim człowiek, oraz potencjalne konsekwencje, jakie niesie jej zaniedbanie. Długotrwała ekspozycja na zły jakości powietrze może powodować złe samopoczucie oraz osłabiać percepcję pracownika, co nie tylko przekłada się na jego zdrowie, ale również produktywność. Wystawianie się na szczególnie wysokie stężenia niebezpiecznych substancji może skutkować nawet śmiercią.

Dla każdego środowiska pracy charakterystyczne są inne faktory, które należy kontrolować w celu zapewnienia zdrowia i bezpieczeństwa. W przemyśle odlewniczym w zależności od jego specyfikacji wykorzystuje się wiele substancji potencjalnie szkodliwych, co wyróżnia go na tle innych.

W zależności od możliwości finansowych przedsiębiorstwa i rodzajów związków wykorzystuje się różne metody redukcji negatywnego ich wpływu na człowieka. Podstawowym sposobem profilaktyki jest system odciągów, wentylacji i klimatyzacji rozmieszczony w sposób optymalny i prawidłowy oraz działający bezawaryjnie. Skutecznym narzędziem są również wszelakie systemy monitorujące aktualne stężenia danych substancji, alarmujące w przypadku przekroczenia dopuszczalnych dla zdrowia i życia poziomów. Takie rozwiązania pozwalają na ciągłe ich udoskonalanie i dostosowywanie do zmieniających się norm, a także okresowe raportowanie wyników pomiarów, co ma bezpośrednie przełożenie na bezpieczeństwo pracowników, komfort ich pracy oraz osiągi przedsiębiorstwa.

2. Wybrane parametry do pomiarów środowiskowych w przemyśle odlewniczym

Głównymi parametrami określającymi jakość powietrza, wykorzystywanymi nawet w podstawowych systemach są: temperatura i wilgotność oraz ciśnienie atmosferyczne. Temperatura oraz wilgotność są ze sobą fizycznie powiązane i wpływają na komfort cieplny pracownika – im wyższa jest temperatura, tym więcej wody (pary wodnej) może wiązać się z powietrzem. Wzrost wilgotności powietrza powoduje również spadek jego cyrkulacji, co może przyczyniać się do zmniejszonej zdolności do samoczynnego usu-

wania zanieczyszczeń i szkodliwych związków z atmosfery oraz sprzyjać rozwojowi bakterii i wirusów. Zbyt suche powietrze wpływa na wysuszenie oczu ze względu na mniej skuteczne oczyszczanie rzęskowe, a także sprzyja krzepnięciu krwi. Optymalna temperatura pod względem prawidłowego funkcjonowania człowieka i jego wydajności zawiera się między 22°C a 24°C (Onabanjo 2023).

Wskutek niepełnego spalania węgla w paliwie powstaje tlenek węgla, czyli niebezpieczny dla człowieka gaz, nazywany potocznie czadem. Jest on bezbarwny, bezwonny, bezsmakowy i niedrażniący. Cechy te sprawiają, że tak ważne jest monitorowanie jego stężenia w obszarach narażonych na jego podwyższone natężenie. Częstym jego źródłem są niewłaściwie wentylowane urządzenia grzewcze. Tlenek węgla przyjęty przez człowieka szybko dostaje się do krwioobiegu, łącząc się z hemoglobina, która jest nośnikiem tlenu w organizmie. Powstaje wówczas karboksyhemoglobina, co powoduje znaczne zmniejszenie ilości tlenu dostarczanego do organów i tkanek. Nawet niewielkie stężenia tego gazu mają wpływ na ludzki organizm. W zależności od stopnia zatrucia objawami mogą być nudności, bóle i zawroty głowy czy nawet śpiączka. Zatrucie CO znacznie wpływa na układ nerwowy, a zaburzenia w nim dokonane pojawiają się z opóźnieniem (Raub i Benignus 2002).

Szkodliwe skutki zmian ciśnienia atmosferycznego są znane w szczególnych przypadkach, gdy jego zmiany są znaczne (nurkowanie, wspinaczka górską), podczas gdy w normalnych warunkach pracy lub codziennego funkcjonowania wpływ ciśnienia atmosferycznego na zdrowie i śmiertelność jest ciągle badany ze względu na zbyt duży wpływ między innymi temperatury i wilgotności powietrza na zdrowie badanych, jak i samego ciśnienia atmosferycznego na wzorce cyrkulacji mas powietrza, przez co rezultaty badań nie są jednoznaczne. Zwiększona śmiertelność występuje zarówno przy obniżonym, jak i podwyższonym względem normy ciśnieniu atmosferycznym. Wpływ na człowieka objawia się przeważnie nasileniem bólu, symptomów depresji. Odnotowuje się również zwiększone ryzyko chorób mózgowo-naczyniowych i sercowo-naczyniowych (Ou i in. 2024).

Cząstki stałe (PM – *particulate matter*) to kolejny powszechny parametr jakości powietrza, mający destrukcyjny wpływ na zdrowie. Definiuje się go jako mieszanina niewielkich cząstek i kropelek cieczy, w której skład mogą wchodzić zarówno kwasy, związki organiczne jak i metale cząstki gleby i pyłu. W przemyśle, częstym źródłem emisji PM jest spalanie w procesach przemysłowych oraz emisje pojazdów. Wiele publikacji, wskazuje na ich szkodliwość dla układu sercowo-naczyniowego oraz układu oddechowego, co przekłada się na zwiększoną zachorowalność i śmiertelność (Anderson i in. 2012).

Rozległą grupą związków, szczególnie niebezpieczną oraz powszechnie spotykaną w przemyśle odlewniczym są lotne związki organiczne LZO (VOC – *volatile organic compounds*), których znaczna część może powodować u człowieka podrażnienia zmysłów, objawy oddechowe i nowotwory. Reprezentują one zbiór związków, które w swojej strukturze cząsteczkowej posiadają co najmniej jeden atom wodoru oraz węgla.

W skład VOC wchodzi między innymi często pojawiające się w ogólnie pojętym przemyśle substancje jak alkohole, aceton, benzen i formaldehyd, który w odlewnictwie wykorzystywany jest w szerokim zakresie mas utwardzanych na gorąco, czy też żywicach formaldehydowych. Człowiek ma styczność z lotnymi związkami organicznymi, głównie przez inhalacje – ich źródłami mogą być nawet przedmioty codziennego użytku (materiały budowlane, kosmetyki), emitujące je w postaci gazowej. Tempo emisji zależy od wielu czynników i może być intensyfikowane w zależności od ilości składników w materiale, jego wieku czy wilgotności (Rumchev i in. 2007).

Wspomniane wcześniej alkohole stanowią rozległą podgrupę lotnych związków organicznych. Do najbardziej powszechnych, zalicza się między innymi etanol. Jest to bezbarwna, lotna i łatwopalna ciecz stosowana w szerokim zakresie jako rozpuszczalnik. W przemyśle, pracownik narażony jest na jego szkodliwe działanie nie tylko bezpośrednio, ale także poprzez drogi oddechowe i w przypadku miejscowego kontaktu ze skórą. Ekspozycja na ten związek działa drażniąco i depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, przez co może znacząco przekładać się na zdolność percepcji podczas pracy (Lachenmeier 2008). Przykładem zastosowania alkoholu w odlewnictwie mogą być wszelakie powłoki ochronne, nanoszone na formy i rdzenie w celu poprawy jakości odlewu. Pokrycia te, zabezpieczają przed przypaleniami (przywarciem materiału formy do odlewu), zmniejszają chropowatość odlewu i ułatwiają jego wybicie. Mają one bezpośredni kontakt z wysokimi temperaturami, co powoduje ich wypalanie oraz odparowywanie alkoholu (Kamińska i in. 2018).






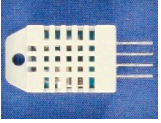

3. Sensory parametrów środowiskowych

Systemy pomiaru jakości powietrza są podstawowym narzędziem profilaktycznym w wielu miejscach pracy. Mnogość parametrów branych pod uwagę i zwiększająca się z roku na rok świadomość, skłania pracodawców do inwestowania w rozbudowane systemy kontroli. Rolę odbioru odpowiednich sygnałów z otoczenia i rejestrowania ich pełnią czujniki. Szeroka gama sensorów pozwala na ich dobór względem danej substancji, sposobu i pożądanego zakresu jej wykrywania, a także dostosowanie do możliwości finansowych.

W tabeli 1 przedstawiono wybrane sensory, wykorzystane do wykonania prototypu mikroprocesorowego systemu pomiarów środowiskowych w kontekście hal odlewniczych. Wybór padał na czujniki, które dokonują pomiaru najbardziej uniwersalnych parametrów pod kątem przemysłu odlewniczego, z zadowalającymi parametrami i zakresami pomiarowymi. Warunki użytkowania sensorów zweryfikowano z rzeczywistymi warunkami panującymi na halach odlewniczych oraz przed użyciem skalibrowano, zgodnie z dostarczoną przez producenta dokumentacją.

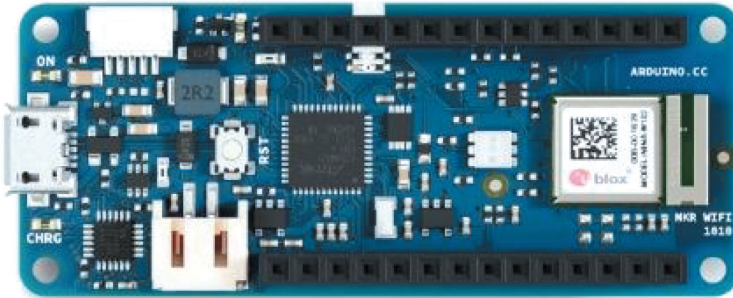
Tabela 1

Przedstawienie wykorzystanych do wykonania prototypu czujników oraz ich charakterystyk (Aesong Electronics Co., Ltd., Bosch 2018, Hanwei Electronics Co., Ltd. a, b, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd. 2017a, b, 2019, 2020, Sensirion 2020)

						
Wygląd modułu						
Czujnik	GM-102B, GM-302B, GM-502B, GM-702B	MQ-135	MQ-7	BMP388	DHT22	SPS30
Producent	Grove	Waveshare	Waveshare	DFRobot Gravity	Aesong Electronics	Sensirion
Interfejs komunikacyjny	I ² C	SPI	SPI	I ² C, SPI	SPI	I ² C, UART
Wykrywany parametr	Dwutlenek azotu, etanol, LZO, tlenek węgla	Alkohol, benzen, amoniak	Tlenek węgla	Cisnienie atmosferyczne	Temperatura, wilgotność	PM1.0, PM2.5, PM4.0, PM10.0
Zakres pomiarowy	0,1–10 ppm, 1–500 ppm, 1–500 ppm, 5–5000 ppm	10–300 ppm 10–1000 ppm 10–300 ppm	20–2000 ppm	300–1250 hPa	–40°C–80°C, 0–100% RH	1–1000 µg/m ³

4. Realizacja prototypu

Arduino MKR WiFi 1010 to mikrokontroler opracowany przez włoską firmę Smart Projects. Został on wybrany do obsługi projektowanego układu. Wygląd płytki przedstawiono na rysunku 1.



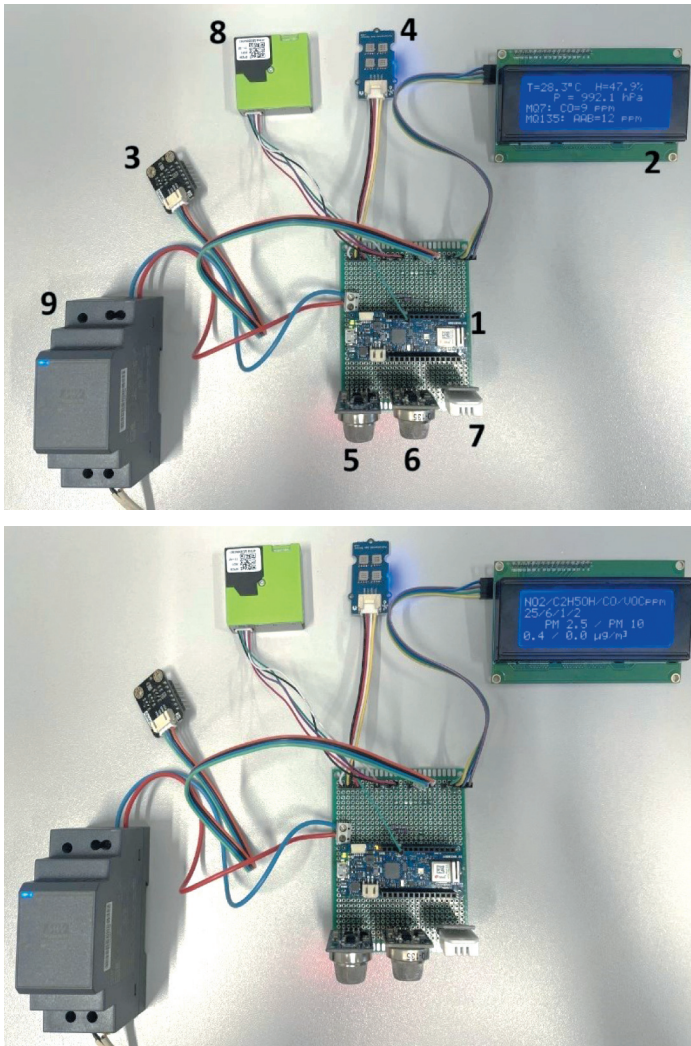
Rys. 1. Wygląd Arduino MKR WiFi 1010 (Arduino 2024)

Moduł jest przeznaczony do projektów wykorzystujących technologię internetu rzeczy (IoT), z tego powodu jednym z podzespołów jest moduł Wi-Fi, Nina W102. Oprócz niego zgodnie z poprzednimi urządzeniami MKR 1000 obsługuje również technologię Bluetooth. Arduino MKR WiFi 1010 wyposażony jest w układ Atmel ATSAMD21, posiadający 256 kB pamięci Flash i 32 kB pamięci SRAM. Głównym procesorem jest ARM Cortex M0, który pracuje z częstotliwością do 48 MHz. Mikrokontroler wyposażono w osiem wejść/wyjść cyfrowych, siedem wejść analogowych o rozdzielczości 8/10/12 bitów, dwaście kanałów PWM oraz 10-bitowe analogowe wyjście przetwornika DAC. Obsługuje popularne interfejsy komunikacyjne, takie jak SPI, UART i I²C. Moduł ten wymaga zasilacza o napięciu 5V, może być też zasilany przez komputerowe gniazdo USB połączone z portem microUSB. Istnieje również możliwość zasilania go przy wykorzystaniu akumulatora o napięciu 3,7 V i minimalnej pojemności 700 mAh (Arduino 2024).

Dodatkową zaletą wyboru mikrokontrolera tej firmy jest zbiór narzędzi (Arduino IDE, Arduino IoT Cloud), udostępnianych za darmo przez producenta. Arduino IDE (Integrated Development Environment) to otwarte środowisko programistyczne bazujące na językach programowania C/C++. Ułatwia ono znacznie pisanie i przesyłanie kodu do mikrokontrolera – także zaawansowanym użytkownikom (Pacelt 2021).

Pierwszy prototyp wykonano przy użyciu płytki stykowej. Wykorzystanie jej miało na celu przyspieszenie weryfikacji poprawności montażu elektronicznego i przetestowania funkcjonowania poszczególnych podzespołów układu. Kod źródłowy programu obsługującego proces był rozszerzany stopniowo wraz z kolejnymi etapami pracy.

Druga, właściwa wersja prototypu była zmontowana na uniwersalnej płytce prototypowej z metalizowanymi otworami. Pozwoliło to na zastąpienie połączeń stykowych i umożliwienie łatwego podłączania i/lub wymiany poszczególnych komponentów układu przez zastosowanie gniazd i złączy. Rysunek 2 przedstawia prototyp z oznaczeniami wykorzystanych komponentów i przykładowymi wynikami pomiarów.

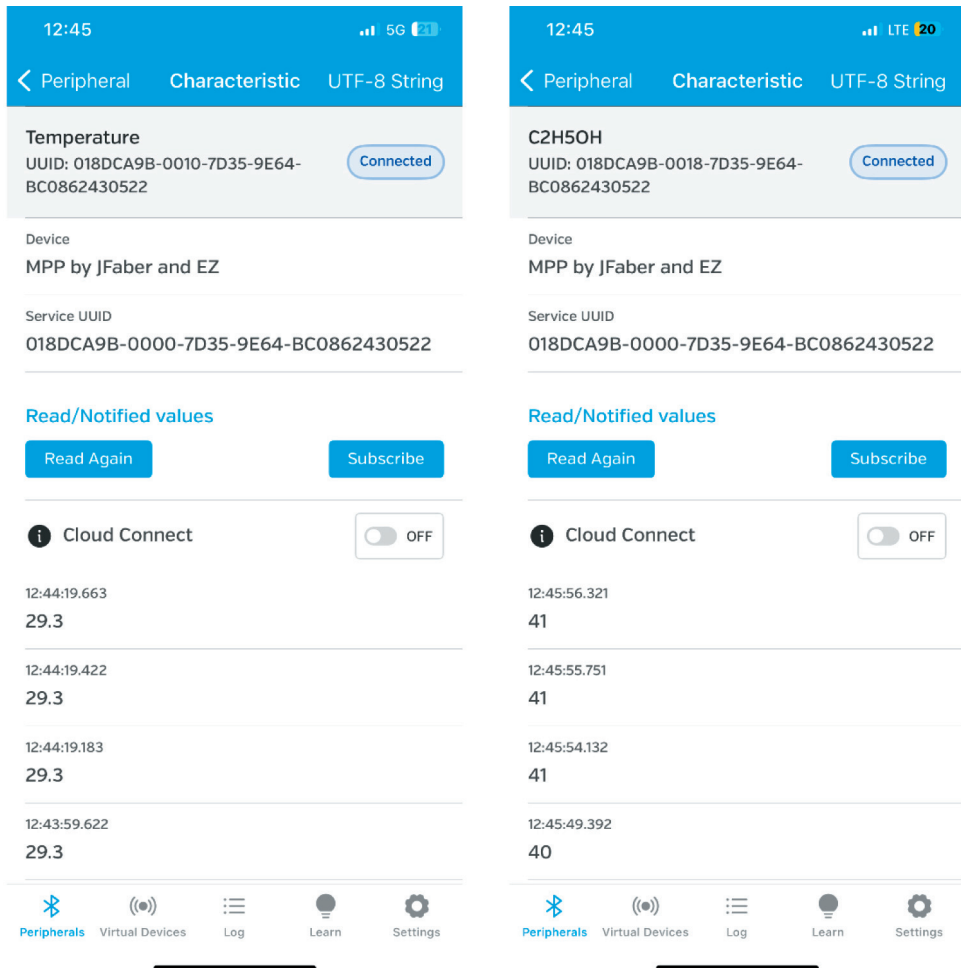


Rys. 2. Widok drugiej wersji prototypu (z dwoma ekranami wyświetlanych wyników pomiarów):
 1 – mikrokontroler Arduino MKR WiFi 1010, 2 – wyświetlacz LCD, 3 – czujnik ciśnienia i wysokości BMP388, 4 – czujnik Multichannel Gas Sensor, 5 – czujnik tlenku węgla MQ-7, 6 – czujnik tlenku węgla MQ-135, 7 – czujnik temperatury i wilgotności DHT22, 8 – czujnik pyłu SPS30, 9 – zasilacz

Układ jest zasilany napięciem stałym +5 V z zastosowaniem zasilacza sieciowego 230 V AC. Uniwersalna płytka prototypowa zwiększyła mobilność urządzenia i zmniejszyła szansę na jego uszkodzenie w transporcie. Przeprowadzono szereg działań programistycznych we wcześniej wspomnianym środowisku Arduino IDE, by sfinalizować cechy funkcjonalne programu. W ramach potwierdzenia prawidłowości działania urządzenia wykonano szereg pomiarów zarówno w otwartych, jak i zamkniętych pomieszczeniach.

5. Możliwości odczytu przeprowadzonych pomiarów

Zrealizowano kilka możliwości odczytu przeprowadzonych pomiarów. Założeniem było wykorzystanie jednej z technologii bezprzewodowych, oferowanych przez użyty mikrokontroler. We współpracy z opiekunem badań wykonano oprogramowanie zezwalające na połączenie w technologii Bluetooth. Wyniki w ten sposób można wyświetlać na tablecie lub smartfonie z systemem Android lub iOS po wcześniejszym zainstalowaniu jednej z uniwersalnych aplikacji do odczytu protokołu Bluetooth, takich jak LightBlue lub nRF Connect. Przykładowe odczyty pomiarów z poziomu telefonicznej aplikacji LightBlue przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów środowiskowych (temperatura, stężenie etanolu), odczytane z poziomu telefonu komórkowego z systemu iOS w aplikacji LightBlue

Odczyt również może zostać przeprowadzony za pomocą opracowanego we współpracy z opiekunem badań programu komputerowego, pracującego w środowisku MS Windows. Widok z okna programu przedstawiający wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunku 4.

Temperatura		Ciśnienie		Wilgotność	
°C		hPa		%	
27.6		992.1		48.0	
Stężenia gazów [ppm]					
Sensor	Gaz		Wartość		
MQ-7	CO		4		
MQ-135	Alkohol + Amoniak + Benzen		15		
MultiGAS	NO2		53		
	C2H5OH		21		
	CO		0		
	VOC		4		
Stężenia pyłów, $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
PM 1.0	PM 2.5	PM 4.0	PM 10.0		
6.7	0.4	0.0	0.0		
Rozłącz		MPP by JFaber and EZ		Stop	

Rys. 4. Widok z programu komputerowego rejestrującego pomiary parametrów środowiskowych. Program został stworzony w Delphi 12.1

Do układu dołączono ekran LCD – został on oznaczony numerem 2 na rysunku drugim. Pozwala on na bieżąco wyświetlać wyniki pomiarów bez potrzeby łączenia się z urządzeniem. Ze względu na ograniczone miejsce zrezygnowano z ekranizacji frakcji pyłu PM1.0 i PM10.0, które rzadko brane są pod uwagę – wyświetlane są jedynie najważniejsze parametry z zachowaniem estetyki wizualnej (rys. 2). Znacznie ułatwia i przyspiesza to prawidłowy odczyt informacji przy jednoczesnym zachowaniu stosunkowo krótkiej przerwy pomiędzy kolejnymi iteracjami zmiany wyświetlacza. W razie potrzeby uzyskania kompletu informacji można skorzystać z wcześniej wymienionych aplikacji do odczytu protokołu Bluetooth (rys. 3) lub programu komputerowego (rys. 4), gdzie listowane są wszystkie parametry.

6. Podsumowanie

Jakość powietrza ma przełożenie na zdrowie i samopoczucie człowieka, a to oddziałuje na jego produktywność i dokładność podejmowanych działań. Nawet niewielkie przekroczenie norm może wpłynąć na zdolność percepcji, co często prowadzi do

wypadków, uszczerbków na zdrowiu, a nawet śmierci. Pomiar jakości powietrza jest jednym z podstawowych działań profilaktycznych, podejmowanych w miejscach pracy w ramach ochrony zdrowia i zwiększenia bezpieczeństwa pracowników. W tym celu wykonywane są systemy pomiaru parametrów środowiskowych, wyposażone w sensory o odpowiednio dobranych do danej branży i potrzeb parametrach.

Wybrano kilka parametrów środowiskowych w kontekście przemysłu odlewniczego, dobrano do nich sensory i wykonano system pomiaru poszczególnych wielkości. „Sercem” układu został mikrokontroler Arduino MKR WiFi 1010 z uwagi na możliwość wyświetlania wyników na wyświetlaczu LCD lub poprzez aplikację i protokół Bluetooth.

Przeprowadzono pomiar natężenia prądu stałego płynącego z zasilacza w wersji z włączonym i wyłączonym podświetleniem ekranu LCD. Przy włączonym podświetleniu natężenie prądu wyniosło 460 mA, a wyłączenie podświetlenia pozwoliło zredukować tę wartość do 420 mA. W przypadku modyfikacji prototypu do zasilania baterijnego lub akumulatorowego należy zastosować wyświetlacz niskoprądowy lub zrezygnować z niego całkowicie przy zachowaniu przesyłu danych przez Bluetooth.

Zaletą systemów pomiaru jakości powietrza jest możliwość dowolnego ich rozwoju (na przykład wraz z rozwojem przedsiębiorstwa) i udoskonalania. W dużych przedsiębiorstwach przydatne może być wdrożenie do systemu możliwości tworzenia statystyk z pomiarów i raportowania ich w wymiarze tygodniowym, miesięcznym czy rocznym. Co więcej, gdy dane przedsiębiorstwo składa się z różnych działów i każdy z nich narażony jest na całkowicie inne niebezpieczeństwa związane ze szkodliwymi związkami, warte rozważenia byłoby wyposażenie pracowników w indywidualne systemy pomiarów parametrów środowiskowych zasilane bateryjnie. Pozwoliłoby to na uzyskanie informacji na temat zagrożeń występujących w danym dziale oraz dotyczących konkretnego pracownika.

Literatura

- Aesong Electronics Co., Ltd., *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)*.
- Anderson J.O., Thudiyi Anderson J.O., Thundiyil J.G., Stolbach A., 2012, *Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health*, Journal of Medical Toxicology. vol. 8, iss. 2, s. 166–175, <http://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>.
- Arduino, 2024, *Arduino MKR WiFi 1010, Product Reference Manual, SKU: ABX00023*, Modified: 18.03.2024.
- Bosch, 2018, *BMP 388 – Datasheet*, Version 1.1, BST-BMP388-DS-001-01.
- Hanwei Electronics Co., Ltd. a, *Technical Data MQ-7 Gas Sensor*.
- Hanwei Electronics Co., Ltd. b, *Technical Data MQ-135 Gas Sensor*.

- Kamińska J., Angrecki M., Palma A., Puzio S., 2018, *Charakterystyka wodnych i alkoholowych powłok ochronnych nowej generacji i ich wpływ na jakość warstwy wierzchniej odlewu*, Prace Instytutu Odlewnictwa, vol. 58, iss. 4, s. 227–234.
- Lachenmeier D.W., 2008, *Safety evaluation of topical applications of ethanol on the skin and inside the oral cavity*, Journal of Occupational Medicine and Toxicology, vol. 3, iss. 26, <http://doi.org/10.1186/1745-6673-3-26>.
- Onabanjo A.A., 2023, *Effects of Indoor Air Quality, Humidity and Temperature on Employees Health and Performance*, Web of Humanities: Journal of Social Science and Humanitarian Research, vol. 1, iss. 6, s. 8–18.
- Ou C., Yang J., Ou Q., Liu H., Lin G., Chen P., Qiyan J., Guo Y., 2024, *The Impact of Relative Humidity and Atmospheric Pressure on Mortality in Guangzhou, China*, Biomedical and Environmental Sciences, vol. 27, iss. 12, s. 917–925, <http://doi.org/10.3967/bes2014.132>.
- Pacelt O., 2021, *Prosto o Arduino IDE – co to jest?*, <https://botland.com.pl/blog/prosto-o-arduino-ide-co-to-jest/> [dostęp: 8.03.2024].
- Raub J.A., Benignus V.A., 2002, *Carbon monoxide and the nervous system*, Neuroscience & Behavioral Reviews, vol. 26, iss. 8, s. 925–940.
- Rumchev K., Brown H., Spickett J., 2007, *Volatile Organic Compounds: Do they present a risk to our health?*, Reviews on Environmental Health, vol. 22, iss.1, s. 39–55, <http://doi.org/10.1515/REVEH.2007.22.1.39>.
- Sensirion, 2020, *Datasheet SPS30, Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control*, Version 1.0–D1.
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd., 2017a, *MEMS Alcohol Gas Sensor (Model No.: GM-302B) Manual*, Version 1.1.
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd., 2017b, *MEMS Carbon Monoxide Gas Sensor (Model No.: GM-702B) Manual*, Version 1.1.
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd., 2019, *MEMS NO2 Gas Sensor (Model No.:GM-102B) Manual*, Version 2.1.
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd., 2020, *MEMS VOC Gas Sensor (Model No.: GM-502B) Manual*, Version 2.2.

Prędkość rozchodzenia się w rurociągu fali ciśnienia powstałej po uderzeniu hydraulicznym

Zbigniew Fąfara , Rafał Matuła 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących prędkości rozchodzenia się fali wzrostu ciśnienia wewnętrznego powstałej na skutek uderzenia hydraulicznego, wywołanego zatrzymaniem przepływu ropy naftowej w odcinku magistralowego rurociągu przesyłowego „Drużba”. Analiza dotyczy pięciu punktów pomiarowych ciśnienia jednej z nitek rurociągu o długości 103,5 km. Ciśnienie rejestrowano w sposób ciągły co sekundę. Uwzględniono dziewięć zdarzeń z tego samego roku, gdy została zatrzymana jedna ze stacji pomp. Praktyka pokazuje, że uderzenia hydrauliczne powstające w rurociągowych systemach transportujących media ciekłe są najczęstszą przyczyną ich awarii. Wyniki bezpośrednich pomiarów ciśnienia wewnątrz analizowanego fragmentu rurociągu przy zatrzymaniu przepływu ropy naftowej wskazują nawet na trzykrotny wzrost ciśnienia medium na wejściu zatrzymanej stacji pomp, co jest szczególnie niebezpieczne dla rurociągu „Drużba”. Został on wybudowany 60–70 lat temu, dlatego jego bezpieczna eksploatacja jest obecnie bardzo ważną kwestią.

Słowa kluczowe: rurociąg przesyłowy „Drużba”, transport ropy naftowej, zatrzymanie przepływu medium, uderzenie hydrauliczne, wzrost ciśnienia w rurociągu, prędkość rozchodzenia się fali wzrostu ciśnienia

PROPAGATION VELOCITY OF THE PREASSURE WAVE IN THE PIPELINE FORMED AFTER A HYDRAULIC HAMMER

Abstract: The paper presents the results of a study of the propagation speed of the internal pressure increase wave created by the hydraulic hammer caused by a stoppage of the flow of crude oil in a section of the trunk transmission pipeline “Druzhba”. The results of pressure measurements in a section of one line of the 103.5-kilometer-long pipelines, at five measurement points, were analyzed. The pressure was recorded continuously every second. The analysis included nine events occurring in one year, when one of the pump stations was stopped. Practice shows that hydraulic hammers occurring in such a situation in pipeline systems transporting liquid media are the most common cause of their failure. The results of direct measurements of pressure changes inside the analyzed section of the pipeline accompanying the stoppage of the flow of crude oil indicate an up to three-fold increase in the pressure of the transported medium at the entrance of the stopped pump station, which is particularly dangerous and may result in leakage of the “Druzhba” pipeline. It was built 60–70 years ago, so its safe operation is now a very important issue.

Keywords: transmission pipeline “Druzhba”, crude oil transport, complete stoppage of medium flow, hydraulic hammer, increase in internal pressure in the pipeline, propagation speed of the pressure increase wave

1. Wprowadzenie

Zmiana hydrodynamicznych parametrów tłoczenia cieczy w rurociągu (w szczególności jej prędkości przepływu) wpływa na wartość ciśnienia panującego w jego wnętrzu, które może wzrosnąć lub zmaleć. Pojawiają się w ten sposób stany nieustalone przepływu, które nazywane są uderzeniem hydraulicznym. W przypadku wzrostu ciśnienia wewnętrznego w rurociągu mówimy o dodatnim uderzeniu hydraulicznym, natomiast spadek ciśnienia nazywany jest ujemnym uderzeniem hydraulicznym. Pojęcie uderzenia hydraulicznego pojawiło się w literaturze w XIX wieku (Thorley 2004, Niełaczny 2005, Mambretti 2014), kiedy wyróżniono proste i złożone uderzenie hydrauliczne. Proste uderzenie hydrauliczne odnosi się do sytuacji, gdy czas działania czynnika powodującego zmianę parametrów tłoczenia cieczy (np. czas zamykania zaworu) jest dużo krótszy od czasu powrotu odbitej fali ciśnienia. Złożone uderzenie hydrauliczne dotyczy sytuacji przeciwnej, gdy czas działania czynnika powodującego zmianę parametrów tłoczenia cieczy jest dłuższy od czasu powrotu odbitej fali ciśnienia. W przypadkach rozważanych w niniejszej pracy czas zamykania zaworu wynosi maksymalnie kilkanaście sekund, natomiast czas powrotu odbitej fali ciśnienia to około 200 s, dlatego można stwierdzić, że analiza dotyczy prostego uderzenia hydraulicznego (Fąfara 2013).

Pulsujące zmiany ciśnienia wewnętrznego w rurociągu wywoływane przez nakładanie się fal odbitych ciśnienia mogą doprowadzić do jego drgań, co może skutkować awarią. Podobnie wzrost ciśnienia wewnętrznego znacznie powyżej normalnego ciśnienia eksploatacyjnego może spowodować rozszczelnienie rurociągu. Podczas wcześniejszych badań dotyczących tego samego fragmentu rurociągu „Družba” wykazano, że nagłe zatrzymanie pompy tłoczącej ropę naftową prowadzi nawet do ponad trzykrotnego wzrostu ciśnienia wewnętrznego na jej wejściu (Fąfara 2023).

2. Model matematyczny

W praktyce inżynierskiej podstawowym równaniem opisującym zjawisko uderzenia hydraulicznego jest formuła opracowana w XIX wieku zwana wzorem Żukowskiego-Allieiego (Thorley 2004, Mambretti 2014, Kodura 2018). Równanie to określa pierwszy maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu w prostym uderzeniu hydraulicznym:

$$\Delta p = \Delta v \cdot \rho \cdot a \quad (1)$$

gdzie:

- Δp – pierwszy maksymalny przyrost ciśnienia,
- Δv – zmiana (spadek) prędkości przepływającej cieczy,
- ρ – gęstość właściwa przepływającej cieczy,
- a – prędkość przemieszczania się fali uderzeniowej ciśnienia.

Maksymalna wartość przyrostu ciśnienia w rurociągu występuje podczas całkowitego zatrzymania przepływającej cieczy.

Prędkość rozchodzenia się fali uderzeniowej ciśnienia w rurociągu w analizowanym przypadku zostanie określona na podstawie czasu dojścia fali wzrostu ciśnienia od miejsca jej wytworzenia do punktu rejestracji ciśnienia na trasie rurociągu według następującego równania:

$$a = \frac{D}{T_A} \quad (2)$$

gdzie:

D – odległość punktu rejestracji fali ciśnienia od miejsca powstania uderzenia hydraulicznego,

T_A – czas dojścia fali wzrostu ciśnienia od miejsca jej wytworzenia do punktu rejestracji.

Prędkość rozchodzenia się zaburzenia mechanicznego w dowolnym ośrodku zależy od pierwiastka kwadratowego ilorazu jego sprężystości (sztywności) i bezwładności (Ling 2018). Jako miarę sprężystości cieczy przyjmuje się moduł sprężystości objętościowej K , a miarą bezwładności jest jej gęstość właściwa ρ , co pozwala zapisać równanie na prędkość rozchodzenia się zaburzenia mechanicznego następująco:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

Z powyższego równania wynika, że im sztywność ośrodka jest wyższa, to większa jest prędkość rozchodzenia się fali mechanicznej, ale wzrost gęstości właściwej ośrodka powoduje jej zmniejszenie. Taki wniosek nie do końca oddaje właściwą relację pomiędzy prędkością rozchodzenia się fali i gęstością, ponieważ współczynnik K także zależy od gęstości właściwej ośrodka.

Współczynnik ściśliwości objętościowej cieczy β_V zdefiniowany jest następująco (Ling 2018):

$$\beta_V = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (4)$$

gdzie:

V – początkowa objętość cieczy,

ΔV – zmniejszenie początkowej objętości cieczy przy wzroście ciśnienia o Δp .

By definicja współczynnika ściśliwości objętościowej była pełna, należałoby jeszcze ustalić rodzaj przemiany termodynamicznej (np. izotermiczna lub adiabatyczna), ale dla prowadzonych rozważań nie jest to istotne. Z definicji zależność pomiędzy modulem sprężystości objętościowej i ściśliwości objętościowej cieczy jest następująca:

$$K = -\frac{1}{\beta_V} \quad (5)$$

Liczne badania laboratoryjne wartości współczynnika ściśliwości objętościowej cieczy w różnych warunkach ciśnienia i temperatury (np. Koszela-Marek 2009) pokazały, że z jednej strony współczynnik ściśliwości cieczy maleje ze wzrostem temperatury oraz ciśnienia. Z drugiej strony ze wzrostem ciśnienia rośnie gęstość właściwa cieczy i jej lepkość. Oznacza to, że wartość współczynnika ściśliwości objętościowej cieczy maleje ze wzrostem jej gęstości, a w konsekwencji wartość modułu sprężystości objętościowej cieczy rośnie wraz ze wzrostem jej gęstości. Jak widać, w równaniu (3) zarówno wartość licznika, jak i mianownika jest wprost proporcjonalna do gęstości objętościowej cieczy, dlatego pozostaje tylko ustalić, gdzie jej wpływ jest większy. Interpretacja wyników badań sonarowych dna morskiego pokazuje, że prędkość rozchodzenia się dźwięku rośnie wraz z głębokością wody, np. około 1,8 m/s na każdy przyrost głębokości wody o 100 m (Grządziel 2021). Oznacza to, że wpływ gęstości właściwej ośrodka na wartość licznika w równaniu (3) jest większy od jej wpływu na wartość mianownika w tym przypadku i generalnie prędkość rozchodzenia się zaburzenia mechanicznego rośnie wraz ze wzrostem gęstości.

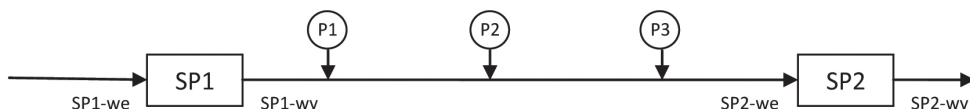
Związek zmian temperatury z prędkością rozchodzenia się zaburzenia mechanicznego w cieczy także nie jest jednoznaczny, ponieważ temperatura wpływa równocześnie na sztywność ośrodka i jego gęstość. Ogólnie wiadomo, że ze wzrostem temperatury cieczy maleje jej gęstość właściwa i lepkość. Wyniki badań laboratoryjnych pokazały (np. Koszela-Marek 2009), że ze wzrostem temperatury maleje współczynnik ściśliwości objętościowej cieczy, czyli na podstawie równania (5) rośnie moduł sprężystości objętościowej. Z równania (3) wynika więc, że ze wzrostem temperatury rośnie licznik wyrażenia i maleje mianownik, czyli prędkość rozchodzenia się fali zaburzenia mechanicznego będzie rosła. Potwierdzają to liczne badania laboratoryjne pokazujące między innymi, że w wodzie prędkość dźwięku rośnie o około 3,5 m/s na 1°C wzrostu temperatury (Grządziel 2021). Wzrost ten jednak zatrzymuje się na pewnej temperaturze, a później tendencja się odwraca. W przypadku wody dzieje się tak powyżej temperatury 80°C. W rozważanej sytuacji temperatura tłoczony ropy naftowej nie dochodzi jednak do tak wysokich wartości.

3. Przedmiot badań

Z powodu wojny w Ukrainie został ograniczony import ropy naftowej z Rosji, co dotyczy także przesyłu odbywającego się rurociągiem magistralowym „Družba”, jednak nadal dla wielu krajów europejskich stanowi on ważny, a nawet podstawowy kanał transportu tego surowca. W Polsce obecnie wstrzymano import ropy naftowej z Rosji tym rurociągiem, jednak jest on ciągle wykorzystywany, obecnie do tranzytu ropy z Naftoportu w Gdańsku do dwóch rafinerii we wschodniej części Niemiec. Instalacje przesyłowe rurociągu „Družba” wybudowano w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku, czyli mają około 60 lat, nieco powyżej standardowo planowanego i przyjmowanego pięć-

dziesięcioletniego okresu bezawaryjnej pracy lądowych systemów przesyłowych (Michałowski 2006). Zastosowana wówczas bierna metoda zabezpieczenia rur przewodowych przed korozją, w kontekście ówczesnych możliwości, znacznie odbiega od obowiązujących obecnie standardów, dlatego pojawiają się obawy dotyczące bezpiecznej eksploatacji rurociągu „Družba” z uwagi na zagrożenie korozją. W ciągu tak długiego okresu użytkowania systemu przesyłowego „Družba” mogło dojść do punktowego zmniejszenia grubości ścian rur przewodowych, przez co mogą one nie być w stanie sprostać przenoszonym naprężeniom, szczególnie gdy odbiegają one od typowych, pojawiających się w czasie normalnej eksploatacji z powodu niekontrolowanego wzrostu ciśnienia wywołanego zjawiskiem uderzenia hydraulicznego. Dlatego kluczowa staje się analiza tego zjawiska pod kątem przyrostu ciśnienia wewnętrznego w rurociągu „Družba” (Fąfara 2023) oraz szybkości propagacji fali podwyższonego ciśnienia.

Przedmiotem badania jest fragment jednej z dwóch nitek rurociągu „Družba” o długości 103,5 km, który schematycznie został przedstawiony na rysunku 1 (Fąfara 2023). Na obu końcach tego odcinka są zainstalowane dwie stacje pomp tłoczące ropę naftową, oznaczone na rysunku jako SP1 (początek analizowanego fragmentu systemu przesyłowego) i SP2 (jego koniec). W rurociągu pomiędzy tymi stacjami pomp umieszczone są trzy czujniki ciśnienia wewnętrznego oznaczone symbolami P1, P2 i P3. Czujniki ciśnienia znajdują się także na wejściu (SP1-we, SP2-we) i wyjściu (SP1-wy, SP2-wy) każdej stacji pomp. Rejestrują one co sekundę ciśnienie wewnętrzne w rurociągu. Dokładna lokalizacja punktów pomiaru ciśnienia na trasie rurociągu podana została w tabeli 1 (Fąfara 2023).



Rys. 1. Schemat analizowanego fragmentu rurociągu „Družba”
(Fąfara 2023)

Tabela 1

Lokalizacja punktów pomiaru ciśnienia we fragmencie rurociągu „Družba”
(Fąfara 2023)

Lp.	Nazwa punktu	Odległość od początku fragmentu rurociągu [km]
1.	SP1-wy	0
2.	P1	31,5
3.	P2	57,0
4.	P3	71,5
5.	SP2-we	103,5

W analizie wzięto pod uwagę dziewięć wybranych zdarzeń z jednego roku kalendarzowego, które skutkowały całkowitym zatrzymaniem przepływu ropy naftowej w rurociągu z powodu wyłączenia stacji pomp SP2. To zaś doprowadziło do powstania zjawiska uderzenia hydraulicznego, powodującego gwałtowny wzrost ciśnienia wewnętrznego w rurociągu (Fąfara 2023). Trzy przypadki dotyczą niezależnego od operatora rurociągu odłączenia zasilania linii energetycznej, jeden przypadek odnosi się do awaryjnego wyłączenia stacji pomp SP2 na skutek niebezpiecznego przekroczenia dopuszczalnej wartości temperatury, natomiast w pięciu pozostałych sytuacjach pompownię wyłączono ze względów technicznych w celu redukcji ilości ropy naftowej tłoczony rurociągiem „Drużba”. Wybrane zdarzenia miały miejsce w różnych porach roku (zima, wiosna i lato), a więc przy zmiennej temperaturze otoczenia, co pozwoli także na badanie jej wpływu na prędkość rozchodzenia się fali podwyższonego ciśnienia w rurociągu.

Wyłączeniu stacji pomp SP2 towarzyszyło automatyczne zamykanie zasuw na jej wejściu i wyjściu, co trwało około 11 s (Fąfara 2023). Po jej zatrzymaniu niejednokrotnie wyłączano także inne stacje zamontowane w rozważanej nitce rurociągu, często w tym samym czasie lub z niewielkim opóźnieniem. Jednak zamknięcie zasuw przy stacji pomp SP2 sprawiło, że w tej sytuacji żadne zaburzenie ciśnienia w rurociągu, wywołane zatrzymaniem stacji pomp zamontowanych poniżej SP2, nie przenosiło się do analizowanego fragmentu rurociągu. Do analizy wybrano również zdarzenia, w których stacja pomp SP1 pracowała jeszcze odpowiednio długo po zatrzymaniu stacji SP2, by zaburzenie ciśnienia wewnętrznego wywołane zamknięciem SP1 nie zakłócało przebiegu fali wzrostu ciśnienia rozchodzącej się od stacji pomp SP2.

Tabela 2

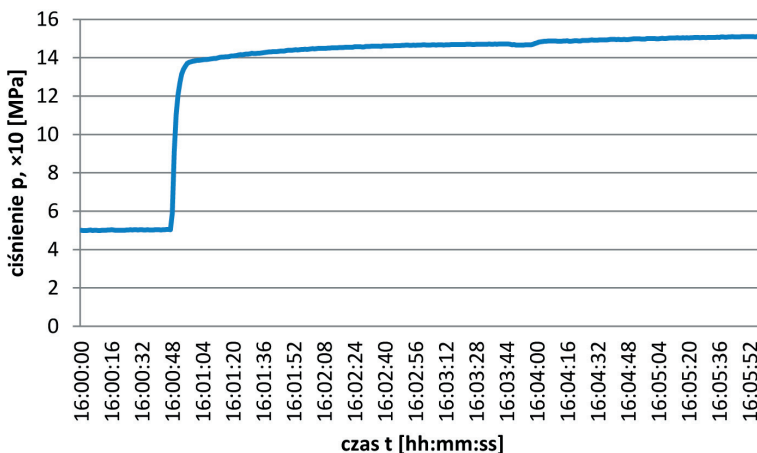
Lista analizowanych zdarzeń w rozważanym fragmencie rurociągu „Drużba”
(Fąfara 2023)

Lp.	Data	Zdarzenie
1.	16.03	Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – redukcja ilości tłoczony ropy naftowej
2.	6.04	Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – redukcja ilości tłoczony ropy naftowej
3.	26.04	Awaryjne zatrzymanie SP2 – przekroczenie dopuszczalnej temperatury łożysk
4.	7.06	Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – redukcja ilości tłoczony ropy naftowej
5.	20.06	Awaryjne zatrzymanie SP2 – przerwa w zasilaniu energią elektryczną
6.	8.07	Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – redukcja ilości tłoczony ropy naftowej
7.	11.07	Awaryjne zatrzymanie SP2 – przerwa w zasilaniu energią elektryczną
8.	26.07	Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – redukcja ilości tłoczony ropy naftowej
9.	23.08	Awaryjne zatrzymanie SP2 – przerwa w zasilaniu energią elektryczną

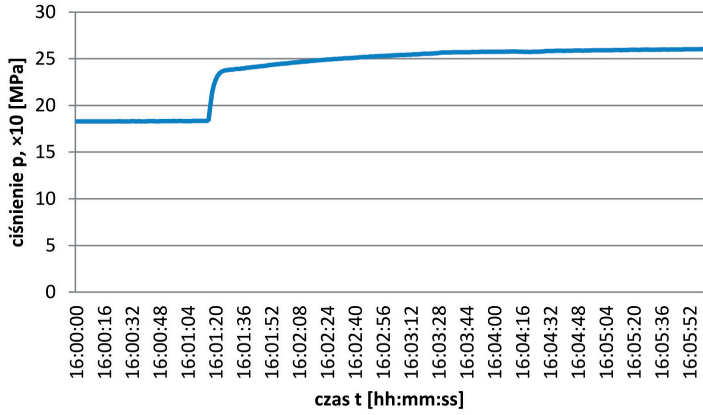
4. Wyniki pomiarów

Na dziesięciu wykresach liniowych (rys. 2–11), stanowiących dwie serie po pięć rysunków, przedstawiono zarejestrowane zmiany w czasie ciśnienia wewnętrznego w różnych miejscach rurociągu dla dwóch wybranych zdarzeń z 7 czerwca i 23 sierpnia (opis w tabeli 2), w wyniku których została zatrzymana stacja pomp SP2. Wykresy dotyczące pozostałych siedmiu analizowanych przypadków przebiegają analogicznie. Używane w badaniach czujniki rejestrowały ciśnienie wewnętrzne w rurociągu w sposób ciągły (co jedną sekundę) przez całą dobę. W prowadzonej analizie wykorzystano tylko fragment całego zarejestrowanego pliku obejmujący przedział czasu zazwyczaj o długości 4–5 minut, rozpoczynający się około jednej minuty przed gwałtownym wzrostem ciśnienia. Oś pozioma wykresów jest osią czasu rzeczywistego, przedstawionego w standardowym formacie: „godzina : minuta : sekunda”. Na osi pionowej wykresów znajduje się ciśnienie wewnętrzne panujące w rurociągu, a jego wartości wyrażone w MPa zostały pomnożone przez 10 w celu zwiększenia czytelności zestawienia. Oznacza to, że wartości liczbowe ciśnienia na wykresach odpowiadają jednostce „bar”.

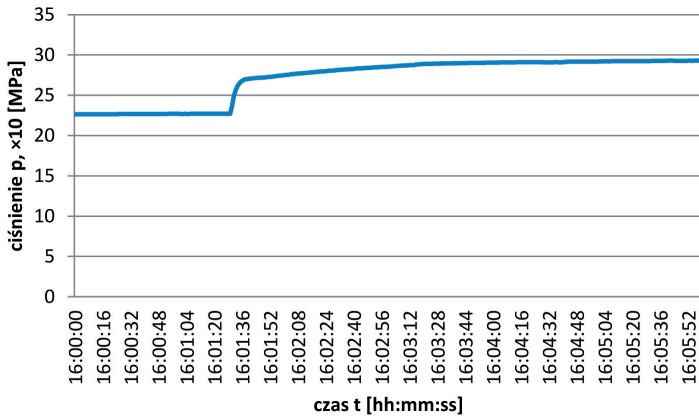
Pierwszy rysunek w serii (rys. 2 i 7) przedstawia zmiany ciśnienia wewnętrznego w rurociągu na wejściu do stacji pomp SP2, gdzie powstaje zjawisko uderzenia hydraulicznego. Pozostałe rysunki serii pokazują moment dojścia fali podwyższonego ciśnienia do kolejnych punktów pomiarowych: P3 (32 km od SP2-we), P2 (44,5 km od SP2-we), P1 (72 km od SP2-we) i SP1-wy (103,5 km od SP2-we). Za moment dojścia fali ciśnienia do danego punktu pomiarowego przyjęto chwilę, w której rozpoczyna się gwałtowny wzrost ciśnienia. Odczytane z wykresów wartości zamieszczono w tabeli 3.



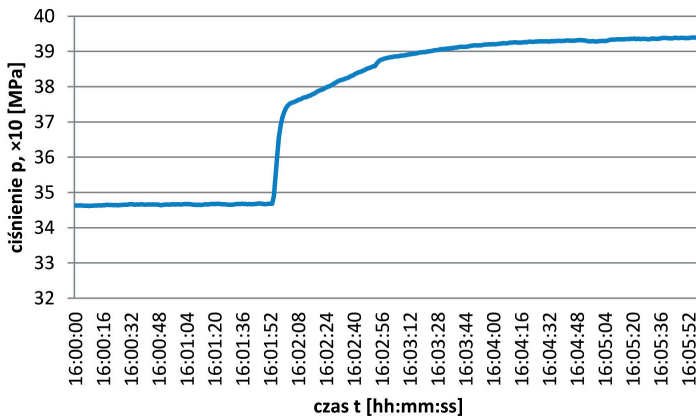
Rys. 2. Zmiany ciśnienia w punkcie SP2-we (pomiar 7 czerwca)



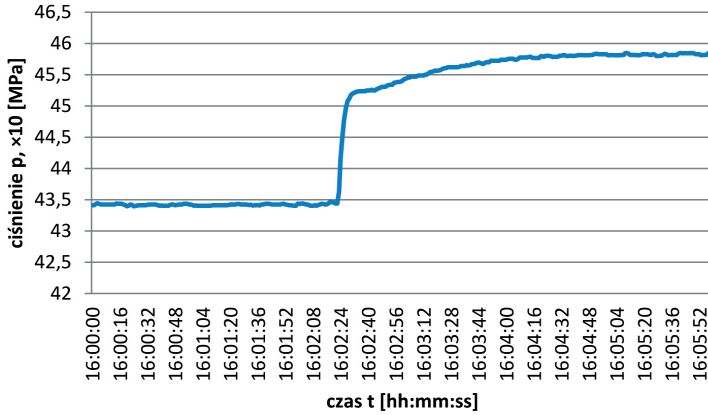
Rys. 3. Zmiany ciśnienia w punkcie P3
(pomiar 7 czerwca)



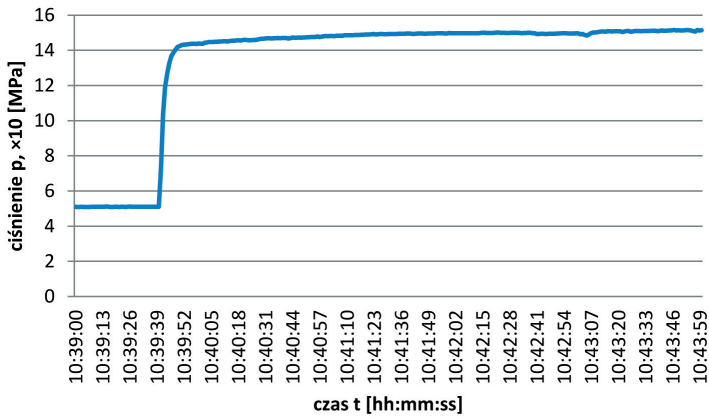
Rys. 4. Zmiany ciśnienia w punkcie P2
(pomiar 7 czerwca)



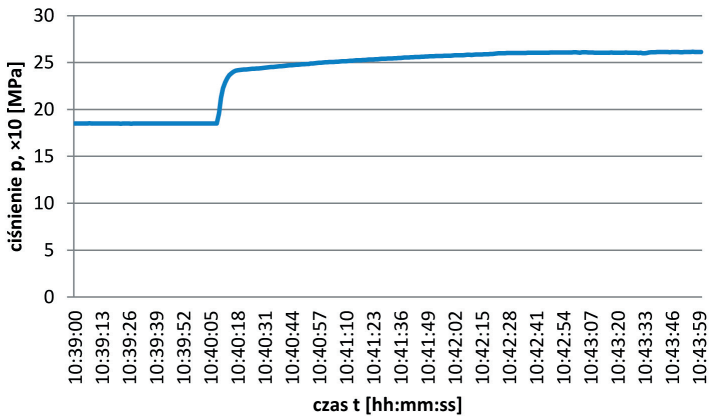
Rys. 5. Zmiany ciśnienia w punkcie P1
(pomiar 7 czerwca)



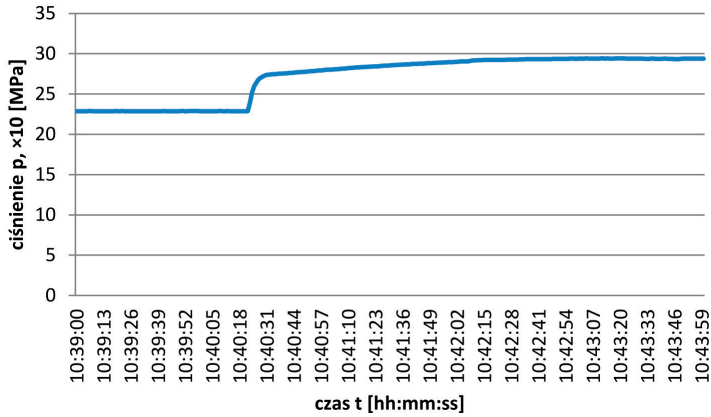
Rys. 6. Zmiany ciśnienia w punkcie SP1-wy
(pomiar 7 czerwca)



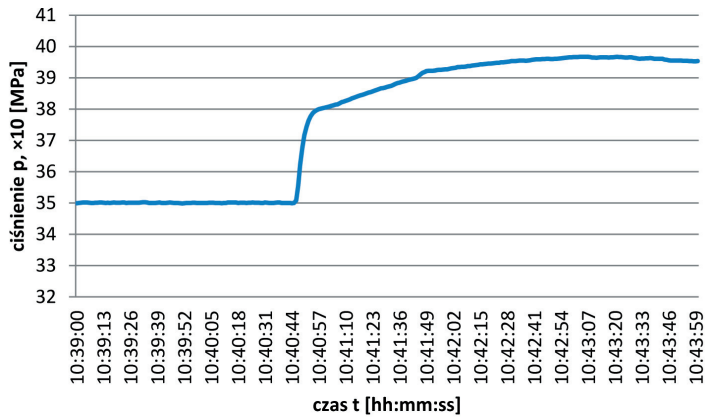
Rys. 7. Zmiany ciśnienia w punkcie SP2-we
(pomiar 23 sierpnia)



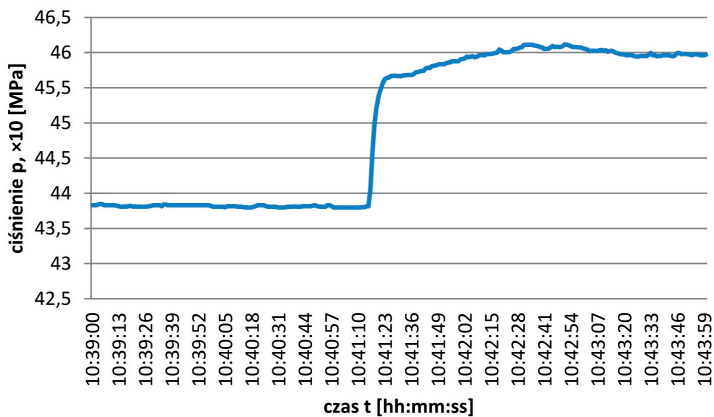
Rys. 8. Zmiany ciśnienia w punkcie P3
(pomiar 23 sierpnia)



Rys. 9. Zmiany ciśnienia w punkcie P2
(pomiar 23 sierpnia)



Rys. 10. Zmiany ciśnienia w punkcie P1
(pomiar 23 sierpnia)



Rys. 11. Zmiany ciśnienia w punkcie SP1-wy
(pomiar 23 sierpnia)

Tabela 3
Czas dojścia fali wzrostu ciśnienia do kolejnych punktów pomiarowych

Punkt pomiarowy	Odległość punktu pomiarowego [km]	Moment rozpoczęcia wzrostu ciśnienia	Czas dojścia fali ciśnienia [s]	Ciśnienie początkowe [MPa]	Ciśnienie maksymalne [MPa]
Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – 16 marca					
SP2-we	0,0	10:01:25	0	0,465	1,397
P3	32,0	10:01:52	27	1,891	2,440
P2	46,5	10:02:05	40	2,368	2,724
P1	72,0	10:02:28	63	3,662	3,924
SP1-wy	103,5	10:02:59	94	4,541	4,680
Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – 6 kwietnia					
SP2-we	0,0	00:38:05	0	0,712	1,567
P3	32,0	00:38:33	28	2,051	2,570
P2	46,5	00:38:45	40	2,482	2,898
P1	72,0	00:39:09	64	3,683	3,953
SP1-wy	103,5	00:39:37	92	4,549	4,707
Awaryjne zatrzymanie SP2 – 26 kwietnia					
SP2-we	0,0	08:22:00	0	0,546	1,420
P3	32,0	08:22:30	30	1,895	2,444
P2	46,5	08:22:40	40	2,387	2,743
P1	72,0	08:23:10	70	3,542	3,836
SP1-wy	103,5	08:23:40	100	4,421	4,592
Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – 7 czerwca					
SP2-we	0,0	16:00:47	0	0,503	1,376
P3	32,0	16:01:15	28	1,834	2,373
P2	46,5	16:01:29	42	2,271	2,699
P1	72,0	16:01:53	66	3,468	3,751
SP1-wy	103,5	16:02:22	95	4,344	4,521
Awaryjne zatrzymanie SP2 – 20 czerwca					
SP2-we	0,0	11:01:15	0	0,501	1,391
P3	32,0	11:01:43	28	1,819	2,390
P2	46,5	11:01:57	42	2,249	2,705
P1	72,0	11:02:21	66	3,441	3,744
SP1-wy	103,5	11:02:50	95	4,306	4,495

Tabela 3 cd.

Punkt pomiarowy	Odległość punktu pomiarowego [km]	Moment rozpoczęcia wzrostu ciśnienia	Czas dojścia fali ciśnienia [s]	Ciśnienie początkowe [MPa]	Ciśnienie maksymalne [MPa]
Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – 8 lipca					
SP2-we	0,0	00:18:14	0	0,513	1,382
P3	32,0	00:18:42	28	1,835	2,375
P2	46,5	00:18:56	42	2,267	2,696
P1	72,0	00:19:19	65	3,459	3,744
SP1-wy	103,5	00:19:49	95	4,327	4,507
Awaryjne zatrzymanie SP2 – 11 lipca					
SP2-we	0,0	19:01:55	0	0,525	1,393
P3	32,0	19:02:23	28	1,835	2,373
P2	46,5	19:02:37	42	2,257	2,690
P1	72,0	19:03:01	66	3,444	3,724
SP1-wy	103,5	19:03:30	95	4,281	4,463
Zatrzymanie SP2 z przyczyn technicznych – 26 lipca					
SP2-we	0,0	11:38:50	0	0,379	1,245
P3	32,0	11:39:20	30	1,722	2,255
P2	46,5	11:39:33	43	2,161	2,584
P1	72,0	11:39:56	66	3,377	3,658
SP1-wy	103,5	11:40:26	96	4,273	4,449
Awaryjne zatrzymanie SP2 – 23 sierpnia					
SP2-we	0,0	10:39:40	0	0,511	1,432
P3	32,0	10:40:08	28	1,851	2,412
P2	46,5	10:40:22	42	2,290	2,735
P1	72,0	10:40:45	65	3,500	3,799
SP1-wy	103,5	10:41:15	95	4,382	4,568

Przebieg krzywej obrazującej zmiany ciśnienia wewnętrznego w punkcie SP2-we (rys. 2 i 7) pokazuje gwałtowny (około trzykrotny) wzrost ciśnienia w czasie kilkunastu sekund w momencie uderzenia hydraulicznego, a następnie powolny, nieznaczny wzrost ciśnienia do chwili stabilizacji i dalsze jego fluktuacje spowodowane dotarciem fali odbitej od zamkniętej zasuw w punkcie SP1-wy.

Zmiany ciśnienia wewnętrznego w punkcie pomiarowym P3 (rys. 3 i 8) są bardzo podobne do wyżej omówionych. W pewnym momencie następuje gwałtowny wzrost ciśnienia o ponad 0,5 MPa w czasie kilkunastu sekund, oznaczający dojście fali ciśnienia

nia wywołanego powstaniem uderzenia hydraulicznego do punktu pomiarowego P3, a następnie powolny dalszy wzrost o kilka barów do momentu stabilizacji, jednak wzrost ten jest większy niż w poprzednim przypadku, ponieważ fala odbita od zasowy SP1-wy dociera szybciej (jej droga jest krótsza o 64 km).

Krzywe zmiany ciśnienia wewnętrznego w punkcie pomiarowym P2 (rys. 4 i 9) są także podobne do siebie, ale nieco różnią się od poprzednio omówionych. W pewnym momencie dochodzi do gwałtownego wzrostu ciśnienia o ponad 0,5 MPa w czasie kilkunastu sekund odpowiadającemu dojściu fali ciśnienia wywołanej powstaniem uderzenia hydraulicznego do punktu pomiarowego P2, po czym następuje wolniejszy wzrost ciśnienia o około 0,3 MPa do czasu stabilizacji, co powoduje szybszy powrót fali odbitej od zamkniętej zasowy SP1-wy (jej droga jest krótsza niż poprzednio o 29 km).

Przebieg krzywej zmian ciśnienia wewnętrznego w punkcie pomiarowym P1 (rys. 5 i 10) jest bardzo podobny w obu przypadkach, ale wyraźnie różni się od wcześniej omówionych. W pewnym momencie dochodzi do gwałtownego wzrostu ciśnienia o około 0,4 MPa w czasie kilkunastu sekund, związany z dojściem fali ciśnienia wywołanej powstaniem uderzenia hydraulicznego do punktu P1, później następuje wzrost o ponad 0,3 MPa w nieco dłuższym czasie na skutek dojścia fali odbitej od zamkniętej zasowy SP1-wy (jej droga jest krótsza niż poprzednio o 51 km).

Zmiany ciśnienia wewnętrznego na wyjściu stacji pomp SP1 (rys. 6 i 11) są bardzo podobne do siebie i zmian omówionych poprzednio w punktach pomiarowych P1–P3. W chwili dojścia fali uderzeniowej ciśnienie wzrasta najpierw gwałtownie o około 0,2 MPa w czasie kilkunastu sekund, a następnie nieco wolniej o 0,05 MPa. Krzywa zmian ciśnienia jest bardziej poszarpana, co może być skutkiem pracujących jeszcze przez pewien czas pomp tłoczących w stacji po powstaniu zjawiska uderzenia hydraulicznego na wejściu do kolejnej stacji pomp SP2.

W tabeli 3 podano odczytane z wykresów momenty dojścia fali uderzeniowej podwyższonego ciśnienia do kolejnych punktów pomiarowych i obliczono czas przejścia fali od miejsca wytworzenia uderzenia hydraulicznego. Niepewność pomiaru czasu oszacowano metodą typu B. Moment zajścia zdarzenia określano na podstawie wyników rejestracji ciśnienia wewnętrznego co sekundę, dlatego za niepewność eksperymentatora można przyjąć $\Delta t = 1$ s (Zięba 2014). Niepewność odczytu momentu czasu standardowo jest równa $U_{mt} = (1/\sqrt{3})$ s. Od odczytu czasu przejścia fali uderzeniowej ciśnienia odejmowane są dwa momenty czasu, dlatego niepewność jego odczytu jest równa $U_t = (2/\sqrt{3})$ s = 1,15 s. Lokalizacja punktów pomiarowych na trasie rurociągu jest podawana z dokładnością do $\Delta d = 0,5$ km, dlatego niepewność określania długości odcinka rurociągu może być obliczona analogicznie. Wynosi ona: $U_d = ((2 \cdot 0,5)/\sqrt{3})$ km = 0,58 km. Niepewności bezwzględne określania czasu i odległości w każdym punkcie pomiarowym są identyczne, zaś niepewności względne się różnią. Przeprowadzona analiza pokazuje z jednej strony, że największą niepewnością względną cechuje się punkt pomiarowy P3 (czas – 4,11%, droga – 1,81%), natomiast najmniejsza niepewność dotyczy punktu pomiarowego SP1-wy

(czas – 1,21%, droga – 0,56%). Z drugiej strony wraz z oddalaniem się punktu pomiarowego od miejsca powstania uderzenia hydraulicznego w sposób naturalny ulega rozmyciu obraz krzywej zmian ciśnienia wewnętrznego, pojawia się coraz więcej fluktuacji wartości ciśnienia i wzrasta trudność właściwego określenia momentu dojścia fali podwyższonego ciśnienia, co zwiększa niepewność ustalenia czasu dojścia.

Tabela 4

Prędkość rozchodzenia się fali podwyższonego ciśnienia w rurociągu „Drużba”

Data	Prędkość rozchodzenia się fali podwyższonego ciśnienia a [m/s]					Odchylenie standardowe
	P3	P2	P1	SP1-wy	średnia	
16.03	1185 (55)	1162 (36)	1143 (23)	1101 (15)	1148	36
6.04	1143 (51)	1162 (36)	1125 (22)	1125 (15)	1139	18
26.04	1067 (45)	1162 (36)	1029 (19)	1035 (13)	1073	62
7.06	1143 (51)	1107 (33)	1091 (21)	1089 (15)	1108	25
20.06	1143 (51)	1107 (33)	1091 (21)	1089 (15)	1108	25
8.07	1143 (51)	1107 (33)	1108 (22)	1089 (15)	1112	22
11.07	1143 (51)	1107 (33)	1091 (21)	1089 (15)	1108	25
26.07	1067 (45)	1081 (32)	1091 (21)	1078 (14)	1079	10
23.08	1143 (51)	1107 (33)	1108 (22)	1089 (15)	1112	22

W tabeli 4 podano wyliczone wartości prędkości rozchodzenia się fali uderzeniowej podwyższonego ciśnienia w poszczególnych punktach pomiarowych dla wybranych dziewięciu analizowanych zdarzeń. Niepewność pojedynczej wartości prędkości fali została policzona jako niepewność złożona z prawa przenoszenia niepewności (Zięba 2014). Wynosi ona:

$$u_a = \sqrt{\left(\frac{u_d}{t}\right)^2 + \left(\frac{-d \cdot u_t}{t^2}\right)^2} \quad (6)$$

Wartość niepewności oszacowanej na podstawie równania (6) została podana w tabeli 4 w nawiasie obok wyliczonej prędkości rozchodzenia się fali podwyższonego ciśnienia w poszczególnych punktach pomiarowych. Niepewność średniej prędkości rozchodzenia się fali podwyższonego ciśnienia dla poszczególnych zdarzeń została oszacowana metodą typu A, czyli niepewność reprezentuje odchylenie standardowe (Zięba 2014).

Kolejnym krokiem rozważań jest poszukiwanie związku średniej prędkości rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia w rurociągu „Drużba” z wybranymi parametrami charakteryzującymi strumień tłoczony rurociągiem ropy naftowej. W tabeli 5 podano wartości gęstości właściwej i dynamicznego współczynnika lepkości ropy naftowej oraz temperaturę otoczenia panującą w chwili zaistnienia zdarzenia będącego przedmiotem analizy.

Tabela 5
Właściwości ropy naftowej tłoczony rurociągiem „Drużba”

Data	Średnia prędkość fali ciśnienia a [m/s]	Gęstość właściwa ρ [kg/m ³]	Dynamiczny współczynnik lepkości μ [mPa·s]	Temperatura otoczenia T [°C]
16.03	1147,9	876,0	29,83	7,5
6.04	1138,8	875,8	29,85	7,2
26.04	1073,2	873,7	23,37	11,6
7.06	1107,6	869,3	17,21	17,6
20.06	1107,6	867,8	16,43	19,7
8.07	1111,8	866,8	14,98	21,0
11.07	1107,6	867,1	15,25	20,9
26.07	1079,3	868,0	15,87	21,6
23.08	1111,8	869,3	16,85	21,6

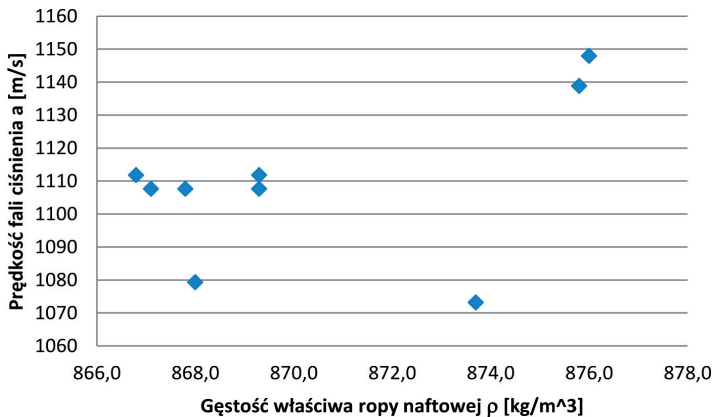
W tabeli 6 przedstawiono macierz korelacji Pearsona pomiędzy parametrami zamieszczonymi w tabeli 5. Prędkość rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia w rurociągu (a) jest umiarkowanie skorelowana (moduł współczynnika korelacji Pearsona mieści się w przedziale 0,4–0,6) w każdym z rozważanych parametrów (Zięba 2014), najgorzej skorelowana jest z gęstością właściwą tłoczony ropy naftowej (ρ), a najlepiej skorelowana jest z dynamicznym współczynnikiem lepkości ropy naftowej (μ). W przypadku gęstości właściwej i współczynnika lepkości korelacja jest dodatnia, czyli zależność jest wprost proporcjonalna, natomiast dla temperatury korelacja jest ujemna, czyli zależność jest odwrotnie proporcjonalna. Pomiedzy gęstością objętościową ropy, współczynnikiem lepkości ropy i temperaturą otoczenia istnieje bardzo silna korelacja (moduł współczynnika korelacji Pearsona mieści się w przedziale 0,8–1,0), a wartości współczynnika korelacji są bliskie 1 lub –1. Pomiedzy gęstością objętościową i współczynnikiem lepkości ropy naftowej występuje korelacja dodatnia, czyli zależność jest wprost proporcjonalna, natomiast korelacja tych parametrów z temperaturą jest ujemna, czyli zależność jest odwrotnie proporcjonalna. Współczynnik korelacji Pearsona jest bardzo wrażliwy na odstające obserwacje (Zięba 2014), dlatego w celu zidentyfikowania

przyczyn słabej korelacji prędkości rozchodzenia się zaburzenia mechanicznego w ropie naftowej z jej właściwościami oraz temperaturą otoczenia sporządzono wykresy rozrzutu punktów pomiarowych dla poszczególnych par zmiennych (rys. 12–14).

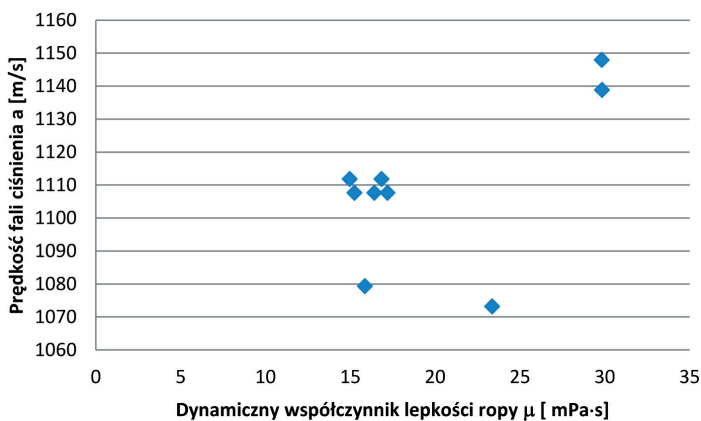
Tabela 6

Macierz korelacji pomiędzy prędkością rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia i właściwościami tłoczonyj ropy naftowej w rurociągu „Drużba” oraz temperaturą otoczenia

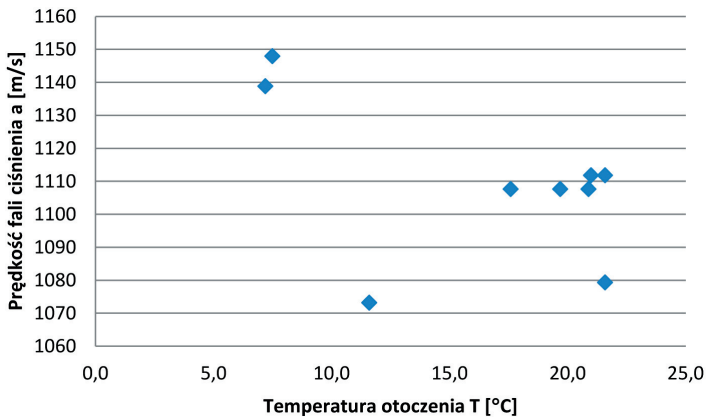
Parametr	a	ρ	μ	T
a	1	0,462 (0,953)	0,572 (0,972)	-0,507 (-0,944)
ρ	0,462 (0,953)	1	0,983 (0,990)	-0,971 (-0,969)
μ	0,572 (0,972)	0,983 (0,990)	1	-0,981 (-0,986)
T	-0,507 (-0,944)	-0,971 (-0,969)	-0,981 (-0,986)	1



Rys. 12. Wykres rozrzutu gęstość właściwa vs. średnia prędkość



Rys. 13. Wykres rozrzutu dynamiczny współczynnik lepkości vs. średnia prędkość



Rys. 14. Wykres rozrzutu temperatura otoczenia vs. średnia prędkość

Na każdym z rysunków 12–14 widać dwa obszary skupienia punktów pomiarowych. Pierwszy obejmuje dwa punkty, zaś drugi pięć punktów. Pomiedzy nimi występuje bardzo silna korelacja dodatnia (rys. 12 i 13) lub ujemna (rys. 14). Poza tymi siedmioma punktami na każdym z wykresów znajdują się jeszcze dwa nieskorelowane ze sobą punkty pomiarowe, położone w znacznej odległości od obszarów skupienia pozostałych dwóch grup punktów. Punkty te dotyczą przypadków odpowiadających najniższym wartościom średniej prędkości rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej ciśnienia i odpowiadają za zaniżanie wartości współczynnika korelacji Pearsona. Przyczyną zaniżonych wartości prędkości może być bliżej nieznaną błąd grubo eksperymentu. W kolejnym kroku rozważań usunięto dwie odbiegające obserwacje z populacji i powtórzono obliczenia macierzy korelacji. Nowe wartości współczynników korelacji Pearsona zamieszczono w tabeli 6, w nawiasie obok wyliczonych poprzednio. Tym razem w przypadku każdej pary zmiennych korelacja jest bardzo silna, a wartości współczynników korelacji Pearsona nieznacznie odbiegają od 1 lub -1 .

Ostatnim krokiem prowadzonych rozważań jest analiza regresji. Wartości współczynników korelacji Pearsona są na tyle małe (tab. 6), że nie ma sensu poszukiwanie równania regresji liniowej wiążącego średnią prędkość rozchodzenia się fali zaburzenia w ropie naftowej pojedynczo z każdym z trzech uwzględnionych parametrów, dlatego podjęto próbę dopasowania równania regresji liniowej wielorakiej dla dwóch zmiennych niezależnych (trzy pary zmiennych: ρ i μ , ρ i T oraz μ i T) dla trzech zmiennych niezależnych (ρ , μ , T). Wybrane wyniki analizy regresji zamieszczono w tabeli 7.

Najwyższy współczynnik korelacji i determinacji równania regresji liniowej wielorakiej otrzymano w przypadku przyjęcia jako zmienne objaśniające wszystkich trzech analizowanych parametrów, jednak poziom istotności obliczonej wartości zmiennej F wynoszący 0,12 znacznie przekracza poziom 0,05 przyjmowany zwykle w rozważaniach tego typu.

Oznacza to, że dopasowane równanie jest nieistotne ze statystycznego punktu widzenia. Najlepsze dopasowanie wartości badanych zmiennych uzyskano, gdy za zmienne objaśniające przyjęto dwa parametry: gęstość objętościową i dynamiczny współczynnik lepkości tłoczony ropy naftowej. W tym przypadku współczynniki korelacji i determinacji dopasowanego równania posiadają wysoką wartość ($R = 0,79$ i $R^2 = 0,63$, a poziom istotności obliczonej wartości zmiennej F jest równy 0,052, ale niestety większy od 0,05. Generalnie więc w żadnym rozpatrywanym przypadku nie udało się dopasować zależności regresyjnej na standardowo przyjmowanym poziomie istotności co najmniej 0,05. Uzyskane podczas analizy wyniki cechują się dużym skupieniem (co pokazują wartości współczynników korelacji), jednak liczebność populacji okazała się zbyt mała.

Tabela 7

Wyniki analizy regresji liniowej wielorakiej w celu dopasowania postaci zależności wiążącej średnią prędkość rozchodzenia się fali zaburzenia z właściwościami ropy naftowej i temperaturą otoczenia

Zmienne objaśniające	Liczebność populacji	Współczynnik korelacji równania R	Współczynnik determinacji równania R^2	Obliczona wartość zmiennej F	Poziom istotności obliczonej zmiennej F
(ρ, μ)	9	0,79	0,63	5,04	0,052
(ρ, T)	9	0,52	0,27	1,12	0,386
(μ, T)	9	0,64	0,40	2,03	0,212
(ρ, μ, T)	9	0,81	0,66	3,23	0,119

5. Podsumowanie

Przedmiotem rozważań jest prędkość rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia wewnętrznego ropy naftowej tłoczony rurociągiem „Drużba”. Wzrost ciśnienia w rurociągu jest skutkiem powstania zjawiska uderzenia hydraulicznego na wejściu do stacji pomp SP2 po jej wyłączeniu. W pracy wzięto pod uwagę dziewięć wybranych zdarzeń, w których miała miejsce taka sytuacja. Dla każdego przypadku określono czas dojścia fali zaburzenia ciśnienia do pięciu punktów pomiarowych ulokowanych na trasie 103,5 km odcinka rurociągu. Opierając się na tak otrzymanych cząstkowych wartościach prędkości rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia, w każdym przypadku obliczono średnią arytmetyczną prędkości. Wartości średnich prędkości są bardzo zbliżone i mieszczą się w przedziale od 1073,2 m/s do 1147,9 m/s. Wartości cząst-

kowych prędkości rozchodzenia się fali podwyższonego ciśnienia w każdym rozważanym przypadku są bardzo silnie skupione, co pokazuje obliczona wartość odchylenia standardowego średniej prędkości, którego najwyższa wartość wynosi 61,8 m/s (niepewność względna równa 5,8%), kolejna najwyższa wartość wynosi 35,7 m/s (niepewność względna równa 3,1%), natomiast w pozostałych siedmiu przypadkach niepewność bezwzględna oszacowania średniej prędkości mieści się w przedziale od 10,0 m/s do 24,8 m/s (niepewność względna wynosi od 0,9% do 2,2%). Silne skupienie cząstkowych wartości prędkości rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia oraz niewielka niepewność wartości średniej prędkości są wynikiem przede wszystkim niedużej niepewności cząstkowych wartości prędkości. W zależności od lokalizacji punktu pomiarowego niepewność ta waha się od 13 m/s do 51 m/s (niepewność względna wynosi od 1,3% do 4,5%).

W kolejnym etapie rozważań oceniono wpływ gęstości objętościowej i dynamicznego współczynnika lepkości tłoczony rupy naftowej oraz temperatury otoczenia na wartość średniej prędkości rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia wewnętrznego w rurociągu. Analiza korelacji wykazała wprost proporcjonalną zależność średniej prędkości z gęstością objętościową i dynamicznym współczynnikiem lepkości rupy naftowej oraz ujemną korelację średniej prędkości z temperaturą otoczenia (zależność odwrotnie proporcjonalna), niestety dopasowane wartości współczynników korelacji Pearsona wskazują na umiarkowane skorelowanie tych parametrów (moduł współczynnika korelacji Pearsona zmienia się od 0,46 do 0,57). Odrzucenie dwóch odstających obserwacji, odpowiadających średniej prędkości rozchodzenia się fali ciśnienia poniżej wartości 1100,0 m/s, diametralnie zmienia sytuację. Wartość modułu współczynnika korelacji Pearsona wzrasta teraz do przedziału od 0,94 do 0,97, co wskazuje na bardzo silną korelację między parametrami.

Ostatni etap stanowi analiza regresji, czyli próba dopasowania zależności regresyjnej pomiędzy średnią prędkością rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia i ρ , μ oraz T jako zmiennymi objaśniającymi, dla całej populacji danych ($N = 9$). Niestety prosta analiza regresji liniowej z jedną zmienną objaśniającą oraz regresja liniowa wieloraka z dwoma i trzema zmiennymi objaśniającymi nie pozwoliły na uzyskanie istotnej zależności regresyjnej na poziomie istotności 0,05. Najlepiej dopasowane okazało się równanie regresji na średnią prędkość rozprzestrzeniania się fali podwyższonego ciśnienia w zależności od gęstości objętościowej i dynamicznego współczynnika lepkości tłoczony rupy naftowej. Wielokrotny współczynnik korelacji równania wyniósł $R = 0,79$, a współczynnik determinacji $-R^2 = 0,63$, co oznacza, że równanie opisuje 63% zmienności parametrów. Jednak obliczona wartość poziomu istotności wyniosła $\alpha = 0,052$, czyli nieco powyżej standardowo przyjmowanych 5%.

Literatura

- Fąfara Z., 2023, *Badanie bezpieczeństwa rurociągu ze względu na uderzenie hydrauliczne*, Wydawnictwa AGH, Kraków, Nauka – Technika – Technologia, t. 8, s. 43–54.
- Grządziel A., 2021, *The Importance of Under-Keel Sound Velocity Sensor In Measuring Water Depth with Multibeam Echosounder*, *Energies*, vol. 14, no. 17, art. 5267.
- Kodura A., 2018, *Wpływ długości przewodu za zaworem kulowym na parametry uderzenia hydraulicznego z polietylenu o dużej gęstości*, *Ochrona Środowiska*, vol. 40, nr 4, s. 15–20.
- Koszela-Marek E., 2009, *Charakterystyka zmian ściśliwości roztworów soli NaCl pod wpływem wysokich ciśnień hydrostatycznych*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, R. 33, z. 1, s. 361–367.
- Ling S.J., Loyola J.S., Moebs W., 2018, *Fizyka dla szkół wyższych – Tom I*. Katalyst Education, OpenStax, OpenStax Polska, OpenStax CNX, OpenStax Tutor, Connections, Rice University, USA.
- Mambretti S., 2014, *Water Hammer Simulations*, WIT Press, Southampton.
- Michałowski W.S., Trzop S., 2006, *Rurociągi dalekiego zasięgu*, Wydawnictwo Fundacja Odysseum, Warszawa.
- Niełacny M., 2005, *Uderzenia hydrauliczne w systemach wodociągowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Thorley A.R.D., 2004, *Fluid Transients in Pipeline Systems: A Guide to the Control and Suppressions of Fluid Transients in Liquids in Closed Conduits*, ASME Press, New York.
- Zięba A., 2014, *Analiza danych w naukach ścisłych i technicznych*, wyd. 2 popr., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Termiczne przekształcanie odpadów jako ekologiczny sposób na ich zagospodarowanie

Alicja Ossera 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Kraków

Streszczenie: Celem pracy była analiza systemu gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce. Opisano najważniejsze zagadnienia teoretyczne i prawne, w szczególności dotyczące odpadów komunalnych oraz zanieczyszczenie środowiska wynikające z ich składowania i spalania. Na podstawie danych statystycznych stworzono trzy scenariusze przyrostu ilości odpadów do 2040 roku. Bazując na metodach ustawowych oraz możliwościach instalacji termicznego przetwarzania odpadów w Polsce, oszacowano produkcję energii elektrycznej i ciepła ze spalarni, a także potencjalny zysk finansowy. Na podstawie cenników z 38 miejsc obliczono średnią cenę przyjęcia odpadów do składowania w Polsce, a następnie koszty składowania odpadów dla stworzonych scenariuszy. Uwzględniono także koszt przyjęcia odpadów do spalarni. Z przeprowadzonej analizy wynika, że przy stale rosnącej ilości odpadów komunalnych ich spalanie jest koniecznym elementem domykającym system gospodarki odpadami, który jest nie tylko opłacalny, ale także pozwala uniknąć znaczących zanieczyszczeń środowiska.

Słowa kluczowe: gospodarka odpadami, termiczne przekształcanie odpadów, składowanie odpadów, spalanie odpadów, odpady komunalne

THERMAL TREATMENT OF WASTE AS AN ECOLOGICAL WAY OF WASTE MANAGEMENT

Abstract: The aim of this study was to assess the possibilities of municipal waste management system in Poland. Theoretical and legal issues were delineated, particularly concerning municipal waste, including landfilling and incineration. Statistical data was used to formulate three scenarios of increasing waste generation until the year 2040. Based on statutory methodology and the capabilities of incineration plants in Poland, theoretical energy and heat generations were estimated, along with corresponding financial gains. Data gathered from 38 landfilling sites allowed the estimation of the average price for municipal waste landfilling and enabling the calculation of the total cost of waste landfilling in the scenarios created. The cost of waste admission into incineration sites was also considered. The analysis concluded that waste incineration is a crucial element closing the waste management system. Not only is it economically viable, but it also helps to avoid significant environmental pollution.

Keywords: waste management, thermal treatment of waste, landfilling of waste, waste incineration, municipal waste

1. Wprowadzenie

W XXI wieku na świecie coraz większą wagę przywiązuje się do zagadnień związanych z ochroną środowiska. Ograniczane są emisje dwutlenku węgla jako jednego z groźnych gazów cieplarnianych, podejmowane są starania dotyczące zmniejszenia konsumpcji plastikowych opakowań przez wprowadzanie nowych ustaw i regulacji, a także odbywają się akcje nawołujące do oszczędzania wody. Wciąż jednak niewiele mówi się o odpadach: zapobieganiu ich produkcji, a także o metodach ich przetwarzania. W związku z tym przeprowadzono analizę ekonomiczną i ekologiczną zysków i kosztów wiążących się z gospodarką odpadami komunalnymi w Polsce do roku 2040, skupiając się przede wszystkim na ich spalaniu i składowaniu. W celu porównania kosztów ekologicznych metod unieszkodliwiania odpadów przeanalizowano literaturę na temat zanieczyszczeń powodowanych przez spalanie i składowanie. Następnie na podstawie danych statystycznych i Krajowego Planu Gospodarki Odpadami stworzono trzy scenariusze przyrostu ilości odpadów oraz oszacowano ilość odpadów kierowaną na składowiska każdego roku. Obliczono potencjalny koszt składowania na podstawie średniej ceny przyjęcia na składowiska w Polsce, a także potencjalny koszt przyjęcia do spalarni odpadów oraz możliwy zysk w postaci sprzedanej energii elektrycznej oraz ciepła. Energię wytworzoną w spalarniach oszacowano na dwa sposoby: posługując się wzorem na efektywność energetyczną instalacji spalania odpadów oraz szacując na podstawie możliwości średniej spalarni odpadów, będącej średnią arytmetyczną parametrów z istniejących instalacji w Polsce. Wyniki obliczeń zebrano i przeanalizowano.

2. Część metodyczna

2.1. Opis metod badawczych

Podczas przygotowania pracy skorzystano z badań literaturowych, aby porównać poziom zanieczyszczenia środowiska wynikający ze spalania i składowania odpadów. Natomiast, aby zrozumieć obecną sytuację w Polsce i przedstawić możliwe scenariusze jej rozwoju, posłużono się analizą danych statystycznych oraz innych źródeł, takich jak między innymi strony internetowe polskich spalarni odpadów oraz krajowe źródła rządowe (ustawy).

2.2. Zanieczyszczenia

Zanieczyszczenie środowiska jest nieodłączną częścią prowadzenia gospodarki odpadami. Występuje zarówno przy składowaniu odpadów, jak i przy ich spalaniu, jednak oba te procesy znacząco się różnią.

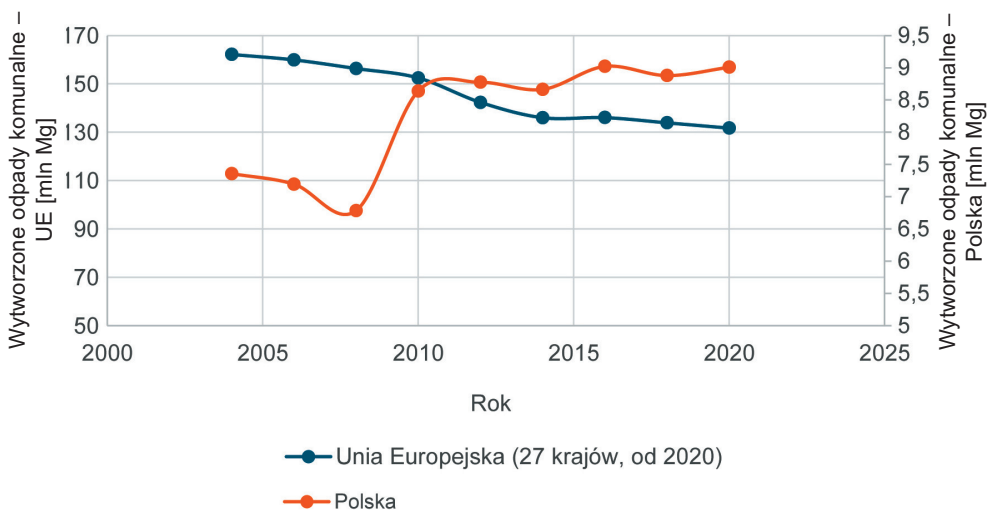
Teoretycznie składowanie odpadów na zorganizowanym składowisku polega na ich bezpiecznym deponowaniu w wyznaczonym do tego celu miejscu. Składowisko zorganizowane, które jest najbezpieczniejsze dla środowiska, jest to obiekt budowlany o jak największej szczelności i jak najmniejszym oddziaływaniu na środowisko (Rosik-Dulewska 2002). W Polsce znacznie więcej jest składowisk niezorganizowanych, tzw. dzikich wysypisk, gdzie odpady składowane są w glebie bez żadnego zabezpieczenia. Skutkami takiego działania są m.in. niekontrolowana emisja gazu wysypiskowego do atmosfery (w większości metanu, gazu cieplarnianego, który w kontakcie z powietrzem tworzy mieszaninę wybuchową (CIRE 2021)), zanieczyszczenie wód powierzchniowych i podziemnych (przesączająca się woda deszczowa staje się niebezpiecznym odciekami), a także obszarów wokół składowiska rozwiewanymi z niego pyłami i frakcją lekką odpadów, nadmierny rozwój gryzoni i ptactwa. Nie można także nie wspomnieć o drażniącym, nieprzyjemnym zapachu rozprzestrzeniającym się wokół składowiska (Rosik-Dulewska 2002).

Podczas działania instalacji spalających odpady zapachy nie roznoszą się wokół zakładu. Spalarnie odpadów w Polsce działają w większości z zasysaniem powietrza z bunkra z odpadami do procesu spalania, tak że zapach nie wydostaje się na zewnątrz – jest tak między innymi w krakowskiej Ekospalarni (KHK... 2023). Niezbędnym warunkiem zachowania bezpieczeństwa środowiskowego jest stosowanie rygorystycznych procesów oczyszczania i neutralizacji gazów spalinowych. Ze względu na bardzo duże zróżnicowanie składu odpadów trudno jest dokładnie określić potencjalny udział substancji i zanieczyszczeń w spalinach, dlatego stosowane metody oczyszczania i neutralizacji muszą być zaprojektowane w taki sposób, aby pomimo znacznych zachwiań koncentracji różnych substancji umożliwić ich redukcję do wartości podawanych przez normy (Rosik-Dulewska 2002). Normy dopuszczalnych zanieczyszczeń powietrza są bardziej rygorystyczne dla spalarni niż dla klasycznych elektrowni (Minister Klimatu 2020), natomiast emisje ze spalarni odpadów w Polsce są ściśle monitorowane. Dane na ten temat są dostępne na stronie internetowej danego zakładu, np. w Poznaniu, Krakowie i Koninie (PreZero Zielona Energia sp. z o.o. 2021, MZGOK... 2024, KHK... 2023).

2.3. Dane bazowe

Aby móc zastanawiać się nad zasadnością spalania odpadów komunalnych jako formy ich przetworzenia, należy najpierw przyjrzeć się ich ilości w Europie, a w szczególności w Polsce – czy ilość odpadów trafiająca na wysypiska każdego roku mogłaby mieć znaczący wpływ ekologiczny i przede wszystkim ekonomiczny na system gospodarki odpadami? Ile odpadów komunalnych jest produkowane? Rysunek 1 prezentuje

relację całkowitej ilości wytwarzanych odpadów tego typu w Unii Europejskiej oraz w Polsce w latach 2004–2020.



Rys. 1. Wytwarzanie odpadów komunalnych w UE i w Polsce w latach 2004–2020 [mln Mg]

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Eurostatu (2023)

W Polsce ilość odpadów komunalnych wytwarzanych co roku systematycznie wzrasta wraz z upływem czasu, zwłaszcza po roku 2008, w którym światowy kryzys ekonomiczny mógł mieć wpływ na nieznaczny spadek ilości wytwarzanych odpadów. W 2020 roku (Eurostat 2023) w Polsce wyprodukowano około 9 mln ton odpadów komunalnych, co przekłada się na 238 kg/osobę. Bardziej szczegółowe dane podaje Główny Urząd Statystyczny (Załącznik 1, GUS, dokumenty 1–16) w raportach „Infrastruktura komunalna” wydanych w latach 2009–2017 oraz „Ochrona środowiska” z lat 2018–2022.

Na podstawie danych z tabeli 1 można zaobserwować opóźniony skutek kryzysu ekonomicznego z roku 2008 w postaci spadku ilości wytwarzanych odpadów komunalnych w Polsce w latach 2010–2014. Po tym czasie trend stale rośnie, co jest związane ze wzrostem gospodarczym państwa i poprawą jakości życia mieszkańców, a także z ogólnym bogaceniem się społeczeństwa, które konsumując więcej, wytwarza więcej odpadów komunalnych. Na potrzeby dalszych oszacowań i obliczeń założono utrzymywanie się trendu wzrostowego, co jest zgodne z ogólnymi przewidywaniami oraz „Krajowym Planem Gospodarki Odpadami 2022” (Rada Ministrów RP 2016), stanowiącym jeden z podstawowych zapisów na ten temat w Polsce.

Tabela 1

Dane o odpadach wytworzonych w Polsce w latach 2009–2021

Rok	Wytworzone odpady komunalne [tys. Mg]
2009	10 053,5
2010	10 044,2
2011	9828,0
2012	9580,9
2013	9473,8
2014	10 330,4
2015	10 863,4
2016	11 654,3
2017	11 969,0
2018	12 485,0
2019	12 753,0
2020	13 117,0
2021	13 674,0

Źródło: Załącznik 1, GUS, dokumenty 1–16

3. Analiza danych

Na potrzeby analizy przygotowano trzy scenariusze przewidywania wzrostu ilości odpadów w Polsce: „Business as Usual” (BaU), który zakładał kontynuację liniowego trendu na podstawie danych z dokumentacji „Ochrona środowiska” i „Infrastruktura komunalna”, oraz dwa „Scenariusze KPGO”, które przedstawiały wzrost ilości odpadów w taki sposób, w jaki założone to zostało w ww. Krajowym Planie.

3.1. Scenariusze

Pierwszym z przygotowanych scenariuszy był „Business as Usual” (BaU). Aby oszacować dalszy wzrost ilości wytwarzanych odpadów komunalnych w Polsce, posłużono się prostym liniowym przybliżeniem, które dobrze opisywało trend od roku 2013. W programie MS Excel wyznaczono linię trendu o równaniu:

$$\text{Ilość odpadów} = 496,18 \cdot \text{rok} - 988\,973 \quad (1)$$

które opisuje wskazane dane ze współczynnikiem determinacji R^2 równym 97,69%, czyli wystarczająco dokładnie.

Drugi analizowany przypadek nazwano „Scenariuszami KPGO”, gdyż metoda prognozowania wzrostu ilości odpadów została opisana w dokumencie „Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022” w rozdziale 3 pt. „Prognoza zmian w zakresie gospodarki

odpadami” w sekcji 3.1. „Odpady komunalne, w tym odpady żywności i inne odpady ulegające biodegradacji” (*Rozporządzenie Ministra Klimatu...* 2016: 83). Przyjęto dwa wskaźniki wytwarzania i dwie hipotezy: „niską” i „wysoką”, za których pomocą oszacowano wzrost ilości wytwarzanych odpadów komunalnych do roku 2025 i 2030, przyjmując jako rok bazowy dane GUS z 2014 roku. Hipoteza niska zakłada wskaźnik wytwarzania wynoszący 0,6% i opisuje znaczne spowolnienie ilości generowanych odpadów. W tej hipotezie uwzględniono także ujemny przyrost naturalny na poziomie $-0,15\%$ rocznie. Hipoteza wysoka zakłada z kolei wskaźnik wytwarzania równy 1% w skali roku i ujemny przyrost naturalny jako $-0,2\%$. Bezpośrednio wskazane w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami dane liczbowe po przeprowadzonych oszacowaniach zawiera tabela 2.

Tabela 2

Dane do przybliżenia liniowego przyrostu ilości odpadów według KPGO 2022

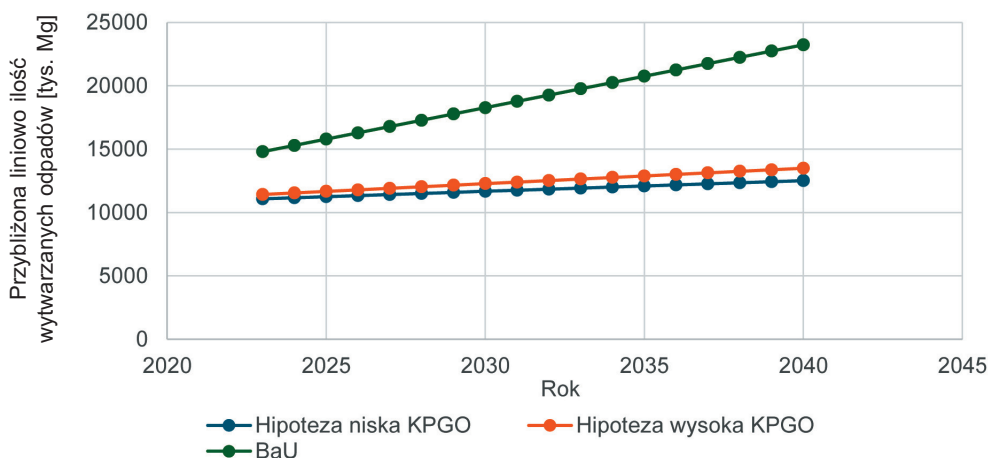
Rok	Ilość odpadów [tys. Mg]	
	hipoteza niska	hipoteza wysoka
2014	10 330,41	10 330,41
2030	11 682,02	12 280,37

Przybliżenia liniowego dokonano za pomocą następujących prostych:

– hipoteza niska: $Ilość\ odpadów = 84,47 \cdot rok - 159\ 804$ (2)

– hipoteza wysoka: $Ilość\ odpadów = 121,87 \cdot rok - 235\ 121$ (3)

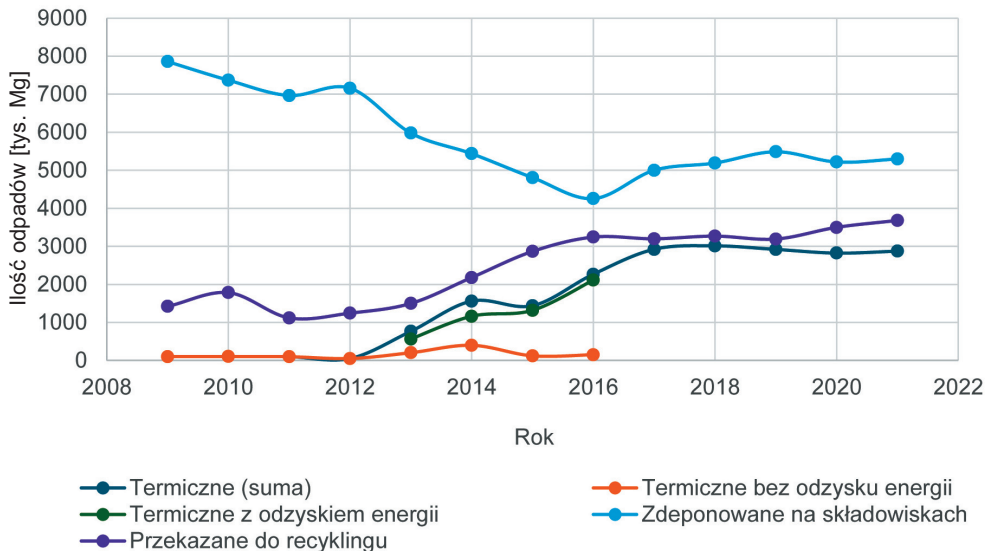
Ostatecznie do dalszych obliczeń przyjęto trzy scenariusze przyrostu ilości odpadów w latach 2023–2040 przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Scenariusze przyrostu ilości odpadów na lata 2023–2040

3.2. Zagospodarowanie odpadów komunalnych w Polsce

Główne kierunki zagospodarowania odpadów komunalnych opisywane były w dokumentach GUS i zostały przedstawione w formie wykresu (rys. 3).



Rys. 3. Zagospodarowanie odpadów komunalnych w Polsce – główne metody

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

Pomimo że pomiędzy rokiem 2009 a 2021 ogólna ilość odpadów deponowanych na składowiskach zmalała, to można zaobserwować trend rosnący od roku 2016. Ze względu na wymogi Unii Europejskiej i politykę państwa rośnie ilość odpadów przekazywanych do recyklingu. Przede wszystkim warto zauważyć, że rośnie raportowana ilość odpadów przekształcanych termicznie w Polsce, a od roku 2012 przedstawiano przez 4 lata tę zależność osobno z odzyskiem i bez odzysku energii. Na rysunku 3 wyraźnie daje się zauważyć lata, w których pracę rozpoczynały polskie spalarnie odpadów. W 2012 roku w życie weszła ustawa o odpadach (*Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach*), w której zdefiniowano procesy spalania i postępowania z odpadami, jak też podano definicję samych odpadów. Do roku 2015 w Polsce funkcjonowała tylko jedna spalarnia odpadów komunalnych – ZUSOK (Zakład Unieszkodliwiania Stałych Odpadów Komunalnych) w Warszawie, natomiast stale wzrastało wykorzystanie odpadów do wytwarzania paliwa RDF, z którego korzystają cementownie. W latach 2015–2018 działalność rozpoczęło siedem kolejnych instalacji termicznego przekształcania, o wielokrotnie większych mocach i wydajnościach niż spalarnia w Warszawie. W tabeli 3 przedstawiono parametry polskich spalarni odpadów zebrane do dalszych obliczeń.

Tabela 3
Parametry polskich spalarni odpadów

Parametr		Instalacja							
		Białystok	Bydgoszcz	Konin	Kraków	Poznań	Szczecin	Rzeszów	Warszawa
Wydajność	[Mg/h]	15,00	20,55	12,05	25,11	23,97	20,09	12,5	5,39
	[Mg/rok]	120 000	180 000	94 000	220 000	210 000	176 000	100 000	39 729
Moc nominalna	[MWe]	4,91	9,20	6,75	7,42	12,56	10,00	4,60	2,40
	[MWth]	11,42	27,70	15,50	31,96	36,53	30,00	15,40	9,00
Parametr		Instalacja							
		Białystok	Bydgoszcz	Konin	Kraków	Poznań	Szczecin	Rzeszów	Warszawa
Roczna produkcja energii elektrycznej	[MWh]	43 000,00	69 605,50	47 000,00	65 000,00	110 000,00	87 600,00	37 000,00	10 545,30
Roczna produkcja ciepła	[GJ]	360 000	881 840	120 000	1 008 000	1 152 000	262 800	444 000	243 010

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów ze stron internetowych zakładów – MZGOK w Koninie (2024), KHK... (2023), ProNatura Sp. z o.o. w Bydgoszczy, (2024), Miasto Bydgoszcz (2016), EcoGenerator S.A. (2023), P.U.H.P. LECH Spółka z o.o. (2017), ZUSOK (2009), Urząd Miasta Poznania (2022). Komórki oznaczone na szaro – wartości obliczone na podstawie innych parametrów

3.3. Obliczenia

3.3.1. Metoda efektywnościowa

W załączniku nr 1 do ustawy (*Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach*) zapisane jest, że spalarnie odpadów mogą korzystać z odpadów jako paliwa lub środka wytwarzania energii pod warunkiem, że spełniają założenie o efektywności energetycznej równej lub większej niż 0,6 w przypadku działających instalacji, które otrzymały wszystkie stosowne zezwolenia, zgodne z przepisami wspólnotowymi obowiązującymi przed 1.01.2009 roku, lub 0,65 dla instalacji, które otrzymały zezwolenie po 31.12.2008 roku, oraz korzystając z następującego wzoru:

$$\text{Efektywność energetyczna} = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (4)$$

gdzie:

- E_p – ilość energii produkowanej rocznie jako energia cieplna lub elektryczna; oblicza się ją, mnożąc ilość energii elektrycznej przez 2,6, a energii cieplnej wyprodukowanej w celach komercyjnych – przez 1,1 (GJ/rok),
- E_f – ilość energii wprowadzanej rocznie do systemu, pochodzącej ze spalania paliw biorących udział w wytwarzaniu pary (GJ/rok),
- E_w – roczna ilość energii zawartej w przetwarzanych odpadach, obliczanej przy zastosowaniu dolnej wartości opałowej odpadów (GJ/rok),
- E_i – roczna ilość energii wprowadzanej z zewnątrz z wyłączeniem E_w i E_f (GJ/rok).

Współczynnik uwzględniający straty energii ze względu na promieniowanie i popiół denny w palenisku przyjmuje się na poziomie 0,97.

Aby oszacować uzysk energetyczny ze spalania odpadów, przyjęto następujące dane:

- efektywność energetyczna = 0,65;
- $WO_{\text{średnia}} = 8,575$ MJ/kg – średnia na podstawie pozwoleń zintegrowanych z działających instalacji (Marszałek Województwa Małopolskiego 2015, Marszałek Województwa Podkarpackiego 2018, Marszałek Województwa Zachodniopomorskiego 2017, Marszałek Województwa Podlaskiego 2015);
- paliwo pomocnicze – lekki olej opałowy, $WO_{\text{olej}} = 42$ MJ/kg;
- wykorzystanie w instalacji wyłącznie energii wytwarzanej w zakładzie, czyli brak dodatkowej energii wprowadzanej z zewnątrz: $E_i = 0$.

Oraz poniższe równania do obliczenia E_w oraz E_f :

$$E_w = IO \cdot WO_{\text{średnia}} \quad (5)$$

$$E_f = IP_p \cdot WO_{\text{olej}} \quad (6)$$

gdzie:

- IO – ilość odpadów,
- IP_p – ilość paliwa pomocniczego.

W wyniku uzyskano $E_w = 1\,221\,647,06$ GJ oraz $E_f = 1\,660\,636,32$ GJ. Co za tym idzie, uwzględniając pozostałe dane, otrzymano E_p , czyli ilość energii produkowanej rocznie jako energia cieplna lub elektryczna równą $3\,477\,915,99$ GJ. Zgodnie z ustawą, dzieląc ten wynik przez 2,6, obliczono możliwy uzysk energii elektrycznej na poziomie $1\,337\,660$ GJ rocznie lub dzieląc przez 1,1 dla ciepła na poziomie $3\,161\,741,81$ GJ rocznie.

W praktyce taka instalacja produkowałaby równocześnie ciepło, jak i energię elektryczną. Średni stosunek mocy elektrycznej zainstalowanej do cieplnej w polskich spalarniach odpadów wynosi 33,4%. Przyjęto więc, że średnia spalarnia produkuje 1/4 energii jako energię elektryczną oraz 3/4 jako ciepło. Ostatecznie więc:

- średni roczny uzysk energetyczny w jednej spalarni – ciepło = $2\,608\,437$ GJ;
 - średni roczny uzysk energetyczny w jednej spalarni – energia elektryczna = $869\,479$ GJ.
- Musi jednak zostać obniżony o średnie zużycie własne energii, na podstawie danych z tabeli 4. Ostatecznie więc uzyskana (sprzedana) energia elektryczna może wynieść $764\,949,40$ GJ, czyli $212\,485,94$ MWh w ciągu jednego roku.

3.3.2. Metoda średniej instalacji

Aby oszacować możliwości spalania odpadów w przyszłości, obliczono średnią wydajność instalacji termicznego przetworzenia odpadów z odzyskiem energii na podstawie danych o istniejących w Polsce zakładach z tabeli 3. Wyniki obliczeń zebrano w tabeli 4.

Tabela 4

Parametry modelowej, średniej instalacji termicznego przekształcania odpadów w Polsce

Parametr	Jednostka	Dane
Wydajność	[Mg/h]	16,83
	[Mg/rok]	142 466,13
Moc nominalna	[Mwe]	7,23
	[MWth]	22,19
Roczna produkcja energii elektrycznej	[MWh]	58 718,85
	[GJ]	211 387,86
Roczna produkcja ciepła	[GJ]	558 956,25
Maksymalne roczne zużycie paliwa pomocniczego (olej opałowy lekki)	[Mg/rok]	39 538,96
Zużycie energii własne	[MWh]	29 036,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów ze stron internetowych polskich spalarni oraz pozwoleń zintegrowanych na ich budowę

3.4. Zyski ze spalania

W przypadku każdego ze scenariuszy przyrostu ilości odpadów komunalnych udział przeznaczanych do składowania odpadów określono jako 41%; jest to średnia wartość z ostatnich kilku lat, która zmienia się powoli. Składowana ilość została wykorzystana do oszacowania wielkości strumienia paliwa do nowych spalarni. Na tej podstawie określono, ile modelowych instalacji musiałoby działać każdego roku, aby przetworzyć wszystkie odpady. Następnie mnożąc liczbę spalarni przez uzyskane powyżej średnioroczne zyski energii elektrycznej i ciepła (metoda efektywnościowa) lub możliwości uzysku średniej instalacji (metoda średniej instalacji), oszacowano całkowite możliwe zyski ze spalania odpadów komunalnych.

Cena energii elektrycznej w 2022 roku gwałtownie wzrosła (co mogło mieć związek ze wstrzymaniem importu gazu ziemnego z terytorium Rosji po wybuchu wojny w Ukrainie) i – mimo wcześniejszego dość stabilnego wzrostu cen od około roku 2017 – do dalszych obliczeń przyjęto cenę średniorocznej sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym równą 523,71 zł/MWh ze względu na jej trudne do oszacowania zmiany (URE 2023a). Natomiast przyjęta na podstawie wypowiedzi prezesa Urzędu Regulacji Energetyki z dnia 21.09.2022 (URE 2023b) cena sprzedaży ciepła wynosiła 103,82 zł/GJ.

4. Koszty składowania odpadów

Aby oszacować koszty składowania odpadów komunalnych, odszukano cenniki przyjęcia/odbioru/składowania odpadów, dostępne na stronach składowisk odpadów i punktów selektywnej zbiórki odpadów komunalnych (PSZOK) na terenie Polski. Uwzględniono co najmniej po jednym zakładzie w każdym województwie, na podstawie dostępnych danych rozdzielając ceny przyjęcia w zależności od kodu odpadów. Nie wszystkie cenniki udostępniły bezpośrednio dane o zmieszanych odpadach komunalnych z kodem 20 03 01. W przypadku wszystkich instalacji do obliczeń przyjmowano przynajmniej po cztery rodzaje odpadów, uwzględniając szczególnie zmieszane odpady komunalne. Wyjątkiem były zakłady, które tej informacji nie podawały – wtedy przyjmowano najbardziej zbliżone składem mieszaniny rodzaje odpadów, między innymi odpady o kodzie 02 01 04 – odpady tworzyw sztucznych (z wyłączeniem opakowań) lub o kodzie 15 01 06 – zmieszane odpady opakowaniowe, aby uzyskać szacunkową, średnią cenę za odpady podobne do zmieszanych komunalnych. Do obliczenia średniej skorzystano z cenników z 10 gmin miejsko-wiejskich (MW), 8 wiejskich (W) oraz 21 miejskich (M), znajdujących się we wszystkich województwach. Wyznaczono średnią cenę składowania odpadów w każdej z lokalizacji, a następnie średnią dla całego

kraju. Ostatecznie średnia cena składowania uwzględniająca wszystkie dostępne dane o odpadach oznaczonych kodami wymienionymi powyżej wyniosła 572,96 zł/Mg odpadów. Po uwzględnieniu tylko tych składowisk (33), które podawały bezpośrednio cenę za przyjmowanie odpadów o kodzie 20 03 01 (zmieszane odpady komunalne), średnia cena za składowanie samych niesegregowanych zmieszanych odpadów komunalnych zbieranych w sposób selektywny wyniosła 616,01 zł/Mg. Do obliczenia kosztów składowania odpadów w Polsce przyjęto jednak tę pierwszą wartość ze względu na pokrycie całego obszaru kraju (Załącznik 2, Cenniki 1–38). Biorąc pod uwagę prognozowaną ilość odpadów komunalnych w każdym ze scenariuszy, obliczono koszty składowania odpadów, jakie do 2040 roku będzie musiało ponieść polskie społeczeństwo. Obliczono je jako ilość odpadów przeznaczaną do składowania, pomnożoną przez średnią cenę przyjęcia do składowania w Polsce. Całkowita kwota w tym okresie w zależności od scenariusza wynosi odpowiednio 49,88 mld zł (Scenariusz Hipoteza niska KPGO), 52,68 mld zł (Scenariusz Hipoteza wysoka KPGO) lub 80,41 mld zł (Scenariusz BaU).

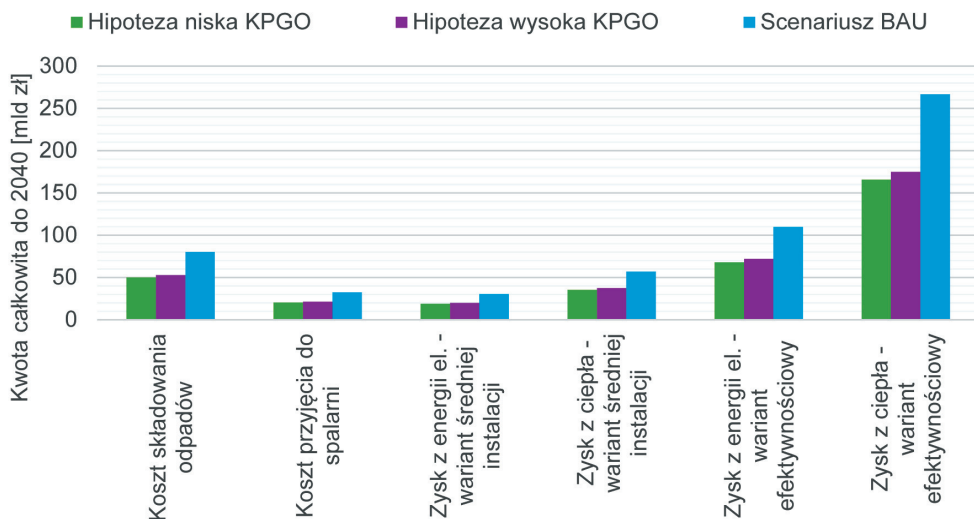
Dodatkowo uwzględniono koszt przyjęcia odpadów w spalarni. Skorzystano przy tym z informacji o kwocie 231,53 zł/Mg odpadów przyjętych do spalania w krakowskiej Ekospalarni (Miejska Platforma Internetowa „Magiczny Kraków” 2022). Cenę tę pomnożono przez strumień odpadów kierowanych do spalania w modelowanych scenariuszach.

5. Wnioski

Uzyskane zyski i koszty we wszystkich analizowanych przypadkach zebrano na rysunku 4. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki stanowią szacunkowe, nie zaś dokładne kwoty. Są efektem uśredniania wielu czynników i przybliżania ich do prostych zależności, podczas gdy w rzeczywistości procesy gospodarowania odpadami są znacznie bardziej kompleksowe i składają się na nie czynniki, które nie zostały uwzględnione w niniejszej pracy, jak na przykład koszty transportowe odpadów. Nie zostały obliczone także nakłady finansowe na inwestycję polegającą na budowie kilkadziesiątu nowych spalarni odpadów, które byłyby bardzo duże: wykup ziemi oraz koszty projektów, budowy, a oprócz kosztów finansowych proces projektowania, budowy i rozruchu takich instalacji jest także czasochłonny – nie byłoby możliwe już od 2023 roku nagłe rozpoczęcie spalania w tylu nowych instalacjach. Zanim pojawiłyby się obliczone powyżej zyski z działania przedsiębiorstw, należałoby zainwestować ogromne kwoty.

Koszt systemu gospodarki odpadami nie maleje przy budowie spalarni odpadów, wręcz przeciwnie – cena, jaką zapłacą mieszkańcy za odbiór i gospodarowanie odpadami, może rosnąć wraz ze stopniem zaawansowania systemu ich przetwarzania. Instalacja

cje termicznego przetwarzania muszą pobierać opłaty z powodu konieczności zwrotu wspomnianych nakładów inwestycyjnych. Spalarnie ponoszą też koszty operacyjne, o których nie należy zapominać, na przykład: utrzymanie techniczne instalacji, zużycie materiałów, w tym paliwa pomocniczego, oraz substancji wykorzystywanych przy oczyszczaniu spalin, a także gospodarka pozostałościami poprocesowymi. Mimo to analiza wykazała, że możliwe zyski z wykorzystania odpadów jako paliwa mogą sięgać wielu milionów złotych.



Rys. 4. Uzyskane w analizie wyniki

Najprawdopodobniej to właśnie koszty inwestycyjne i pozwolenia środowiskowe sprawiają, że obecnie w Polsce jest tylko osiem spalarni odpadów z odzyskiem energii. Z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) do polskich firm na wsparcie budowy spalarni odpadów przygotowano środki w wysokości 3 mld złotych i zgłoszonych projektów od 2021 roku jest bardzo wiele (Fundusz Modernizacyjny 2022) – ale koszty budowy są każdorazowo wysokie. Na przykład instalacja w Gdańsku otrzymała pożyczkę z NFOŚiGW w wysokości prawie 700 mln złotych. Jej budowa miała zostać zakończona w czerwcu 2023 roku (Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej 2021), jednak w sierpniu 2023 roku źródła internetowe podawały, że ukończono dopiero 80% inwestycji (Oleksy 2023).

6. Podsumowanie

System gospodarki odpadami ma duży potencjał rozwoju. Budowa nowych spalarni odpadów z odzyskiem energii umożliwiłaby znaczne ograniczenie wielkości składowisk

odpadów – zarówno zorganizowanych, jak i bardziej niebezpiecznych, niezabezpieczonych „dzikich wysypisk”. Wykorzystanie odpadów komunalnych jako paliwa jest kluczowym elementem gospodarki o obiegu zamkniętym i dopełnieniem systemu gospodarki odpadami. Nie wszystkie odpady można poddać recyklingowi. Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie do końca ich potencjału energetycznego niż pozwolenie na zmarnowanie go na składowisku, co przyczynia się do zanieczyszczenia środowiska – wód, gruntów i powietrza.

Literatura

- CIRE, 2021, *Metan jest większym problemem niż CO₂, jest plan redukcji emisji metanu o 30 proc. O tym się mówi*, <https://www.cire.pl/artykuly/o-tym-sie-mowi/metan-jest-wiekszym-problemem-niz-co2-jest-plan-redukcji-emisji-metanu-o-30-proc> [dostęp: 2.01.2024].
- Eurostat, 2023, *Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity*, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en [dostęp: 30.05.2023].
- Fundusz Modernizacyjny, 2022, *Dodatkowe 2 mld zł z Funduszu Modernizacyjnego dla przedsiębiorców na wykorzystanie odpadów w energetyce*, <https://www.gov.pl/web/funduszmodernizacyjny/dodatkowe-2-mld-zl-z-funduszu-modernizacyjnego-dla-przedsiębiorców-na-wykorzystanie-odpadów-w-energetyce> [dostęp: 16.10.2023].
- KHK (Krakowski Holding Komunalny) S.A. w Krakowie, 2023, *Ekospalarnia*, <https://khk.krakow.pl/pl/ekospalarnia/> [dostęp: 30.05.2023].
- Marszałek Województwa Małopolskiego, 2015, *Pozwolenie zintegrowane dla instalacji ZTPO*.
- Marszałek Województwa Podkarpackiego, 2018, *Pozwolenie zintegrowane spalarnia IPPC ITPOE*, https://bip.podkarpackie.pl/attachments/article/4044/pozwolenie%20zintegrowane%20spalarnia%20IPPC_ITPOE%20OS-I.7222.42.6.2017.RD.pdf [dostęp: 16.12.2023].
- Marszałek Województwa Podlaskiego, 2015, *Pozwolenie zintegrowane*.
- Marszałek Województwa Zachodniopomorskiego, 2017, *Pozwolenie zintegrowane (IPCC)*, https://www.zuo.szczecin.pl/dokumenty/pozwolenie_zintegrowane_ipcc.pdf [dostęp: 16.12.2023].
- Miejska Platforma Internetowa „Magiczny Kraków”, *Zmiana stawki za odpady w pytaniach i odpowiedziach*, 2022, www.krakow.pl/aktualnosci/258529,2163,komunikat,zmiana_stawki_za_odpady_w_pytaniach_i_odpowiedziach.html [dostęp: 7.01.2024].
- MZGOK (Miejski Zakład Gospodarki Odpadami Komunalnymi) w Koninie, 2024, <https://www.mzgok.konin.pl/> [dostęp: 2.01.2024].

- Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, 2021, *NFOŚiGW wspiera budowę spalarni odpadów w Gdańsku – Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – Portal Gov.pl*, <https://www.gov.pl/web/nfosigw/nfosigw-wspiera-budowe-spalarni-odpadow-w-gdansk> [dostęp: 25.06.2024].
- Oleksy E., 2023, *Budowa spalarni zbliża się do końca. 80 proc. inwestycji gotowe*, <https://www.trojmiasto.pl/wiadomosci/Budowa-spalarni-zbliza-sie-do-konca-80-proc-inwestycji-gotowe-n180986.html> [dostęp: 27.12.2023].
- PreZero Zielona Energia sp. z o.o., 2021, *Monitoring emisji – PreZero Zielona Energia sp. z o.o.*, <https://prezero-zielonaenergia.pl/raporty-z-pracy-instalacji/monitoring-emisji/> [dostęp: 2.01.2024].
- Rosik-Dulewska C., 2002, *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 24 września 2020 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów*, Dz.U. 2020, poz. 1860, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20200001860/O/D20201860.pdf> [dostęp: 22.10.2023].
- Uchwała Nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022*, Monitor Polski. Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej, 2016, poz. 784.
- URE, 2023, *Średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym (roczna i kwartalne)*, Regulacji Energetyki, <https://www.ure.gov.pl/pl/urząd/informacje-ogolne/aktualnosci/11001,Urząd-Regulacji-Energetyki-publikuje-zestawienia-srednich-cen-sprzedazy-energii-.html> [dostęp: 16.12.2023].
- URE, 2023, *Ustawa o ciepłe może nie zatrzymać wszystkich podwyżek*, Urząd Regulacji Energetyki, <https://www.ure.gov.pl/pl/urząd/informacje-ogolne/edukacja-i-komunikacja/ure-w-mediach-1/10539,Ustawa-o-ciepłe-może-nie-zatrzymac-wszystkich-podwyżek.html> [dostęp: 16.12.2023].
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach*, Dz.U. 2013, poz. 21, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20130000021/U/D20130021Lj.pdf> [dostęp: 4.04.2023].
- Miasto Bydgoszcz, Biuro Zarządzania Gospodarką Odpadami Komunalnymi w Bydgoszczy, 2016, *100 dni ekoelektrociepłowni*, <https://web.archive.org/web/20160806220708/http://www.odpady.czystabydgoszcz.pl/aktualnosci/100-dni-ekoelektrociepłowni> [dostęp: 9.12.2023].
- ZUSOK, Zakład Unieszkodliwiania Stałych Odpadów Komunalnych w Warszawie, 2009, *Edukacja*, <https://web.archive.org/web/20090401224016/http://www.zusok.com.pl/edukacja.htm> [dostęp: 11.04.2023].

Urząd Miasta Poznania, 2022, *Poznańska spalarnia ma już pięć lat*, <https://www.poznan.pl/mim/info/news/poznanska-spalarnia-ma-juz-piec-lat,184005.html> [dostęp: 10.04.2023].

Załącznik 1. Dokumenty Głównego Urzędu Statystycznego

1. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2023, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
2. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2022, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
3. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2021, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
4. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2020, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
5. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2019, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
6. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2018, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
7. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2017, *Ochrona środowiska*, Tabl. 10(245). Odpady komunalne zebrane_a według sposobu zagospodarowania i województw.
8. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2005, *Ochrona środowiska*.
9. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2016, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
10. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2015, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
11. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2014, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
12. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2013, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
13. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2012, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
14. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2011, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
15. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2010, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.
16. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2009, *Infrastruktura komunalna*, Tabl. 25 Gospodarowanie odpadami komunalnymi.






Załącznik 2. Cenniki

1. Burmistrz Tucholi, 2022, *Zarządzenie nr 120.127.2022 Burmistrza Tucholi z dnia 14.11.2022.*
2. EKO DOLINA Sp. z o.o. z siedzibą w Łęczycach, 2023, *Uchwała nr 17/2023 Zgromadzenia Wspólników „EKO DOLINA” Sp. z o.o. z siedzibą w Łęczycach z dnia 11.09.2023 r.*
3. ELWOZ ECO Sp. z o.o., 2023, *Cennik za przyjęcie odpadów w ZZO Chlewnica.*
4. Legnickie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej, 2023, *Cennik za przyjęcie odpadów do Zakładu Zagospodarowania Odpadów w Legnicy.*
5. MASTER – Odpady i Energia Sp. z o.o., 2022, *CENNIK na rok 2023 usług świadczonych przez MASTER – Odpady i Energia Sp. z o.o. w Tychach.*
6. Miejski Zakład Oczyszczania Leszno Sp. z o.o., 2023, *Cennik za przyjęcie i zagospodarowanie odpadów Stacja Przeladunkowa Odpadów Komunalnych w Goli, gm. Gostyń.*
7. Miejski Zakład Oczyszczania Leszno Sp. z o.o., 2023, *Cennik za przyjęcie i zagospodarowanie odpadów Stacja Przeladunkowa Odpadów Komunalnych w Rawiczu, gm. Rawicz.*
8. Miejski Zakład Oczyszczania Leszno Sp. z o.o., 2023, *Cennik za przyjęcie i zagospodarowanie odpadów Stacja Przeladunkowa Odpadów Komunalnych w Trzebani, gm. Osieczna.*
9. Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej Sp. z o.o. w Chełmie, 2023, *CENNIK 1/2023 przyjęcia odpadów komunalnych do Zakładu Przetwarzania Odpadów Komunalnych regionu chełmskiego.*
10. Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania Kraków Sp. z o.o., 2023, *Cennik za przyjęcie odpadów „Lamusownia” przy ul. Nowohuckiej 1D w Krakowie.*
11. Miejskie Wodociągi i Oczyszczalnia sp. z o.o. w Zakurzewie, 2022, *Cennik za przyjęcie odpadów do zakładu gospodarki odpadami w Zakurzewie.*
12. MPGK Katowice, 2023, *Wysokość opłat za usługi zagospodarowania odpadów w Zakładzie Odzysku i Unieszkodliwiania Odpadów MPGK SP. z o.o. w Katowicach przy ul. Miłowickiej 7A.*
13. PGK Sp. z o.o. w Opocznie, 2020, *Cennik przyjęcia odpadów do ZUO.*
14. PGK Sp. z o.o. w Słupsku, 2023, *Cennik zagospodarowania odpadów Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej Sp. z o.o. w Słupsku.*
15. PGKiM Łęczna sp. z o.o., 2023, *Cennik usług zagospodarowania odpadów w Dziale Utylizacji Odpadów w ms. Stara Wieś, gm. Łęczna.*
16. PGO Sp. z o.o. w Promniku, 2023, *Zarządzenie nr 03/10/2023 Prezesa Zarządu PGO Sp. z o.o. w Promniku z dnia 31.10.2023 r.*

17. Prezydent Miasta Biała Podlaska, 2021, *Załącznik do zarządzenia nr 239/21 Prezydenta Miasta Biała Podlaska z dnia 23 grudnia 2021 r.*
18. Prezydent Miasta Bydgoszczy, 2023, *Zarządzenie nr 435/2023 Prezydenta Miasta Bydgoszczy z dnia 20.07.2023 r.*
19. Prezydent Miasta Krosna, 2011, *Załącznik nr 2 do zarządzenia nr 108/11 Prezydenta miasta Krosna z dnia 18.04.2011 r.*
20. Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej Sp. z o.o. w Biłgoraju, 2023, *Zarządzenie nr 08/11/2023 Prezesa Zarządu Przedsiębiorstwa Gospodarki Komunalnej Sp. z o.o. w Biłgoraju z dnia 30.11.2023 r.*
21. Przedsiębiorstwo gospodarki komunalnej w Końskich Sp. z o.o., 2023, *Cennik usług odbioru i zagospodarowania odpadów obowiązujący w Przedsiębiorstwie Gospodarki Komunalnej w Końskich Sp. z o.o. na terenie Gminy Końskie.*
22. Przedsiębiorstwo Gospodarowania Odpadami w Płocku Sp. z o.o., 2023, *Cennik za przyjęcie odpadów obowiązujący od 1 stycznia 2023 r.*
23. Przedsiębiorstwo Zagospodarowania Odpadów Sp. z o.o. Gliwice, 2023, *Cennik odpadów przyjmowanych do instalacji przetwarzania odpadów w Gliwicach przy ul. Rybnickiej 199B obowiązujący od 1 stycznia 2023 roku.*
24. PUK Sp. z o.o. w Ciechanowie, 2023, *Ceny za przyjęcie do zagospodarowania 1Mg (tony) odpadów w Regionalnym Zakładzie Gospodarki Odpadami Komunalnymi w Woli Pawłowskiej.*
25. Rada Miasta Białegostoku oraz Zarząd P.U.H.P. LECH Sp. z o.o., 2020, *Wysokość opłat za przyjmowanie odpadów do Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych w Białymstoku od dn. 12.12.2020 r.*
26. Rada Miasta Elbląg, 2023, *Uchwała nr XX/X/848/2023 Rady miejskiej w Elblągu z dnia 09.03.2023 r.*
27. Składowisko Odpadów Komunalnych Sp. z o.o. w Oświęcimiu, 2023, *CENNIK za przyjęcie odpadów do Instalacji Komunalnej w Oświęcimiu.*
28. URBIS Sp. z o.o. w Gnieźnie, 2022, *Uchwała Nr 31 / 2022 z dnia 12 września 2022 r. Zarządu URBIS Sp. z o. o. w Gnieźnie.*
29. Zakład Gospodarki Komunalnej Sp. z o. o. w Zielonej Górze, 2023, *Uchwała nr 02/2023 Zarządu Zakładu Gospodarki Komunalnej Sp. z o.o. z dnia 24.02.2023*
30. Zakład Gospodarki Odpadami S.A. w Bielsku-Białej, 2023, *Cennik za przyjęcie i zagospodarowanie odpadów w Instalacji Komunalnej Zakład Gospodarki Odpadami SA w Bielsku-Białej.*
31. Zakład Gospodarowania Odpadami GAĆ Sp. z o.o., 2023, *Zarządzenie nr 4/2023 Prezesa Zarządu Zakładu Gospodarowania Odpadami GAĆ Sp. z o.o. z dnia 12.09.2023 r.*
32. Zakład Komunalny Opole Sp. z o.o., 2022, *Cennik za przyjęcie i zagospodarowanie odpadów Obowiązujący od dnia 1 stycznia 2022 r.*

33. Zakład Unieszkodliwiania Odpadów „Janik” Sp. z o.o., 2022, *Ceny odpadów przyjmowanych przez Z.U.O. „JANIK” Sp. z o.o.*
34. Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych Spytkowo Sp. z o.o., 2022, *Cennik za przyjęcie i zagospodarowanie odpadów w ramach świadczenia usług publicznych przez Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych Spytkowo Sp. z o.o. od dnia 16.05.2022 r.*
35. Zakład Utylizacyjny Sp. z o.o. w Gdańsku, 2023, *Wysokość opłat pobieranych przez Zakład Utylizacyjny Sp. z o.o. w Gdańsku za przyjęcie IMG do zagospodarowania w Gdańsku-Szadółkach od gmin, które nie podpisały porozumienia z Gminą Gdańsk oraz innych kontrahentów ważny od 23.11.2023 r.*
36. Zakład Zagospodarowania Odpadów w Poznaniu Sp. z o.o., 2023, *Załącznik nr 1 do Uchwały Zarządu Zakładu Zagospodarowania Odpadów w Poznaniu Sp. z o.o. nr 7/II/2023 z dnia 25.01.2023 r.*
37. ZUK Puławy, 2023, *Cennik przyjęcia odpadów ZUK Sp. z o.o. w Puławach.*
38. ZWiUK EKOWOD Sp. z o.o. w Namysłowie, 2023, *Zarządzenie nr 01/2023 Prezesa Zarządu ZWiUK „EKOWOD” Sp. z o.o. w Namysłowie z dnia 17.01.2023 r.*

Łatwo dostępny spektroskop o dużej rozdzielczości z dedykowaną aplikacją mobilną pozwalającą na analizę otrzymanego spektrum

Łukasz Ruba^{1,2} , Ryszard Błażej³ , Jakub Hulek³ ,
Roman Kokoszka¹ , Joanna Janik-Kokoszka¹ 

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Kraków

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Kraków

³ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: Artykuł przedstawia projekt i wykonanie papierowego spektroskopu o dużej rozdzielczości przeznaczonego do celów edukacyjnych wraz z aplikacją mobilną przeprowadzającą analizę spektralną zdjęcia i klasyfikującą spektrum do pierwiastków z wbudowanej bazy spektrów emisyjnych. Algorytm analizujący obraz został stworzony tak, aby nie wymagał wcześniejszej kalibracji, wynik bazuje tylko na otrzymanym obrazie oraz na wartości stałej siatki dyfrakcyjnej użytej przy budowie spektroskopu.

Przeprowadzono eksperymenty badające działanie spektroskopu przy użyciu żarówek i rurek Plücker'a. Dokładność analizy obrazu i algorytmu klasyfikacji badano na podstawie wygenerowanych obrazów spektrów emisyjnych pierwiastków.

Słowa kluczowe: spektroskopia, papierowy spektroskop, analiza spektralna, klasyfikacja widm emisyjnych

HIGH RESOLUTION SPECTROSCOPE WITH DEDICATED MOBILE APPLICATION FOR ANALYSIS OF OBTAINED SPECTRUM

Abstract: The article presents the design and implementation of a high-resolution paper spectroscopy intended for educational purposes, along with a mobile application that conducts spectral analysis of the image and classifies the spectrum into elements from a built-in database of emission spectra. The image analysis algorithm was created to not require prior calibration; the result is based solely on the received image and the value of the diffraction grating used in the construction of the spectroscopy.

Experiments were conducted to examine the performance of the spectroscopy using light bulbs and Plücker tubes. The accuracy of the image analysis and classification algorithm was tested based on generated images of the emission spectra of elements.

Keywords: spectroscopy, paper spectroscopy, spectral analysis, emission spectrum classification

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7_7

1. Wprowadzenie

Spektroskopia optyczna stanowi jedną z podstawowych dziedzin fizyki. Młodzież szkolna poznaje na lekcjach fizyki wygląd pięknych widm poszczególnych pierwiastków. Przy dzisiejszym zaawansowaniu technicznym wykonanie doświadczenia z rozszczepieniem światła nie powinno stanowić wyzwania, a jednak wciąż brakuje nam łatwo dostępnych, a zarazem dobrych rozwiązań w tym zakresie.

W celu propagowania nauk przyrodniczych wśród uczniów i studentów zbudowaliśmy niedrogi i łatwy w wykonaniu spektroskop papierowy. Widma uzyskiwane za jego pomocą powinny dawać obrazy podobne do tych umieszczonych w podręcznikach fizyki. W tym artykule przedstawiliśmy proste i skuteczne rozwiązania wyzwań inżynierskich, jakie stawia przed konstruktorem stworzenie spektroskopu.

Projekt idzie o krok dalej, oferując użytkownikowi aplikację mobilną, umożliwiającą analizę otrzymanego spektrum. Postawiliśmy sobie za cel prostotę użytkowania. Dlatego też algorytm analizy spektralnej działa bez konieczności kalibracji, która w innych oprogramowaniach tego typu jest niezbędna. Opierając się na przestrzeniach barw RGB i HSV, wyprowadziliśmy równania transformujące obraz cyfrowy do względnej intensywności fal z zakresu światła widzialnego. Mimo trudności z jednoznacznym określeniem niektórych długości fali aplikacja jest w stanie dopasować te wartości na podstawie położenia geometrycznego prążków na zdjęciu, wykorzystując informacje o użytej w spektroskopie siatce dyfrakcyjnej.

Ponieważ produkt miałby być przeznaczony dla uczniów i studentów, dużą wagę przyłożyliśmy do projektu interfejsu użytkownika. Korzystając z systemu projektowania Material Design [1] opracowanego przez firmę Google, stworzyliśmy w pełni funkcjonalne i przyjazne użytkownikowi środowisko. Ponadto aplikację wyposażyliśmy w bazę danych widm emisyjnych. Na jej podstawie przewidywane są pierwiastki, z których pochodzi badane widmo promieniowania.

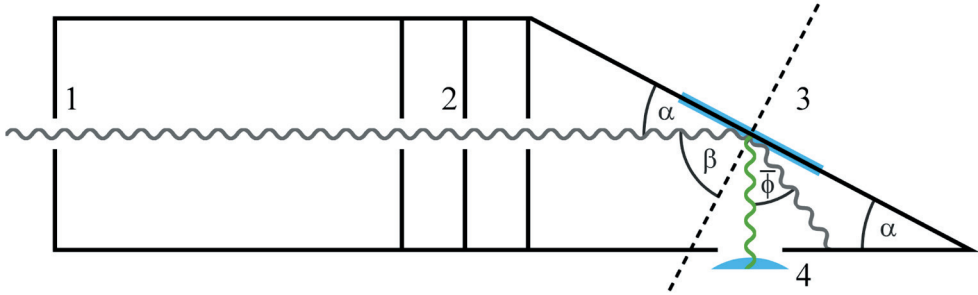
2. Metodyka

2.1. Konstrukcja

Postanowiono, że spektroskop powinien być skonstruowany z tanich oraz łatwo dostępnych materiałów. Idąc za przykładem wielu innych rozwiązań, jako główny budulec wybrano gruby papier, na który nadrukowywany jest wzór wykonany za pomocą programu AutoCAD.

Spektrometr składa się z czterech głównych elementów (rys. 1): szczeliny (1), przez którą wpada światło polichromatyczne do wnętrza spektroskopu, przegród (2),

których zadaniem jest wyeliminowanie rozproszonych promieni światła w celu zminimalizowania wartości tła, siatki dyfrakcyjnej (3) ustawionej pod odpowiednim kątem, na której dochodzi do rozszczepienia światła na poszczególne linie widmowe, oraz otworu (4), na który pada światło odbite.



Rys. 1. Schematyczny rysunek spektroskopu
1 – szczelina, przez którą wpada światło polichromatyczne, 2 – przegrody,
3 – siatka dyfrakcyjna, 4 – detektor

Otwór wyjściowy stanowi miejsce dla detektora rejestrującego powstałe widmo. W najprostszym przypadku detektorem może być ludzkie oko, jednak docelowym rozwiązaniem jest użycie aparatu fotograficznego telefonu do rejestracji spektrum i wykorzystanie aplikacji na smartfona do identyfikacji otrzymanego widma.

Pierwszym i bardzo ważnym parametrem jest rozmiar szczeliny, ponieważ od niej zależy, jak szerokie będą prążki światła monochromatycznego rejestrowanego przez matrycę aparatu.

Szerokość prążków światła monochromatycznego S' padających na matrycę aparatu można obliczyć, korzystając z równania:

$$S' = S \cdot \frac{f}{D - f} \quad (2.1)$$

gdzie:

- S – szerokość szczeliny,
- D – odległość szczeliny od detektora,
- f – ogniskowa aparatu telefonicznego.

Aby wyrazić tę szerokość w pikselach (oznaczoną jako O_{px}), należy uwzględnić czynnik multiplikatywny Px , który określa, ile pikseli znajduje się na szerokości jednego metra:

$$S'_{px} = S \cdot \frac{f}{D - f} \cdot Px \quad (2.2)$$

Najlepszym rozwiązaniem jest, jeśli prążki są możliwie jak najcieńsze, tak aby nie nachodziły na siebie po rozszczepieniu. Pozwala to uzyskiwać zdjęcia łatwe do analizy spektralnej oraz satysfakcjonujące estetycznie dla odbiorcy. Jako że wartości parametrów związanych z aparatem telefonicznym są niezależne od konstrukcji spektroskopu, to jedynym sposobem na zmniejszenie wartości S'_{px} jest wydłużenie jego długości D oraz zmniejszenie szerokości szczeliny S .

Szczelina spektroskopu musi dodatkowo mieć bardzo dobrze zdefiniowany kształt, ponieważ prążki są jej obrazem. Do wykonania tego zadania użyto żyłki, którą należy przeciąć na dwie części, a następnie ułożyć ostrza równoległe do siebie, zachowując niewielką odległość. Można w tym celu posłużyć się kartką papieru, umieszczając ją między ostrzami. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać szerokość szczeliny rzędu kilkuset mikrometrów. Krawędź ostrza żyłki tworzy niemal idealnie prostą powierzchnię, co umożliwi uzyskanie prążków w postaci cienkich, prostych linii. Szczelina nie może jednak być zbyt wąska, aby ilość światła była wystarczająca do uzyskania wyraźnego obrazu. Kiedy światło dostanie się do wnętrza spektroskopu, dociera do siatki dyfrakcyjnej, na której następuje rozszczepienie. Znajomość stałej siatki d pozwala obliczyć, pod jakim kątem będą odbijały się promienie światła rozszczepionego. Konieczne jest, żeby cały obraz światła z zakresu widzialnego (od 400 nm do 700 nm) mieścił się w granicach matrycy aparatu telefonicznego. Dla stałej siatki $d = 1000$ nm obliczono, że długość fali 560 nm znajduje się geometrycznie w równej odległości od początku i końca widma światła widzialnego, dlatego powinna padać prostopadle na aparat. Na potrzeby konstrukcji rozszerzono to założenie również na siatki dyfrakcyjne o stałej 2000 nm i pochodzących z płyt CD oraz DVD (odpowiednio około 1600 nm i 740 nm [2]), nie popełniając przy tym dużego błędu. Można więc obliczyć wartość kąta $\bar{\phi}$ między tą długością fali a rzędem zerowym [3]:

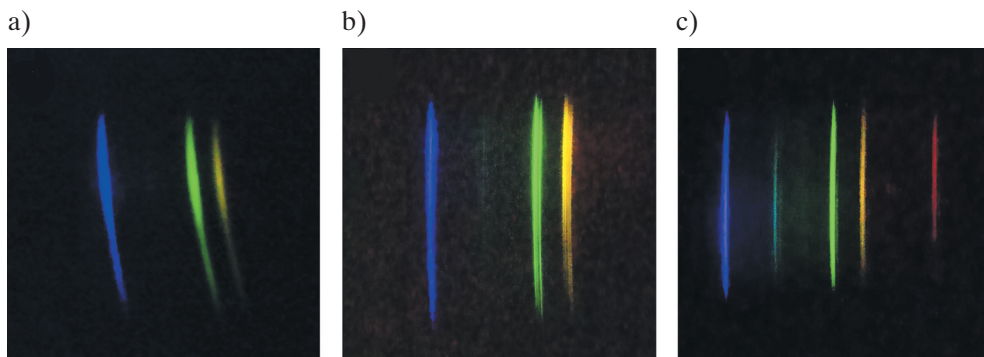
$$\bar{\phi} = \arcsin \left(\frac{560 \text{ nm}}{d [\text{nm}]} \right) \quad (2.3)$$

Korzystając z prostych zależności geometrycznych, można wykazać, że kąt, pod jakim musi być ustawiona siatka dyfrakcyjna α względem płaszczyzny równoległej do matrycy aparatu, wynosi:

$$\alpha = \frac{90^\circ - \bar{\phi}}{2} \quad (2.4)$$

Obliczenia te stanowiły podstawę wzorów konstrukcji dotyczących różnych siatek dyfrakcyjnych. Chociaż zaprezentowane wzory są proste i oczywiste, to ich implementacja w praktyce pozwoliła znacząco poprawić jakość prezentowanego spektroskopu względem innych, popularnych modeli.

W trakcie testowania spektrometru okazało się, że niezbędne jest usunięcie światła rozproszonego, które generowało szkodliwe tło dla obrazu widma. Dążąc do poprawy jakości otrzymywanych obrazów, rozwijano kolejne wersje spektrometru. W tym celu dodano do konstrukcji trzy dodatkowe przesłony przed siatką dyfrakcyjną [4]. Pozwoliły one zmniejszyć wartość tła na zdjęciach zrobionych aparatem telefonu poprzez pułapkowanie promieni najbardziej odstających od głównego toru wiązki oraz ich eliminację wskutek wielokrotnych odbić w przestrzeniach między przesłonami. Największy jednak wzrost jakości uzyskano po zastosowaniu welurowej folii samoprzylepnej. Materiał ten jest tani i łatwo dostępny, a dzięki mikrowłóknom, z których jest wykonany, świetnie pochłania padające na niego światło. Obniżenie wartości tła pozwoliło na obserwowanie słabych linii widmowych, które przed wspomnianymi modyfikacjami miały wartości natężenia porównywalne z zanieczyszczeniem świetlnym i w efekcie pozostawały niewidoczne, co pokazano na rysunku 2.

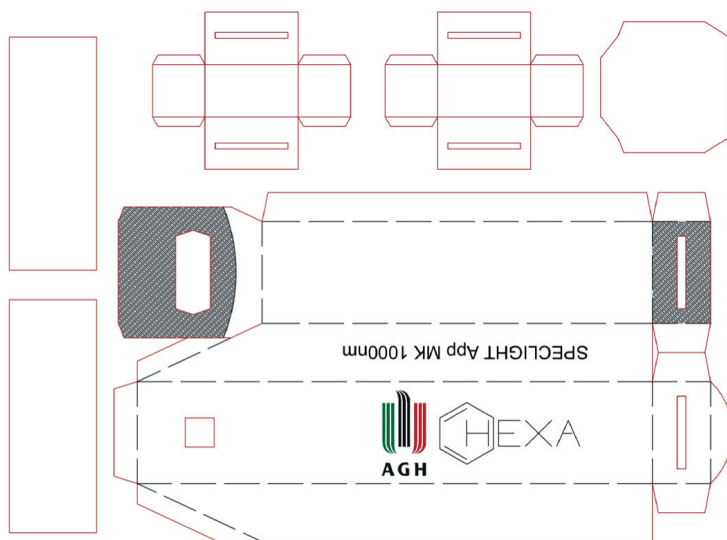


Rys. 2. Zdjęcia widm rtęci pochodzących z rurki Plückera wykonane modelem spektroskopu: a) bez przegród; b) z przegradami; c) z przegradami i folią welurową

2.2. Wykonanie spektroskopu

Podstawowym materiałem do budowy spektroskopu jest kartka sztywnego papieru formatu A4, na którym drukuje się odpowiedni wzór. Wszystkie siatki brył zostały wykonane za pomocą oprogramowania AutoCAD, które zapewniło wysoką precyzję projektowania. Na rysunku 3 zaprezentowano model spektroskopu dla siatki o stałej 1000 nm.

Odległość między szczeliną a detektorem wynosi 16 cm. Ogniskowa wielu aparatów fotograficznych w smartfonach wynosi około 3 mm [4], więc obraz szczeliny o szerokości 200 μm ma szerokość około 3,82 μm na detektorze. Wielkość ta odpowiada w zaokrągleniu 4 pikselom matrycy aparatu.



Rys. 3. Model bryły spektroskopu o siatce dyfrakcyjnej 1000 nm

Po wycięciu wzoru zamalowano ciemnym markerem elementy znajdujące się wewnątrz spektroskopu oraz naklejono folię welurową w części za przegradami (rys. 4a). Szczelina, wykonana z jednej żyłki przeciętej na pół, znajduje się za dodatkową ścianką z papieru (rys. 4b), co zmniejsza ryzyko skałeczenia w trakcie użytkowania oraz zapobiega jej przemieszczeniu na skutek przypadkowego kontaktu.

a)



b)



c)



Rys. 4. Elementy spektroskopu: a) model gotowy do sklejenia, wycięty kwadrat stanowi otwór dla detektora, sześciokątny jest miejscem na siatkę dyfrakcyjną przyklejoną od zewnętrznej strony, za którą znajduje się ścianka; b) widok szczeliny o grubości około 150 μm (obliczone na podstawie zdjęcia przy użyciu programu ImageJ Fiji [5]); c) aparat telefoniczny przyłożony do otworu na detektor

Koszt materiałów potrzebnych do wykonania zaprezentowanego spektroskopu wynosi około 80 zł. Wielkość tej sumy wynika z faktu, że elementów takich jak folia welurowa nie można kupić w małej ilości. Z takiej ilości materiałów można wykonać kilka konstrukcji, więc cena za jedno urządzenie to kilkanaście złotych.

2.3. Aplikacja SpecLight-App

Aplikacja pozwala na zrobienie zdjęcia, jego obrót, przycięcie i skalowanie oraz wybór stałej siatki dyfrakcyjnej użytej do fotografowania. Uzyskane dane są następnie przekazywane do algorytmu przeprowadzającego analizę. Poszczególne fragmenty algorytmu działają asynchronicznie, co zapewnia większą płynność korzystania z aplikacji, a przez to lepsze doświadczenie użytkownika.

Algorytm na wejściu przyjmuje obraz z aparatu w formacie RGB i konwertuje go na format HSV. Ze względu na brak możliwości określenia długości fali światła każdego piksela na podstawie samej jego barwy obliczana jest długość fali tylko dla pikseli z przedziałów na to pozwalających. Te wartości są użyte do ekstrapolacji długości fali na pozostałe piksele. Szczegóły tego procesu zostały opisane w rozdziałach D.1–D.3 dodatku.

Po przeprowadzeniu analizy program tworzy wykres widma dla fali światła z przedziału 400–700 nm na podstawie wartości *Intensity* (λ) (wzór D.3.1) znormalizowanych do 100.

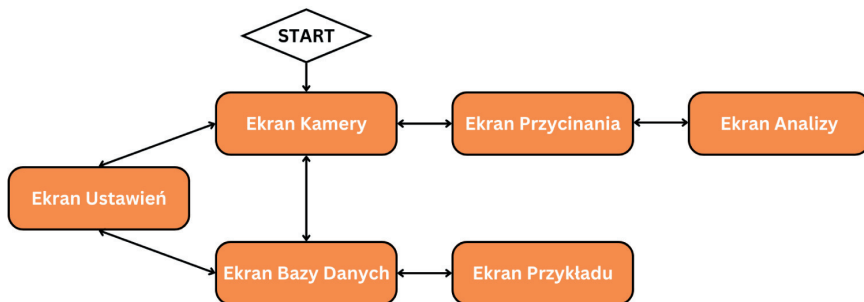
Na podstawie uzyskanych danych odpowiadających wykresowi kalkulowane są pozycje pików spektralnych, które są zaznaczane po obliczeniu. W ostatnim kroku następuje klasyfikacja uzyskanego zestawu pików i przyporządkowanie listy prawdopodobnych pierwiastków.

Program został zaimplementowany w formie aplikacji mobilnej z użyciem frameworka Flutter dla języka Dart.

2.4. Interfejs użytkownika

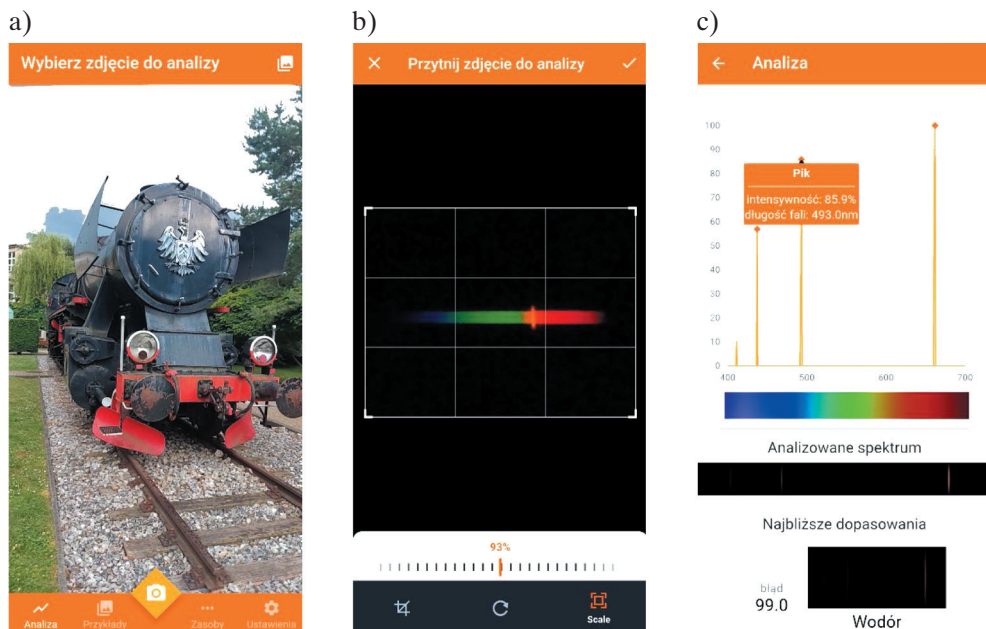
Pierwszym etapem prac było zaprojektowanie w programie Adobe XD prototypu high-fidelity, który ułatwia planowanie i pracę nad interfejsem użytkownika. Po dostosowaniu go do wszystkich założeń wynikających z planowanych funkcjonalności oraz uwzględnieniu wniosków z heurystyk Nielsena¹ prototyp przeniesiono do rzeczywistej aplikacji, wykorzystując UI Toolkit Flutter. Schemat ekranów zaimplementowanych w aplikacji przedstawiono na rysunku 5.

¹ Heurystyki Nielsena to dziesięć podstawowych zasad pozwalających na prawidłowe zaprojektowanie interfejsu pod względem interakcji z użytkownikiem [6].



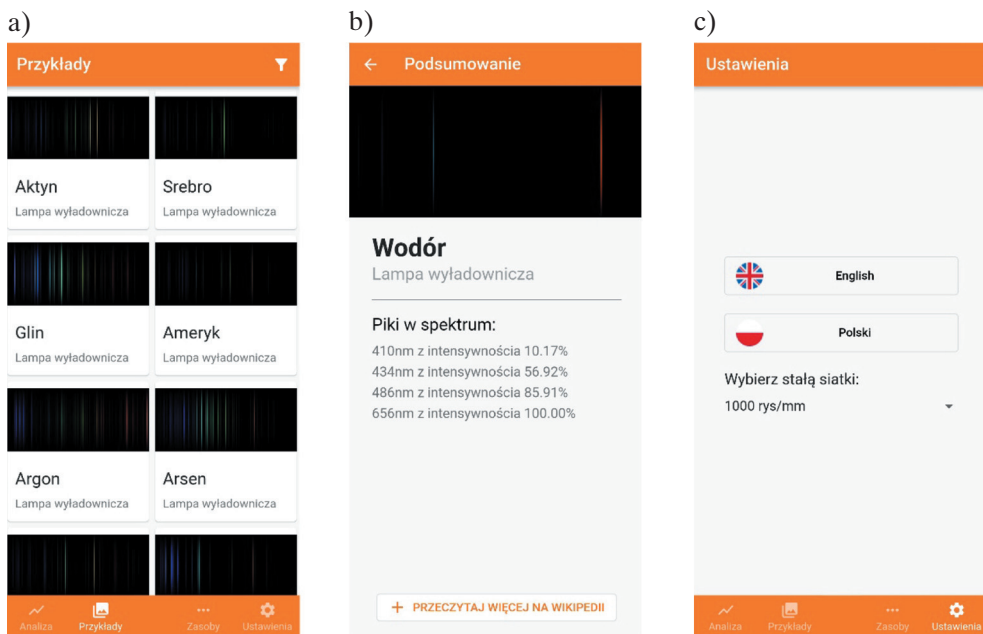
Rys. 5. Schemat nawigacji pomiędzy ekranami w aplikacji

W podstawowej ścieżce interakcji użytkownik wykorzystuje „ekran kamery” (rys. 6a), aby wykonać zdjęcie z kamery telefonu lub wybrać wcześniej wykonane zdjęcie z galerii, co zapewnia elastyczne podejście dostosowane do potrzeb użytkownika. Następnie ładowany jest „ekran przycinania” (rys. 6b), gdzie możliwe jest wykadrowanie lub obrócenie zdjęcia. Ostatecznie otrzymywany jest „ekran analizy” (rys. 6c) z wynikami działań algorytmów w postaci spektrogramu z naniesionymi wykrytymi pikami oraz z podglądem analizowanego spektrum. Na każdy z wykrytych pików można kliknąć, po czym pokazuje się informacja o wykrytej długości fali i jej intensywności. Gdy działanie algorytmu klasyfikacji dobiegnie końca, wyświetlają się również najbliższe dopasowania spektrum.



Rys. 6. Podstawowa droga w aplikacji: a) „ekran kamery” z przykładowym obrazem z aparatu telefonu; b) „ekran przycinania” z przykładowym spektrogramem; c) „ekran analizy” dla spektrum wodoru

Oprócz podstawowej ścieżki dostępne są również dodatkowe ekrany z przydatnymi funkcjonalnościami. „Ekran bazy danych” (rys. 7a) prezentuje wszystkie zgromadzone w bazie spektra w postaci katalogu kart z przyporządkowaną nazwą oraz zdjęciem widma. Po kliknięciu na wybraną z nich aplikacja przenosi nas do „ekranu przykładu” (rys. 7b) z większą ilością informacji o danym spektrum, jak również odnośnikiem do artykułu w Wikipedii w odpowiednim języku. Aplikacja zawiera również „ekran ustawień” (rys. 7c), na którym można zmienić język aplikacji z polskiego na angielski, jak również dostosować parametr siatki dyfrakcyjnej wykorzystywanej w spektroskopie na potrzeby algorytmów.

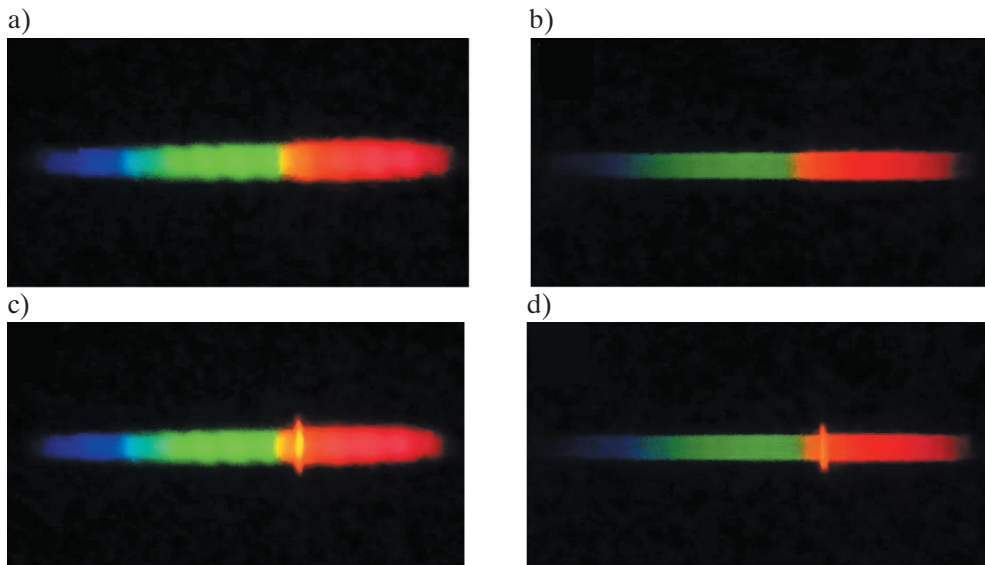


Rys. 7. Dodatkowe ekrany aplikacji:
a) „ekran bazy danych”; b) „ekran przykładu”; c) „ekran ustawień”

3. Wyniki

3.1. Zdjęcia widm uzyskanych papierowym spektroskopem

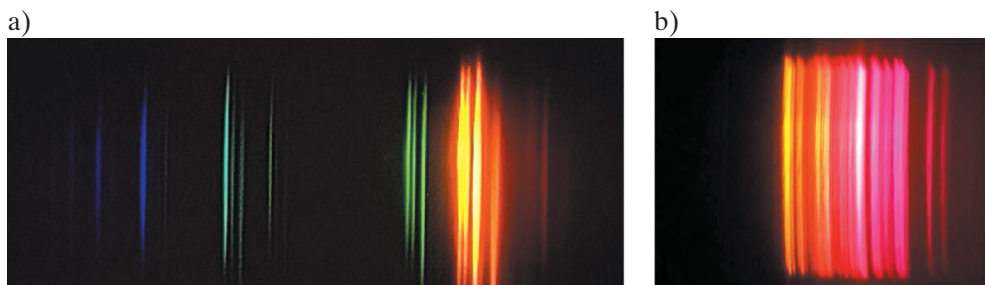
Wszystkie zdjęcia wykonano spektroskopem z siatką dyfrakcyjną 1000 nm oraz szczeliną o szerokości około 150 μm . Na rysunku 8 pokazano eksperyment, w którym posypano płomień świeczki solą kuchenną. W efekcie spalania soli (NaCl) sód emituje światło o charakterystycznej długości fali około 589 nm, które można zobaczyć przy użyciu zaprezentowanej konstrukcji (rys. 8c i d).



Rys. 8. Zdjęcia spektrum światła świeczki wykonane za pomocą opisywanego spektroskopu: a) bez folii welurowej za przegrodami; b) z folią welurową za przegrodami. Zdjęcia spektrum światła świeczki posypywanej solą kuchenną wykonane za pomocą opisywanego spektroskopu: c) bez folii welurowej za przegrodami; d) z folią welurową za przegrodami

Na rysunku 9a pokazano zdjęcie widma sodu domieszkowanego rtęcią pochodzące z lampy spektralnej. Charakterystyczny dublet sodowy (589 nm i 589,6 nm) na zdjęciu zlewa się w centralnej części w jedną, grubą linię, jednak obserwując jej krańce można zobaczyć, że rozdziela się ona na dwie. Występowanie dubletu w rejestrowanym spektrum było obserwowane wielokrotnie w trakcie eksperymentu z lampą sodową, jednak wymagało to cierpliwości i starannego dobrania parametrów aparatu fotograficznego, takich jak np. czas naświetlenia.

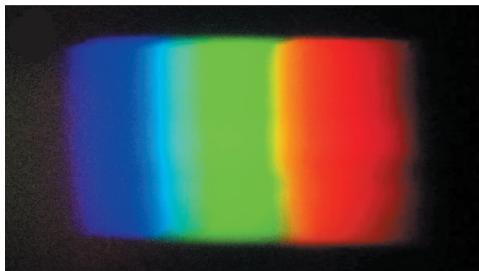
Korzystając z rurki Plücker'a, sfotografowano spektrum neonu (rys. 9b), które składa się z wielu intensywnych i położonych blisko siebie linii, co sprawia, że choć są one widoczne, to ich poświaty znacząco zwiększają wartość tła.



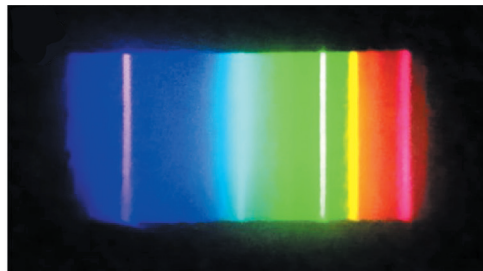
Rys. 9. Zdjęcia widm światła pierwiastków pochodzącego z lampy spektralnej sodu domieszkowanego rtęcią (a) i rurki Plücker'a neonu (b)

Najprostszym eksperymentem do wykonania jest obserwacja widma różnego typu żarówek. Przykładowo żarówki LED dają pełne spektrum światła widzialnego (rys. 10a). Innego rodzaju widmo daje żarówka z dużym udziałem rtęci (rys. 10b), w której spektrum widać silne linie rtęci.

a)



b)



Rys. 10. Zdjęcia widm światła: a) białej żarówki LED; b) żarówki rtęciowej

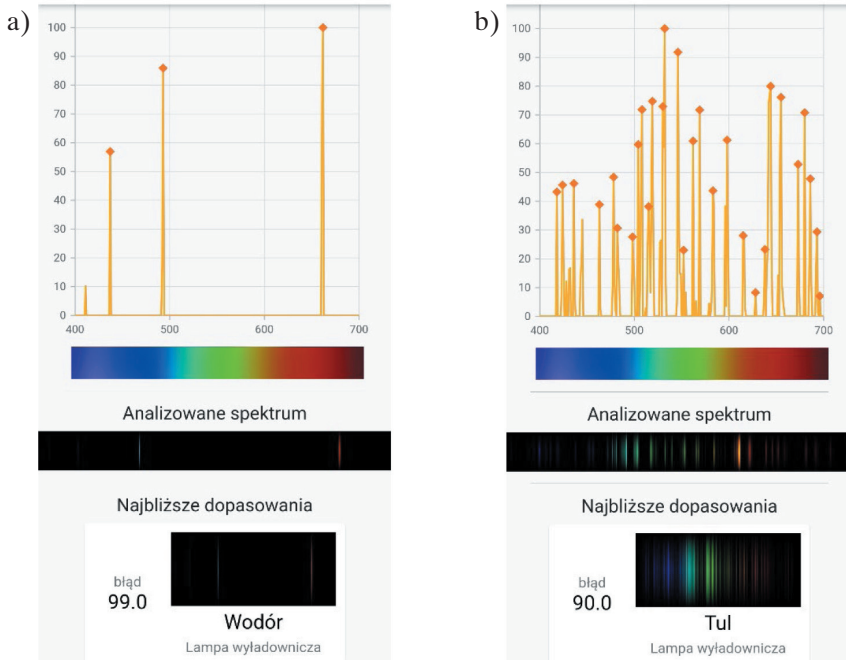
3.2. Detekcja pików na podstawie wykonanych zdjęć

Do porównania uzyskanych wyników z założeniami teoretycznymi wykorzystano miarę Acc_n (dodatek D.4), którą algorytm nadaje najbliższemu przyporządkowaniu oraz teoretycznemu wynikowi. W celu sprawdzenia efektywności algorytmów do określenia długości fal badanego widma wykorzystano wzorcowe dane dla wodoru (rys. 11a) i węgla (rys. 11b). Są one pozbawione takich problemów jak szumy lub niedokładna reprezentacja kolorów przez matrycę aparatu.

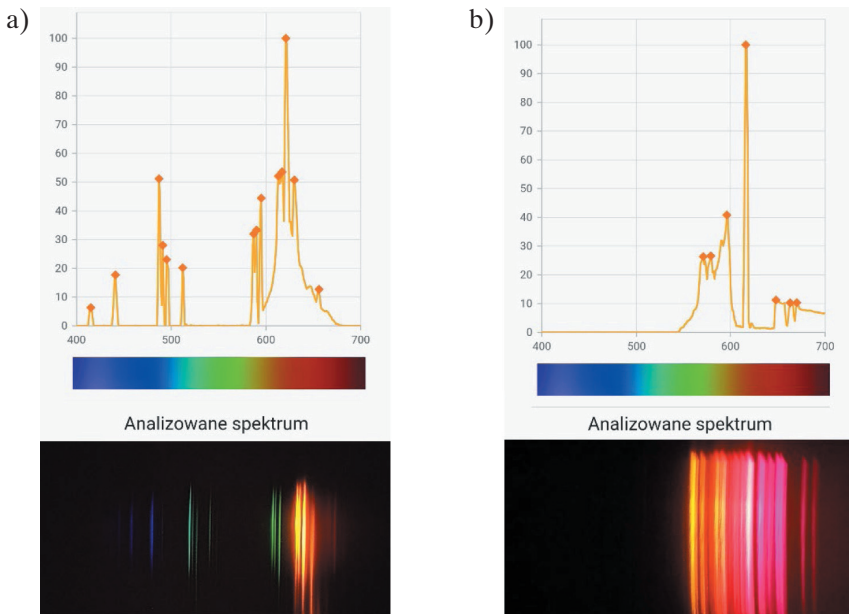
W przypadku serii Balmera uzyskane wyniki są bardzo zbliżone do tych teoretycznych, co ma też odzwierciedlenie w najbliższym dopasowaniu wodoru, z miarą $Acc_n = 99$. Podczas analizy widma emisyjnego węgla najbliższym dopasowaniem okazał się pierwiastek tul z miarą $Acc_n = 90$, ale węgiel uzyskał również wysoki wynik $Acc_n = 87$. Rezultaty te wskazują na to, że algorytm działa bardzo dobrze w przypadku prostych widm z niewielką liczbą prążków, ale gorzej dla tych bardziej skomplikowanych. Widoczne jest również to, że większość znaczących pików jest wykryta i zaznaczona w aplikacji.

Kolejnym etapem była analiza widm pochodzących z rurek Plückerera i lamp spektralnych. Przeanalizowano uzyskane spektroskopem widma sodu (rys. 12a) i neonu (rys. 12b).

W przypadku danych rzeczywistych widoczne jest to, że algorytm wykrywania pików zadziałał prawidłowo we wszystkich znaczących maksimach. Podczas analizy zdjęcia z lampy spektralnej sodu domieszkowanej rtęcią najbliższym dopasowaniem okazał się wapń z wynikiem $Acc_n = 90$, natomiast spodziewany niższy wynik $Acc_n = 79$ uzyskał sód. W przypadku rurki Plückerera neonu zarówno bar, jak i spodziewany neon uzyskały identyczny wynik $Acc_n = 95$, w takim przypadku algorytm klasyfikacji pozwala na zawężenie wyboru widma do tych dwóch pierwiastków.



Rys. 11. Wyniki analizy syntetycznych danych dotyczących:
 a) wodoru; b) węgla pochodzących z bazy Atomic-Spectra.net



Rys. 12. Wyniki analizy zdjęć widm światła pochodzącego: a) z lampy spektralnej sodu domieszkowanego rtęcią; b) rurki Plücker'a neonu

Na zdjęciach wykonanych ze spektroskopem prążki są wykrywane, ale dochodzi do ich przesunięcia w zakresie długości fal, co powoduje propagację błędów w algorytmie klasyfikacji. Jest to widoczne przy porównaniu z analizą danych wzorcowych. Oba algorytmy wymagają usprawnień, aby aplikacja prezentowała dokładne wyniki dla zdjęć wykonanych spektroskopem. Niemniej w obecnej formie jest ona więcej niż wystarczająca dla celów edukacyjnych i amatorskich.

4. Podsumowanie

Spektroskopia bez wątpienia należy do najważniejszych dziedzin współczesnej nauki – zarówno jako technika badawcza, jak i samodzielna dyscyplina. Zaprezentowany projekt stanowi wkład w powszechne zrozumienie tematów związanych z naturą światła, dyfrakcją i analizą widm wśród młodzieży i osób niezwiązanych na co dzień z nauką.

Skonstruowany spektroskop umożliwia obserwację widma światła widzialnego z dużą rozdzielczością. Dzięki niskiej cenie i nieskomplikowanemu procesowi wytwarzania może posłużyć do wykonania eksperymentów szkolnych dla uczniów na każdym etapie edukacji. Jak pokazaliśmy, wokół nas istnieje wiele źródeł światła, które mogą stanowić podstawę do urozmaicenia szkolnych lekcji i lepszego przedstawienia tematu.

W parze z konstrukcją zaprezentowaliśmy aplikację mobilną, która oferuje kompleksowe środowisko do analizy otrzymanych spektrów, obróbki zdjęć oraz bazę danych dla wielu widm pierwiastkowych. Algorytmy zostały przetestowane na danych syntetycznych i rzeczywistych, a analiza spektralna daje zadowalające rezultaty, a problemy napotyka jedynie wtedy, gdy nie jest możliwe wykrycie pikseli granicznych. Aby ułatwić dostęp potencjalnym użytkownikom, planowane jest opublikowanie aplikacji w serwisie Google Play.

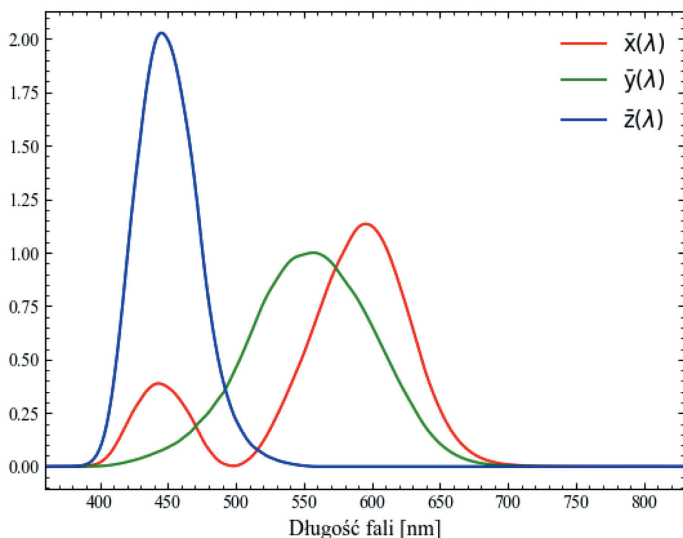
Tani spektroskop w połączeniu z przyjazną użytkownikowi aplikacją mobilną może być bardzo użyteczny w pracy nauczycieli szkolnych i akademickich. Opierając się na własnych doświadczeniach, dostrzegamy mocne strony projektu i widzimy jego przyszłość właśnie w dziedzinie popularyzacji nauki.

Dodatek: Analiza spektrum

Analiza spektrum światła to problem polegający na wyznaczeniu intensywności odbieranych fal elektromagnetycznych dla każdej wartości długości fali z przedziału zainteresowania. Istniejące aplikacje (np. *Theremino_Spectrometer* [7]) działają precyzyjnie, lecz wymagają kalibracji w postaci określenia długości fali przynajmniej dwóch punktów na obrazie. Dodatkowo każda zmiana pozycji detektora względem siatki dyfrakcyjnej skutkuje koniecznością ponownej kalibracji. Zaprezentowany algorytm przeprowadza kalibrację automatycznie, ułatwiając rozpoczęcie analizy oraz pozwalając na nieprzytwierdzanie detektora (aparatu fotograficznego telefonu komórkowego) na stałe do spektroskopu.

D1. Ustalanie przedziałów składowych pikseli pozwalających na wyznaczenie długości fali światła

W celu wyeliminowania konieczności kalibracji algorytmu konieczne jest stworzenie algorytmu, który dokona detekcji długości fali na podstawie samego zdjęcia spektrum. Założenie relacji liniowości między wartością *Hue* pikseli w formacie HSV² i długością fali w pewnym przedziale obu tych wartości jest obarczone zbyt dużym błędem. Z tego powodu posłużono się przestrzenią barw CIEXYZ³ [8] ze względu na możliwość jej uzyskiwania z długości fali światła (rys. D1.1) oraz zdolność do konwersji na przestrzeń RGB⁴, otrzymywaną ze zdjęć zrobionych aparatem telefonu komórkowego.



Rys. D1.1. Trójchromatyczne składowe widmowe przestrzeni barw CIEXYZ

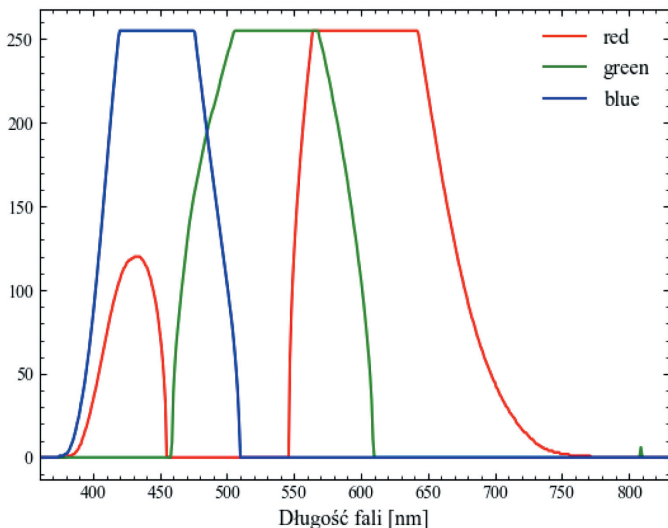
Konwersja z CIEXYZ do RGB powoduje utratę informacji (rys. D1.2). Przedziały, w których tylko jedna składowa RGB ma wartość większą niż zero, są problematyczne ze względu na brak możliwości odróżnienia pikseli o wysokiej intensywności i mniejszej częstotliwości od pikseli o niskiej intensywności i wyższej częstotliwości. Ten problem

² HSV to model przestrzeni barw oparty na sposobie ich postrzegania przez ludzi. Składowa *H* (*Hue*) to odcień światła wyrażony w postaci kąta na kole barw; przyjmuje ona wartości od 0° do 360°. Składowa *S* (*Saturation*) to nasycenie koloru z zakresu [0, 100], a składowa *V* (*Value*) to moc światła z zakresu [0, 100].

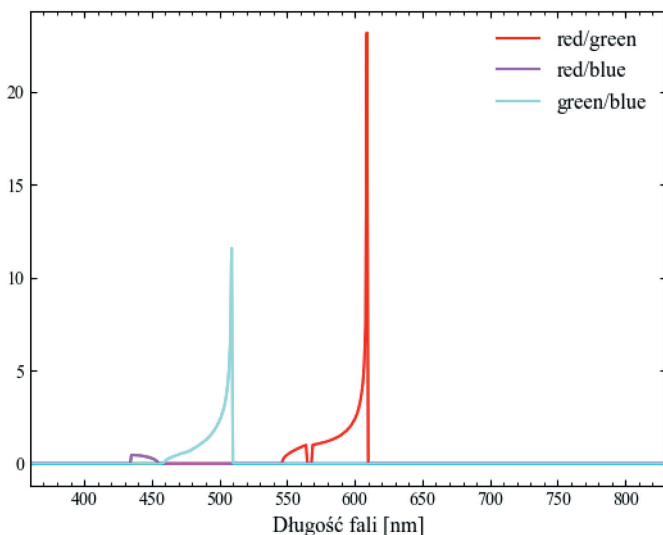
³ CIEXYZ to przestrzeń barw opracowana w 1931 roku przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (*Commission Internationale de l'Éclairage*). Istnieje odwzorowanie pozwalające na otrzymanie barwy z tej przestrzeni na podstawie długości fali światła. To odwzorowanie oraz możliwość konwersji na RGB jest podstawą działania algorytmu analizy.

⁴ RGB to model przestrzeni barw, który opisuje kolory za pomocą składowych: *R* – *red* (czerwony), *G* – *green* (zielony) oraz *B* – *blue* (niebieski).

dotyczy około połowy możliwych długości fali z przedziału 400–700 nm. Dlatego konieczne jest wyznaczenie przedziałów wartości długości fali, dla których stosunki R/G , R/B oraz G/B mają unikalną wartość. Piksele unikalne to takie, których wartość RGB spełnia ten warunek (rys. D1.3).



Rys. D1.2. Trójchromatyczne składowe widmowe po konwersji na format RGB przy użyciu standardowego iluminanta D65, odpowiadającej temperaturze światła białego o wartości 6504 K



Rys. D1.3. Stosunki wartości RGB w przedziałach, w których możliwe jest określenie długości fali piksela. Przedziały, w których stosunki wartości R , G i B nie są unikalowe, zostały wyzerowane

D2. Wyznaczanie długości fali światła odpowiadającej składowym pikselem

Algorytm otrzymuje obraz spektrum w formacie RGB, na którym piksele przedstawiają kolory. Ich wartości długości fali zmieniają się w kierunku horyzontalnym. Następnie wyznacza lewą i prawą granicę spektrum (odpowiednie piksele nazywa się dalej pikselami granicznymi) tworzoną przez pierwsze i ostatnie znalezione piksele unikalne. W celu zniwelowania wpływu szumu na wyniki piksele, których wartości są brane pod uwagę, muszą spełniać następujące warunki:

- składowa *Value* z przestrzeni HSV w granicach [15, 100],
- składowa *Saturation* z przestrzeni HSV w granicach [7, 100].

Algorytm przy wyznaczaniu pikseli granicznych próbuje znaleźć piksele unikalne, które są otoczone przez przynajmniej N pikseli unikalnych z obu stron, oraz piksele graniczne znajdujące się w odległości wynoszącej przynajmniej 40% szerokości obrazu. Jeżeli takie sąsiedztwo nie istnieje, zmniejsza liczbę N o 1 i ponawia próbę, aż nie osiągnie wartości 0. W przypadku osiągnięcia wartości N wynoszącej 0 algorytm przyjmuje domyślne granice spektrum w postaci lewej i prawej krawędzi obrazu wejściowego.

Za znormalizowaną pozycję x_{rel} pikseli granicznych przyjmuje się taką wartość funkcji $f_{x_{rel}}(\lambda)$, że stosunki R/G , R/B oraz G/B dla λ (rys. D1.3) są najbardziej zbliżone do tych stosunków w pikselu. Korzystając z równania na kąt załamania fali elektromagnetycznej na siatce dyfrakcyjnej, otrzymano funkcję opisującą zależność między pozycją prążka światła na detektorze a długością fali, zadaną wzorem:

$$f_x(\lambda) = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_{center}}{d} \right) \right) \cdot l \quad (D2.1)$$

gdzie:

- d – stała siatki dyfrakcyjnej,
- λ_{center} – długość fali, która pada na centrum ekranu dla danego spektroskopu,
- l – odległość ekranu od siatki.

Po normalizacji metodą min-max otrzymuje się funkcję $f_{x_{rel}}(\lambda)$ określającą pozycję widma pierwszego rzędu fali o długości λ na detektorze z przedziału [0, 1]:

$$f_{x_{rel}}(\lambda) = \frac{f_x(\lambda) - \min f_x(\lambda)}{\max f_x(\lambda) - \min f_x(\lambda)} \quad (D2.2)$$

Funkcja $f_{x_{rel}}(\lambda)$ przyjmuje wartość 0,5 dla λ równego λ_{center} .

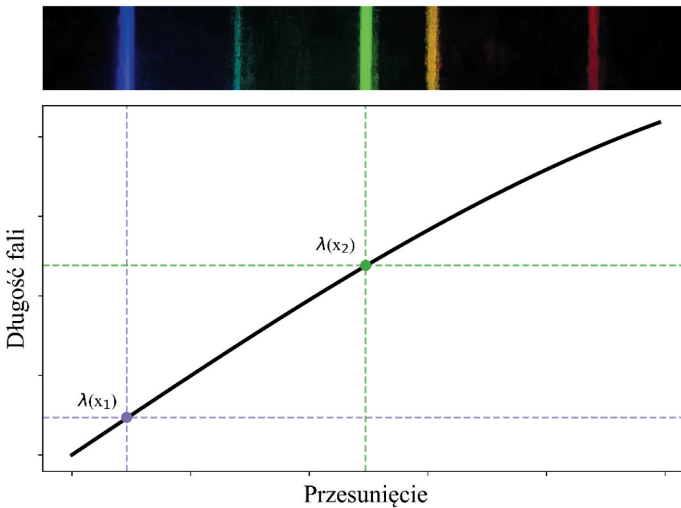
Ze względu na normalizację odległość siatki dyfrakcyjnej od ekranu nie ma znaczenia tak długo, jak znajduje się na nim całe spektrum.

Po wyznaczeniu pikseli granicznych długość fali odpowiadająca pozostałym pikselom jest ustalana przy użyciu funkcji (rys. D2.1):

$$\lambda = f_{x_{rel}}^{-1}(x_{rel}^i) \quad (D2.3)$$

gdzie:

- λ – obliczona długość fali piksela,
- $f_{x_{rel}}$ – funkcja zwracająca znormalizowaną pozycję prążka światła o danej długości fali na spektrum dla wybranej stałej siatki dyfrakcyjnej (D2.3),
- x_{rel}^i – znormalizowana pozycja i -tej kolumny obrazu (przesunięcie) obliczona na podstawie pozycji na obrazie względem pikseli granicznych (rys. D2.1).



Rys. D2.1. Wykryte piksele graniczne i wizualizacja ekstrapolacji długości fali na pozostałe piksele

D3. Analiza spektralna

W celu otrzymania względnej intensywności dla każdej długości fali występującej na obrazie sumowane są wartości pikseli zgodnie ze wzorem:

$$X = \left\{ i : \lambda = f_{x_{rel}}^{-1}(x_{rel}^i) \right\} \quad (D3.1)$$

$$Intensity(\lambda) = \sum_j \sum_{i \in X} \frac{Value(j, i)}{Saturation(j, i)}, Saturation(j, i) \neq 0$$

gdzie:

$Value(j, i)$ i $Saturation(j, i)$ – odpowiednio składowe V i S z formatu HSV piksela znajdującego się w j -tym rzędzie i i -tej kolumnie obrazu,

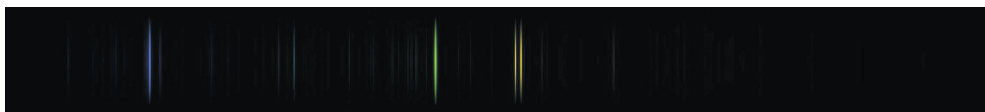
H – liczba rzędów obrazu.

D4. Detekcja pików i klasyfikacja widm

Aplikacja powinna pozwolić na zidentyfikowanie otrzymanego spektrum. W tym celu potrzebna jest analiza numeryczna widma spektroskopowego. Istotnym elementem, na podstawie którego można porównać i sklasyfikować widma emisyjne pierwiastków, są występujące piki, dlatego program powinien zawierać metodę ich detekcji, bazę danych z wartościami dla przykładowych widm oraz algorytm klasyfikujący.

Metoda detekcji pików opiera się na wykrywaniu maksimum lokalnych, które są następnie filtrowane w celu wyeliminowania tych wynikających z szumów. Usuwane są maksima znajdujące się w bliskim otoczeniu innych oraz te o niskim przewyższeniu względem otoczenia, zgodnie z algorytmem zaproponowanym przez firmę MathWorks [9].

W celu znalezienia odniesienia do algorytmu klasyfikacji, jak też ilustracji do aplikacji, porównano publicznie dostępne bazy danych zawierające spektra emisyjne różnych pierwiastków: NIST Atomic Spectra Database [10], Atomic-Spectra.net [11] i Spectra V1.0 [12]. Ostatnią z nich odrzucono ze względu na brak odniesienia do praktycznych różnic w proporcji poszczególnych fragmentów spektrum. Bazę NIST wybrano jako odniesienie teoretyczne ze względu na dużą ilość wiarygodnych danych, a Atomic-Spectra.net jako źródło ilustracji, ponieważ udostępnia ona realistyczne wizualizacje spektrum w domenie publicznej. Przykładowa ilustracja z tej bazy jest przedstawiona na rysunku D4.1.



Rys. D4.1. Przykładowe spektrum emisyjne rtęci z bazy Atomic-Spectra.net

W celu klasyfikacji zaprojektowano algorytm umożliwiający przyporządkowanie wyniku zgodności pomiędzy widmem z bazy a zarejestrowanym, następnie wybierane jest spektrum z najlepszym wynikiem. Dla każdej pary widm następuje przyporządkowanie najbliższych sobie pików, na podstawie minimalizacji odległości Czebyszewa⁵ dla długości fal:

$$d_{ch}(t, r) = \max_i |t_{\lambda_i} - r_{\lambda_i}| \quad (\text{D4.1})$$

gdzie:

- t – pik w bazie,
- r – pik rejestrowany,
- t_{λ} – długość fal w bazie,
- r_{λ} – długość fal rejestrowanych.

⁵ Odległość Czebyszewa – miara odległości między dwoma punktami równa maksymalnej różnicy korespondujących współrzędnych.

Następnie dla każdej pary widm jest liczona sumaryczna odległość euklidesowa pomiędzy przyporządkowanymi pikami, gdzie długość odcinka pomiędzy dwoma pikami jest wyrażona jako:

$$d_e(t, r) = \sqrt{(t_\lambda - r_\lambda)^2 + (t_I - r_I)^2} \quad (\text{D4.2})$$

gdzie:

- t – pik w bazie,
- r – pik rejestrowany,
- t_λ – długość fali w bazie,
- r_λ – długość fali rejestrowanej,
- t_I – intensywność fali w bazie,
- r_I – intensywność fali rejestrowanej.

Ostatecznie wynik jest normalizowany do postaci od zera do stu, gdzie zero to najgorsze, a sto – najlepsze dopasowanie zgodnie ze wzorem:

$$Acc_n = \left(100 - \frac{\min(Acc)}{\max(Acc)} \cdot 100 \right) \quad (\text{D4.3})$$

gdzie:

- Acc – sumaryczne odległości par dla dwóch widm,
- Acc_n – znormalizowany wynik.

Literatura

- [1] Material Design, *Design – Material Design*, <https://m2.material.io/design> [dostęp: 27.06.2024].
- [2] Ling S.J., Sanny J., Moebs W., 2016, *University Physics*, vol. 3, OpenStax, Houston Texas, <https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-introduction> [dostęp: 30.09.2024].
- [3] National Nanotechnology Infrastructure Network, *Using CDs and DVDs as diffraction gratings*, https://www.nnin.org/sites/default/files/files/Karen_Rama_USING_CDs_AND_DVDs_AS_DIFFRACTION_GRATINGS_0.pdf [dostęp: 30.09.2024].
- [4] Woo Y., Ju Y.G., 2019, *Fabrication of a high-resolution smartphone spectrometer for education using a 3D printer*, *Physics Education*, vol. 54, art. 015010, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aaea0e>.
- [5] Fiji ImageJ, <https://imagej.net/software/fiji/> [dostęp: 27.06.2024].
- [6] Nielsen J., 1994, *Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics*, [w:] *CHI '94: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Boston, MA, April 24–28)*, s. 152–158, <https://doi.org/10.1145/191666.191729>.

-
- [7] Theremino, *Theremino Spectrometer Technology*, https://www.theremino.com/wp-content/uploads/files/Theremino_Spectrometer_Te., 1931, *The C.I.E. colorimetric standards and their use*, Transactions of the Optical Society, vol. 33, no. 3, s. 73–134, <https://doi.org/10.1088/1475-4878/33/3/30>.
- [9] MathWorks, *Prominence – MATLAB & Simulink*, <https://ch.mathworks.com/help/signal/ug/prominence.html> [dostęp: 27.06.2024].
- [10] Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., NIST ASD Team, 2023, *NIST Atomic Spectra Database (version 5.11)*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, <https://physics.nist.gov/asd> [dostęp: 27.06.2024].
- [11] Gagnon J., *Atomic-Spectra.net*, <https://atomic-spectra.net/index.php> [dostęp: 27.06.2024].
- [12] Tukcer N., *Spectra V1.0*, <https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27796-spectra-v1-0> [dostęp: 27.06.2024].

Wykorzystanie potencjału energetycznego wód geotermalnych kompleksu jurajskiego w północno-zachodnim rejonie Tarnowa

Jan Adam Soboń¹, Andrzej Bezkorowajny²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków

² A&B Flint Andrzej Bezkorowajny, Konsulting geologiczny i hydrogeologiczny, Brzesko

Streszczenie: Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania potencjału energetycznego wód geotermalnych z kompleksu jurajskiego z uwzględnieniem warunków geologiczno-złożowych kompleksu i parametrów eksploatacyjnych sieci ciepłowniczej z rejonu miasta Tarnowa. Przedstawiono obliczenia dotyczące możliwej do pozyskania energii cieplnej z wody geotermalnej, wykorzystanej w układzie sieci ciepłowniczej skojarzonej z konwencjonalną ciepłownią.

Warunki geologiczno-złożowe omówiono z uwzględnieniem północno-zachodniego rejonu Tarnowa. Potencjał energetyczny zagospodarowanej wody geotermalnej obliczono na podstawie zasobów hydrotermalnych eksploatacyjnych kompleksu jurajskiego oraz warunków temperaturowych istniejącej sieci ciepłowniczej. Został on wyznaczony dla wariantów wydatków eksploatowanej wody geotermalnej oraz temperatury jej schłodzenia w instalacji odbioru ciepła. Parametry temperatury wydobywanej wody ustalono na podstawie wyników pomiarów temperatury w otworach wiertniczych w rejonie Tarnowa. Temperaturę schłodzenia wody geotermalnej określono zarówno dla układu konwencjonalnych wymienników ciepła, jak i przy zastosowaniu pomp ciepła. Ustalono udział energii cieplnej możliwej do pozyskania z wody geotermalnej i porównano go z ilością ciepła z ciepłowni konwencjonalnej o mocy podobnej do pracującej w rozpatrywanym rejonie.

Słowa kluczowe: geotermia, warunki geologiczne, potencjał energetyczny wód geotermalnych, utwory jury w rejonie Tarnowa, zagospodarowanie wody geotermalnej

UTILIZATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF GEOTHERMAL WATERS FROM THE JURASSIC COMPLEX IN THE NORTHWESTERN REGION OF THE CITY OF TARNÓW

Abstract: The article presents the possibility of utilizing the energy potential of geothermal waters from the Jurassic complex, taking into account the geological and deposit conditions of the complex and the operational parameters of the district heating network in the Tarnów area. It includes calculations of the possible thermal energy that can be obtained from geothermal water used in a district heating system combined with a conventional heating plant.

The geological and deposit conditions are presented with a focus on the northwestern part of Tarnów. The energy potential of the extracted geothermal water was calculated based on the hydrothermal resources of the Jurassic complex and the temperature conditions of the existing district heating network. The energy potential was determined for various scenarios of geothermal water extraction rates and temperature parameters of its cooling in the heat recovery system. The temperature parameters of the extracted water were adopted based on temperature measurements in drilling wells in the Tarnów area. The cooling temperature of the geothermal water was assumed for both conventional heat exchangers and the use of heat pumps. The share of thermal energy that can be obtained from geothermal water was determined and compared to the amount of heat from a conventional heating plant of comparable capacity operating in the analyzed area.

Keywords: geothermal energy, geological conditions, energy potential of geothermal waters, Jurassic formations in the Tarnów region, utilization of geothermal water

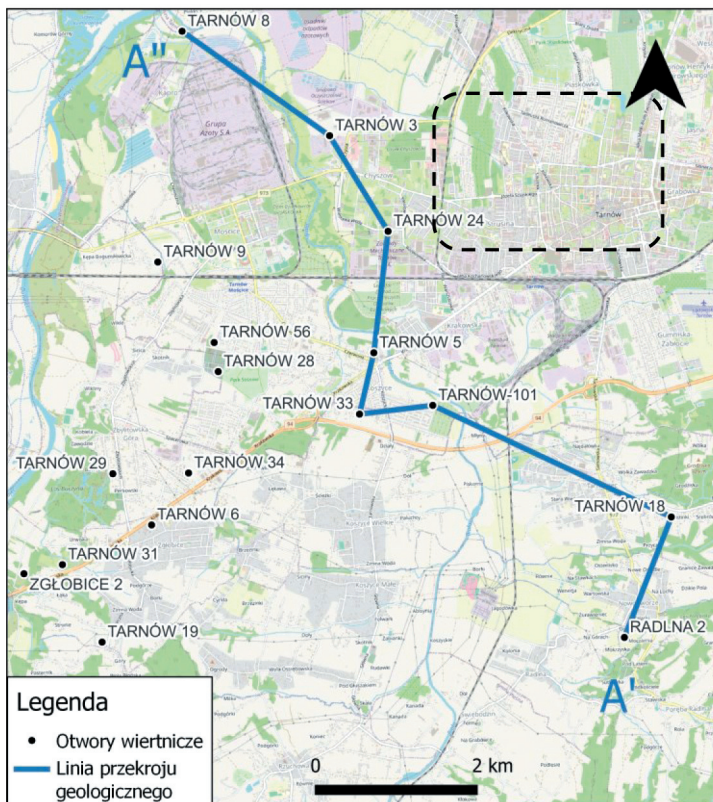
1. Wprowadzenie

Zwiększające się wykorzystanie odnawialnych źródeł energii wynikające ze społecznej świadomości ekologicznej oraz światowej sytuacji surowcowej i gospodarczej przyczynia się do rosnącego zainteresowania wykorzystaniem energii geotermalnej. Energia geotermalna z głębokich formacji geologicznych ze względu na parametry temperaturowe może być wykorzystana jako podstawowe źródło energii cieplnej lub źródło wspomagające konwencjonalne sieci ciepłownicze. Dostarczanie znaczących ilości energii cieplnej do sieci ciepłowniczych przez ciepłownie konwencjonalne od dziesiątek tysięcy do setek tysięcy gigadzuli [GJ] w sezonach grzewczych wymaga zużycia znacznych ilości paliwa kopalnego. Przejście ciepłowni konwencjonalnych na zasilanie źródłami odnawialnymi wymaga oceny potencjału energetycznego wybranych formacji geologicznych, które mogą stanowić potencjalne źródło pozyskania energii cieplnej. Należy przy tym uwzględnić warunki temperaturowe i metodę pozyskania energii cieplnej. W Polsce wykorzystywanym dotychczas źródłem energii cieplnej z formacji geologicznych jest woda geotermalna, która zaliczana do źródła energii hydrotermalnej. Ze względu na zróżnicowaną budowę geologiczną Polski zastosowanie wody geotermalnej jako odnawialnego źródła energii cieplnej wymaga charakteryzowania warunków geologiczno-łożowych formacji geologicznych. Istotne jest określenie temperatury i przewidywanego wydatku eksploatacyjnego wody geotermalnej w celu wyznaczenia potencjalnych zasobów hydrotermalnych. Wyznaczenie głębokości występowania poziomów zbiornikowych jest istotne ze względu na koszty wykonania otworów wiertniczych udostępniających horyzonty zbiornikowe. Ustalenie potencjału energetycznego zbiorników hydrotermalnych w zadanym rejonie nie zawsze tworzy podstawę do kwalifikowania danego rejonu jako miejsca na instalację geotermalną wspomagającą lub zastępującą konwencjonalne źródło energii cieplnej. Możliwość budowy instalacji geotermalnej weryfikują najczęściej obliczenia potencjału energetycznego wody geotermalnej, możliwego do zagospodarowania w konwencjonalnych sieciach ciepłowniczych opartych na parametrach wysokotemperaturowych rzędu 105–115°C w sezonie grzewczym i około 65°C w sezonie letnim. Ilość pierwotnej energii cieplnej uzyskanej z wody geotermalnej ma znaczenie z punktu widzenia analizy ekonomicznej oraz wykorzystania energii pierwotnej źródła odnawialnego. Analiza ekonomiczna oparta na obliczeniach energii cieplnej z wody geotermalnej może wskazywać kierunek zagospodarowania wody geotermalnej lub zakres budowy instalacji geotermalnej, np. na układ kaskadowy. W przedstawianym artykule zaprezentowano lokalizację instalacji geotermalnej w rejonie północno-zachodnim Tarnowa, dla którego scharakteryzowano warunki geologiczne i przeprowadzono obliczenia pozwalające na określenie ilości energii cieplnej możliwej do wykorzystania w sieci ciepłowniczej zasilanej konwencjonalnym

źródłem ciepła. Przedstawiono warianty obliczeniowe dla wydatków przepływu i temperatur dopływu wody geotermalnej do układu odbioru ciepła w odniesieniu do prognozowanych parametrów eksploatacyjnej wody geotermalnej.

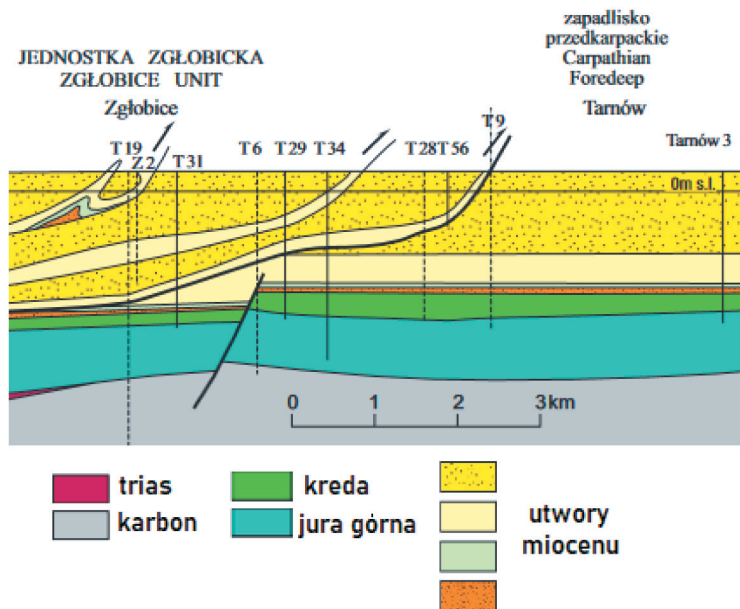
2. Położenie i charakterystyka geologiczna rejonu badań

Geograficznie miasto Tarnów położone jest na Płaskowyżu Tarnowskim należącym do południowego obrzeża Kotliny Sandomierskiej. Zgodnie z podziałem na jednostki fizyczno-geograficzne (Kondracki 2002) zawartym w Centralnej Bazie Danych Geologicznych (CBDG) omawiany teren znajduje się w granicach prowincji Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem Zachodnim i Północnym. Na tle głównych jednostek tektonicznych Polski (Żelaźniewicz i in. 2011) obszar Tarnowa znajduje się częściowo w środkowej części zapadliska przedkarpackiego i częściowo w brzeżnej strefie Karpat zewnętrznych (Oszczypko 2001, 2006).



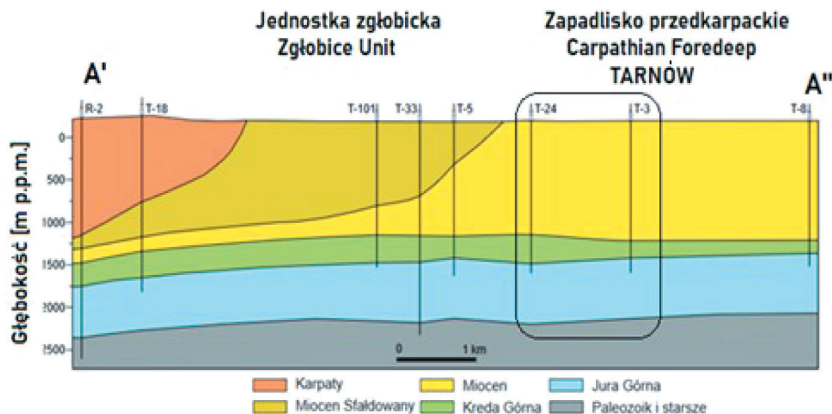
Rys. 1. Miejsce prowadzenia badań na terenie Tarnowa oraz linia przekroju geologicznego A'-A''

W obrębie analizowanego obszaru i w pobliżu rejonu badań (lokalizacji przewidywanego otworu geotermalnego) przechodzi linia nasunięcia karpackiego. Strefa nasunięcia zbudowana jest z utworów miocenu sfałdowanego, w której wyróżnia się jednostkę zgłobicką i występujące w jej obrębie pasmo łusek (rys. 2). Poza linią nasunięcia w kierunku północnym zalegają prawie poziomo utwory miocenu autochtonicznego oraz warstwy jego podłoża (rys. 2 i 3). Podłoże stanowią utwory kredy górnej, pod którymi zalega miąższy kompleks jurajski. Utwory miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego raczej nie stanowią istotnej perspektywy pozyskania energii hydrotermalnej. Na obszarze badań w znacznej części warstwy miocenu autochtonicznego reprezentowane są przez utwory klastyczne zaliczone do formacji skawińskiej (Peryt i Piwocki 2004, Urbaniec i in. 2021). Utwory te budują iłowce i mułowce miejscami częściowo margliste zawierające przewarstwienia piaskowcowe. Niejednorodność wykształcenia litofacjalnego nie stanowi dobrej podstawy do szacowania stabilnych wydatków wydobycia i iniekcji wód wykorzystanych w instalacjach odbioru ciepła.



Rys. 2. Część północna przekroju geologicznego Olszyny–Tarnów
Źródło: Oszczytko (2001)

W rejonie Tarnowa w podłożu utworów miocenu autochtonicznego zalegają utwory górnokredowe (rys. 2 i 3), mające lokalnie korzystne własności zbiornikowe (Heller i Moryc 1984, Górecki 2012). Poniżej występuje kompleks jurajski, który prawie w całości wypełniają utwory górnej jury. Na północ i wschód od Tarnowa lokalnie występują utwory jury środkowej, jednak w analizowanym rejonie w otworach wiertniczych (rys. 2 i 3) nie stwierdzono obecności tej formacji geologicznej.



Rys. 3. Przekrój geologiczny (A'-A'') Radlna 2 – Tarnów 8 i rzut rejonu badań
Źródło: Samojułk i Soboń (2024)

Utwory górnej jury stanowią główny poziom zbiornikowy zapadliska przedkarpackiego, w którym przewidywane są znaczne zasoby hydrotermalne. Istotnego znaczenia nabiera możliwość iniekcji wody po odprowadzeniu z niej ciepła w przypadku eksploatacji z wydatkami umożliwiającymi jej wykorzystanie w celach ciepłowniczych, wynoszącymi 20–100 m³/h. Na podstawie przeprowadzonej analizy warunków geologicznych, hydrogeologicznych i złożowych z materiałów archiwalnych oraz materiałów publikowanych (Gliniak i in. 2004, Górecki 2012, Miziołek i in. 2023) w utworach jury górnej można założyć dobre warunki do wydobywania wody geotermalnej. Zintegrowana analiza badań sejsmicznych z badaniami rdzeni wiertniczych kompleksu jurajskiego na rozpatrywanym obszarze, w aspekcie rozwoju zjawisk krasowych, niewątpliwie zwiększy trafność prognoz dotyczących możliwości iniekcji wykorzystanych wód geotermalnych.

Przeprowadzone opróbowania w otworach wiertniczych i analiza wartości porowatości na obszarze (Miziołek i in. 2023) obejmującym omawiany rejon wskazują na najwyższe porowatości w górnym interwale jury górnej. Podobna sytuacja jest w innych rejonach Karpat, co wiąże się z procesami szczelinowatości i zjawiskami krasowymi (Miziołek i Filar 2019, Miziołek i in. 2022). Występowanie interwałów szczelinowych, przewidywane w omawianym rejonie, znacznie zwiększa możliwości wykorzystania wydobywanej wody geotermalnej zwłaszcza w celach ciepłowniczych, co związane jest z procesem iniekcji wód po odbiorze ciepła.

3. Warunki geologiczno-złożowe piętra górnourajskiego na obrzeżach Tarnowa

Piętro górnourajskie budują utwory węglanowe. W górnej części profilu występują znacznie zróżnicowane litologicznie i facjalnie osady wapienne, dolomityczne i margliste (Peryt i Piwocki 2004, Gutowski i in. 2005, Urbaniec 2021a). Wodonośność tych

skał jest przede wszystkim uzależniona od rozwoju szczelin i kawern. Wapienie skaliste nieulawicone są pocięte szczelinami często pionowymi, a w ulawionych wapieniach skalistych i płytowych sieć spękań pionowych jest uzupełniona wypełnieniami międzylawicowymi, odgrywającymi ważną rolę w kształtowaniu warunków przepływu wody podziemnej w tych skałach. Istotną rolę w przewodzeniu wody podziemnej odgrywają również kanały krasowe. Strefa głębokiego zasięgu krasu wapieni nie jest jednak wystarczająco rozpoznana. Rejon północnej części miasta Tarnowa pod względem wodonośności skał jurajskich jest słabo rozpoznany. W otworach naftowych Zaczarnie 3 i Zaczarnie 6, znajdujących się na wschód (ENE) od Tarnowa, po nawierceniu utworów jury stwierdzono jej zawodnienie (Bujakowski i Barbacki 2016). W utworach jury górnej ze względu na rozwój litologiczny zauważa się trójdzielność. W wyższej części profilu występują skały wapienne, wapienie margliste i margle.

Wapienie zazwyczaj charakteryzuje porowatość w zakresie 3–8% i niska przepuszczalność. Wartość porowatości rzędu 3,2–8,5% uzyskano z formacji przewierconych otworami Radłów 1 i Radłów 4 (Bujakowski i Barbacki 2016). Wapienie i wapienie dolomityczne z otworu Radłów 4 z interwału głębokościowego 1251–1257 m charakteryzują się porowatością rzędu 8–16,3%. W otworze Radłów 1 w wapieniach z głębokości 1233–1246 m stwierdzono porowatość w zakresie 18,7–19,9% i przepuszczalność 6 mD. Podczas opróbowania interwału 1240–1250 m w otworze Radłów 4 uzyskano przyływ solanki o wydajności 0,2 m³/h (Bujakowski i Barbacki 2016). Profil środkowej części jury górnej wykazuje zwiększoną zawartość frakcji ilastej. Słabo związane margle i wapienie margliste wykazują porowatości rzędu 1–7%. Brak przepuszczalności kwalifikuje te osady do grupy skał o bardzo słabych własnościach zbiornikowych. W dolnej części profilu jury górnej występują na ogół związane wapienie, wapienie margliste oraz dolomity (Bujakowski i Barbacki 2016).

W otworze Biadoliny 9 opróbowano dolną część kompleksu górnourajskiego uzyskano jedynie niewielkie przykławy solanki. Korzystniejsze właściwości zbiornikowe mają serie zdolomityzowane stwierdzone w otworze Bobrowniki 1. Na podstawie analiz laboratoryjnych (Bujakowski i Barbacki 2016) stwierdzono porowatość dochodzącą do 14,11% i przepuszczalność do 19,99 mD. Badania wykazały, że węglany (skały węglanowe, osady węglanowe) z głębokości rzędu 1500–1600 m charakteryzują się wysoką porowatością osiągającą wartości do 11,3% oraz przepuszczalnością do 23 mD. Uzyskano dopływy wody złożowej z wydatkiem około 12 m³/h (Bujakowski i Barbacki 2016).

Pod utworami jury górnej w otworach Pawężów 5 i Radłów 1 przewiercono warstwy jury środkowej. W przewierconym profilu przeważają osady piaszczyste o wysokiej porowatości rzędu 13% i dobrej przepuszczalności. W otworze Radłów 1 podczas opróbowania warstw jury środkowej w interwale głębokościowym 1981–2004 m uzyskano przyływ solanki o wydajności 2,5 m³/h (Bujakowski i Barbacki 2016).

Na obszarze przedgórza Karpat duże znaczenie ma obecność budowli organicznych w utworach późnojurajskich. W obiektach tego typu występują bardzo dobre parametry petrofizyczne pozwalające sklasyfikować te utwory jako bardzo dobre skały zbiornikowe o porowatości efektywnej do 25% i przepuszczalności absolutnej do 700 mD (Gliniak i in. 2005).

Zbiornik górnojurajski (rys. 2 i 3) w północnej części Tarnowa charakteryzuje się stosunkowo jednolitą miąższością wynoszącą 450–750 m (rys. 3). Omawiane utwory charakteryzują się zróżnicowanymi parametrami zbiornikowymi (Gliniak i in. 2004, 2005, Gutowski i in. 2007, Bujakowski i Barbacki 2016, Miziołek i in. 2022, 2023):

- przepuszczalność od 2,4 mD do 700 mD,
- porowatość od 1,75% do 25%.

Przeprowadzona analiza parametrów petrofizycznych i przewodnościowych utworów górnojurajskich wskazuje na perspektywę uzyskania przyływu wody geotermalnej o wydajności wystarczającej do jej wykorzystania w celach ciepłowniczych.

W obrębie kompleksu jury górnej przewiduje się występowanie kilku horyzontów wodonośnych. Wydajność wód może się różnić w zależności od porowatości, szczelinowatości i zjawisk krasowych.

Przewiduje się, że temperatury przyływu wód złożowych z utworów węglanowych jury górnej północnej części miasta Tarnowa z interwału 1500–2250 m p.p.m. (rys. 3) według szacowanego stopnia geotermicznego 41–34 m/deg będą w zakresie 44–67°C. Temperatury zmierzone w otworach wiertniczych w rejonie udokumentowanego złoża gazu ziemnego Tarnów (Miziołek i in. 2023) w interwale głębokościowym 1655–1760 m wynosiły 55,85–58, 85°C. W interwale strefy zawadnionej na głębokości 1833 m i 1791,5 m temperatura wynosiła odpowiednio 61°C i 56°C. W otworze Tarnów 31 (T-31) (rys. 1) znajdującym się około 6500 m od analizowanego rejonu stwierdzono na głębokości 1870,6 m temperaturę 54°C. Pomiar temperatury w utworach jury górnej na obszarach przyległych do analizowanego rejonu Tarnowa wykonano m.in. w otworach (Bujakowski i Barbacki 2016):

- Bobrowniki 1: stwierdzono 58°C na głębokości 1900 m,
- Bogumiłowice 4: stwierdzono 55°C na głębokości 1568 m,
- Bogumiłowice 5: stwierdzono 51°C na głębokości 1600 m,
- Łętowice 18: stwierdzono 46°C na głębokości 1600 m,
- Łętowice 19: stwierdzono 56°C na głębokości 1597 m,
- Łętowice 20: stwierdzono 59°C na głębokości 1867 m,
- Wierzchosławice 16: stwierdzono 53°C na głębokości 1647 m,
- Wierzchosławice 16: stwierdzono 59°C na głębokości 1904 m.

Przyjęto interwały głębokościowe zalegania utworów kompleksu jurajskiego w analizowanym rejonie Tarnowa z przekroju A'-A'' (rys. 3) odpowiednio dla otworów:

- Tarnów 24 (T-24) strop nawiercony 1683 m p.p.m., spąg około 2200 m p.p.m.,
- Tarnów 3 (T-3) strop nawiercony 1613 m p.p.m., spąg około 2100 m p.p.m.

Z uwagi na proces zatłaczania wykorzystanych (schłodzonych) wód geotermalnych i wyznaczenie parametrów gęstości i lepkości wody należy określić przewidywaną mineralizację i skład chemiczny. W rozpatrywanym rejonie (rys. 3) brak jest otworów wiertniczych i określenie mineralizacji i charakteru hydrochemicznego wód z poziomu hydrotermalnego jury górnej przewiduje się na podstawie rejonów przyległych, w których pobrano próby wody z otworów wiertniczych. Mineralizacja wód złożowych z otworów na złożu gazu Tarnów (jura) wynosi średnio $104,8 \text{ g/dm}^3$. Mineralizacja ogólna wód złożowych z utworów górnej jury jest bardzo zmienna (Bujakowski i Barbacki 2016, Miziołek i in. 2023) i wynosi od $83,7$ do $222,35 \text{ g/dm}^3$ w części obszaru na północny zachód od Tarnowa, a ich gęstość zawiera się w przedziale $1,06\text{--}1,20 \text{ g/l}$. Mineralizacja w utworach jurajskich w zakresie ww. rozpatrywanych otworów (Bujakowski i Barbacki 2016) jest zróżnicowana w przedziale $86,43\text{--}172,53 \text{ g/dm}^3$ i nie wykazuje znaczącego trendu wzrostu wraz z głębokością. Typ genetyczny wód według klasyfikacji Sulina jest jednolity: chlorkowo-wapniowy (Bujakowski i Barbacki 2016).

W składzie chemicznym wody z otworów rejonu złoża gazu ziemnego Tarnów (jura) największe wartości koncentracji jonów stwierdzono (Miziołek i in. 2023): dla jonu chlorkowego Cl^- ($59,86 \text{ g/dm}^3$) i Na^+ ($36,05 \text{ g/dm}^3$), następnie: Ca^{2+} ($3,35 \text{ g/dm}^3$), SO_4^{2-} ($1,87 \text{ g/dm}^3$), HCO_3^- ($1,16 \text{ g/dm}^3$), Fe^{3+} ($0,3 \text{ g/dm}^3$), Br ($0,12 \text{ g/dm}^3$), jony SiO_2^- i I^- odnotowują wartości poniżej $0,1 \text{ g/dm}^3$.

4. Przewidywane ciśnienia złożowe, kierunki przepływu, wydajności i temperatura wody geotermalnej

Przedstawione dane wskazują, że najważniejsze zasoby hydrotermalne w charakteryzowanym rejonie są związane głównie z utworami górnej jury, co pozwala na prognozowanie warunków ciśnieniowych w najbardziej korzystnej strefie.

Ciśnienie złożowe w rejonie Tarnowa mierzone w otworze Pogórska Wola 15 osiągnęło wartość 26 MPa , natomiast zakres zmian ciśnienia w utworach górnej jury wynosi $15,19\text{--}32,89 \text{ MPa}$ (Miziołek i in. 2023). W rozpatrywanym rejonie przewidywane jest występowanie gradientu ciśnienia złożowego w pobliżu górnej granicy ciśnienia normalnego lub nieco podwyższonego. Zasilanie i kierunki przepływów są związane z wychodniami jury. Generalnie przyjmuje się, że zasilanie i odpływ występują na wychodniach w obrębie Jury Krakowsko-Częstochowskiej i na obrzeżu Gór Świętokrzyskich, czyli kierunki przepływu w utworach jury w omawianym terenie zawierają się pomiędzy kierunkami WN i N.

W rozpatrywanym rejonie zależnie od parametrów przewodnościowych oraz głębokości położenia horyzontu wodonośnego przewidywane są następujące wartości wydajności i temperatury wody geotermalnej:

- jura górna:
 - wydajność od 20 do ponad 100 m³/h,
 - temperatura w zakresie 49–65°C;
- jura środkowa:
 - wydajność w zakresie 20–60 m³/h,
 - temperatura 50–65°C;
- połączone horyzonty:
 - wydajność rzędu 40–100 m³/h,
 - temperatura 50–65°C.

5. Potencjał energetyczny wody geotermalnej

Potencjał energetyczny wody geotermalnej wyznaczono na podstawie energii cieplnej strumienia wody geotermalnej w zadanym przedziale czasu przy uwzględnieniu jej mineralizacji:

$$E = \dot{m} \cdot C_{ws.w.f(T_{sr})} \cdot (T_z - T_w) \cdot \theta \quad (1)$$

gdzie:

- E – energia cieplna strumienia wody geotermalnej [J],
- \dot{m} – strumień masy wody geotermalnej [kg/s],
- $C_{ws.w.f(T_{sr})}$ – ciepło właściwe wody geotermalnej przy $(T_z + T_w)/2$,
- θ – czas przepływu [s].

Moc strumienia:

$$P = \frac{E}{\theta} \quad (2)$$

gdzie P – moc strumienia cieplnego [W].

Moc cieplna instalacji odbioru ciepła z wody geotermalnej o temperaturze 50°C i wydatku przepływu 60 m³/h oraz mineralizacji 105 g/l, wydobywanej z poziomów zbiornikowych jury górnej, przy schłodzeniu do 11°C (tj. średnia temperatura wód powierzchniowych) może osiągnąć wartość 2,91 MW, a przy odbiorze ciepła powodującego schłodzenie wód geotermalnych do poziomu 25°C byłaby to moc 1,85 MW. Potencjał energetyczny eksploatowanej wody geotermalnej obliczono na podstawie parametrów

złożowych prognozowanych w północno-zachodnim rejonie miasta Tarnowa. Przeprowadzona analiza parametrów zbiornikowych, miąższości oraz zasobów hydrotermalnych eksploatacyjnych dla utworów jurajskich (Górecki 2012) pozwala na prognozowanie wydajności przyływu wody geotermalnej do 100 m³/h. Uzyskanie dużych wydajności eksploatacyjnych wymaga zastosowania odpowiedniej konstrukcji otworu przy długich interwałach dopływu oraz systemu eksploatacji dostosowanego do warunków ciśnieniowych (Soboń 2020). W przypadku kompleksu górnej jury lub jury górnej i środkowej łączna miąższość udostępnionych warstw o korzystanych parametrach zbiornikowych może osiągać wartość ponad 250 m.

Analizowano wydajności eksploatacyjne oraz temperatury wypływu wody geotermalnej w otworze wiertniczym w analizowanym rejonie i przeprowadzono obliczenia w układzie dwóch wariantów temperaturowych i trzech natężeń wypływu. Prognoza parametrów eksploatacyjnych została odniesiona do warunków powierzchniowych. Analizowano przypadki od wariantu, gdy temperatura wypływu wody geotermalnej z otworu wynosi 60°C i wydatek wypływu 60 m³/h, do wariantu, gdy temperatura wypływu wody geotermalnej wynosi 45°C i wydatek wypływu 20 m³/h. Przeprowadzono również obliczenia dla temperatury wód 50°C i 60°C i natężenia wypływu 100 m³/h, które odnoszą się do przewidywanego udostępnienia do eksploatacji kompleksu jury górnej o znacznej miąższości i korzystnych własnościach zbiornikowych.

Tabela 1

Energia cieplna z wody geotermalnej w sezonie letnim
i udział w całkowitej ilości ciepła dostarczanego do sieci ciepłowniczej

Sezon letni, m-ce VI–IX (4 m-ce = 122 doby)								
Wariant	Q wody geotermalnej	T_1	T_2	T_3	$\rho_{w.geot.}(M = 105 \text{ g/dm}^3)$	$C_{w.geot.}$	$E_{geot.}$	$\%E_{geot.}$
[-]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[J/(kg·deg)]	[GJ]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
w-I	100	49	22	26,7	1066,78	4220	35 193	38,2
w-Ia	100	59	25	33	1061,69	4267	43 772	47,5
w-II	60	49	22	26,7	1066,78	4220	21 116	22,9
w-IIa	60	59	25	33	1061,69	4267	26 263	28,5
w-III	20	49	22	26,7	1066,78	4220	7038	7,6
w-IIIa	20	59	25	33	1061,69	4267	8754	9,5
w-IV	100	44	19	24,8	1069,27	4206	32 657	35,4
w-V	60	44	19	24,8	1069,27	4206	19 594	21,3
w-VI	20	44	19	24,8	1069,27	4206	6531	7,1

Tabela 2

Energia cieplna z wody geotermalnej w sezonie grzewczym
i udział w całkowitej ilości ciepła dostarczanego do sieci ciepłowniczej

Sezon grzewczy, m-ce X–V (8 m-cy = 243 doby)								
Wariant	Q wody geotermal.	T_1	T_2	T_3	$\rho_{w.geot.}(M = 105 \text{ g/dm}^3)$	$C_{w.geot.}$	$E_{geot.}$	$\%E_{geot.}$
[-]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[J/(kg·deg)]	[GJ]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
w-I	100	49	40	8,9	1066,78	4220	23 366	2,8
w-Ia	100	59	40	18,6	1061,69	4263	49 095	5,9
w-II	60	49	40	8,9	1066,78	4220	14 019	1,7
w-IIa	60	59	40	18,6	1061,69	4263	29 457	3,5
w-III	20	49	40	8,9	1066,78	4220	4 673	0,6
w-IIIa	20	59	40	18,6	1061,69	4263	9 819	1,2

Objaśnienia:

- Q – natężenie przepływu,
 $T_z = T_1$ – temperatura wody geotermalnej na dopływie do wymiennika,
 $T_w = T_2$ – temperatura wody geotermalnej na wypływie z wymiennika,
 $T_3 = (T_1 - T_2) - T_{str.wym.}$ – temperatura obliczeniowa,
 $T_{str.wym.}$ – straty na wymienniku ciepła,
 $C_{wsf}(T_{gr}) = C_{w.geot.}$ – ciepło właściwe wody geotermalnej przy $(T_1 + T_2)/2$ (Raźniewicz 1964),
 $\rho_{w.geot.}$ – gęstość wody geotermalnej przy $(T_1 + T_2)/2$ i mineralizacji 105 [g/dm³],
 $E_{geot.}$ – energia cieplna z wody geotermalnej,
 $\%E_{geot.}$ – udział procentowy energii geotermalnej w energii cieplnej dostarczanej do sieci ciepłowniczej.

Pozyskanie energii cieplnej z wód geotermalnych, tj. czystej energii geotermalnej, przeprowadzono w odniesieniu do układu technologicznego przy zastosowaniu wymienników ciepła i pomp ciepła. Założono, że ciepłownia, w której będzie zagospodarowywane ciepło wód geotermalnych w okresie letnim, dostarcza do sieci ciepłowniczej wodę o temperaturze 65–70°C, natomiast temperatura wody powrotnej wynosi 43°C. W okresie zimowym temperatura wody dostarczanej do sieci ciepłowniczej wynosi 110–115°C, a temperatura wody powrotnej z układu sieci ciepłowniczej 63°C.

Rozpatrywano warianty temperaturowe dolnego źródła i przewidywane wydatki eksploatacyjnej wody geotermalnej. Pomiędzy otworem wydobywczym a ciepłownią założono obniżenie temperatury wody geotermalnej o $\Delta T = 1^\circ\text{C}$. Całkowita produkcja ciepła uzyskiwana z zastosowanych pomp ciepła jest wyższa zazwyczaj w zakresie 20–30% (Eco-Prisus 2023) przy uwzględnieniu dostarczanej energii elektrycznej oraz zależy od parametrów pracy pompy ciepła. Zbilansowanie całkowitej produkcji energii cieplnej uzyskanej z pomp ciepła będzie możliwe po wyznaczeniu współczynników

COP (*Coefficient of Performance*), oznaczającego stosunek ilości dostarczonego ciepła do ilości energii elektrycznej zużytej przez pompę, i SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*), będącego wskaźnikiem efektywności określającym stosunek ilości ciepła wyprodukowanego w danym sezonie grzewczym do pobranej w tym czasie energii elektrycznej. Wyznaczenie współczynników do pomp ciepła dobranych do parametrów wód geotermalnych uzyskanych z wykonanego otworu pozwoli na powiększenie uzyskiwanego efektu energetycznego o dostarczoną energię, a w przypadku zastosowania zasilania solarne zostanie powiększony bilans energii ze źródeł odnawialnych.

6. Dyskusja

Analiza warunków geologicznych, hydrogeologicznych i parametrów złożowych została oparta na wynikach badań z otworów wiertniczych z rejonów przyległych, jednak z uwagi na stosunkowo niezaburzoną tektonikę analizowanego rejonu, co przedstawiono na rysunkach 2 i 3, można wnioskować na temat warunków występowania wód geotermalnych w analizowanym rejonie. Sprawą dyskusyjną jest występowanie jury środkowej, w której stwierdzono lokalnie korzystne warunki zbiornikowe. Przeprowadzona analiza obejmuje możliwość nawiercenia tych utworów. Charakterystyka wykształcenia litologicznego utworów jury środkowej w formie serii piaszczystych może stwarzać korzystne warunki do eksploatacji wody geotermalnej. Osiągnięcie większych wydajności eksploatacyjnych raczej nie jest możliwe ze względu na nieduże miąższości tych utworów. Nawiercenie utworów jury środkowej i stwierdzenie korzystnych warunków hydrotermalnych stwarza możliwość eksploatacji z horyzontów zbiornikowych środkowej i górnej jury. Podobnie jest w przypadku utworów kredy i ewentualnej eksploatacji wody z tych utworów. Ze względu na znaczną miąższość kompleksu górnej jury oraz możliwość występowania zawodnionych horyzontów o dużych miąższościach w kilku interwałach głębokościowych, kompleks górnej jury jest brany pod uwagę jako miejsce utworzenia głównego zbiornika hydrotermalnego.

Wykorzystanie potencjału cieplnego wody geotermalnej oparto na obliczeniach ilości ciepła możliwego do uzyskania ze strumienia wodnego. Ilość pozyskiwanego ciepła zależy od temperatury wody dopływającej do układu odbioru ciepła i przewidywanej temperatury schłodzenia, tj. temperatury wody wypływającej z układu odbioru ciepła. Ze względu na wyższą temperaturę wody dostarczanej z ciepłowni do sieci ciepłowniczej w porównaniu z temperaturą eksploatowanej wody geotermalnej wymagane jest zastosowanie pomp ciepła.

Ilość pozyskanego ciepła odnosi się do temperatury schłodzenia wody geotermalnej w pompie ciepła, przy czym efektywnie będzie to nieco wyższa wartość w wyniku uwzględnienia współczynników COP i SCOP. Dodatkowy wzrost ilości pozyskanego

ciepła można osiągnąć przez budowę kaskadowego układu odbioru ciepła, co umożliwia lepsze wykorzystanie dostępnego potencjału energetycznego.

7. Wnioski

- Analiza warunków geologicznych, hydrogeologicznych i złożowych pozwala wnioskować, że w północno-zachodniej części miasta Tarnowa, w utworach jury górnej istnieją korzystne warunki geologiczno-złożowe dla wydobycia wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych.
- Przewidywane parametry zbiornikowe w obrębie kompleksu jurajskiego oraz jego miąższość stwarzają możliwość uzyskania wydajności przyływu wody geotermalnej do 100 m³/h. Uzyskanie takiego wydatku pozwala na zagospodarowanie wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych i zwiększa udział energii geotermalnej w bilansie dostarczanej energii cieplnej do sieci ciepłowniczej w zakresie 38,2–47,5% w okresie letnim i 2,8–5,9% w okresie zimowym, co dość znacząco podkreśla udział energii odnawialnej w bilansie energetycznym ciepłowni dostarczającej energię cieplną.
- Optymalnym okresem zagospodarowania energii geotermalnej jest czteromiesięczny sezon letni (od czerwca do września), gdzie praca pomp ciepła w znacznym stopniu może pokryć zapotrzebowanie na energię cieplną. Energia elektryczna dostarczana z paneli fotowoltaicznych może ograniczyć koszty zasilania pomp ciepła i koszty iniekcji wody, co dodatkowo zwiększa udział energii odnawialnej w bilansie energetycznym.
- Zmniejszenie wydatku dopływu wody geotermalnej ze 100 m³/h do 60 m³/h, czyli o 40% skutkuje zmniejszeniem procentowego udziału zagospodarowanej energii geotermalnej w okresie letnim o 40% przy temperaturze wody geotermalnej 59°C i również o 40% przy temperaturze wody geotermalnej 49°C, podobna analogia występuje w okresie zimowym. Obliczone wielkości produkcji ciepła i wyznaczone wskaźniki procentowe pozwalają na ocenę ekonomiczną pozyskania energii cieplnej z wydobywanej wody geotermalnej i na wyznaczenie kosztów energii cieplnej dostarczanej do sieci ciepłowniczej.



Literatura

- Bujakowski W., Barbacki A., 2016, *Triasowy zbiornik wód termalnych w północnej strefie Tarnowa – parametry hydrogeotermalne i perspektywy wykorzystania*, Zeszyty Naukowe. IGSMiE PAN, nr 92.
- Eco-Prius, 2023, *Przemysłowe pompy ciepła*, <https://ecoprius.pl/pl/przemyslowne-pompy-ciepła.html> [dostęp: 15.10.2024].

- Gliniak P., Gutowski J., Urbaniec A., 2005, *Budowle organiczne w utworach górnej jury przedgórze Karpat – aktualny stan rozpoznania na podstawie interpretacji materiałów sejsmicznych i wiertniczych w kontekście poszukiwań złóż węglowodorów*, Tomy Jurajskie, t. 3, s. 29–43.
- Gliniak P., Laskowicz R., Urbaniec A., Lesniak G., Such P., 2004, *The facies development and reservoir properties in Late Jurassic carbonate sediments in the central Carpathian foreland*, [w:] R. Swennen, F. Roure, J.W. Granath (eds.), *Deformation, Fluid Flow, and Reservoir Appraisal in Foreland Fold and Thrust Belts*, AAPG Hedberg Series, s. 347–355.
- Górecki W. (red.), 2012, *Atlas geotermalny Zapadliska Przedkarpackiego*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków.
- Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek I., Świetlik B., Gliniak P., 2007, *Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, t. 426, s. 1–26.
- Heller I., Moryc W., 1984, *Stratygrafia utworów kredy górnej przedgórze Karpat*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, t. 346, s. 63–108.
- Kondracki J., 2002, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Miziołek M., Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., Bartoń R., Filar B., Moska A., Kwilosz T., 2023, *Potencjał geotermalny utworów węglanowych górnej jury w rejonie Tarnowa*, Nafta-Gaz, nr 5, s. 300–315, <https://doi.org/10.18668/NG.2023.05.0>.
- Miziołek M., Filar B., 2019, *Paleokras w utworach górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego i jego znaczenie złożowe*, Nafta-Gaz, nr 75(6), s. 330–343.
- Miziołek M., Filipowska-Jeziorek K., Urbaniec A., Filar B., Łaba-Biel A., 2022, *Możliwości identyfikacji stref rozwoju paleokrasu w rejonach złóż węglowodorów z obszaru przedgórze Karpat*, Nafta-Gaz, nr 7, s. 485–502, <http://dx.doi.org/10.18668/NG.2022.07.01>.
- Oszczypko N., 2001, *Rozwój zapadliska przedkarpackiego w miocenie*, Przegląd Geologiczny, t. 49, nr 8, s. 717–723.
- Oszczypko N., 2006, *Powstanie i rozwój polskiej części zapadliska przedkarpackiego*, Przegląd Geologiczny, vol. 54, nr 6, s. 396–403.
- Peryt M., Piwocki M., 2004, *Budowa geologiczna Polski*, t. 1: *Stratygrafia*, cz. 3a: *Kenozooid, paleogen i neogen*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Raźniewicz K., 1964, *Tablice cieplne z wykresami*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Samojłuk J., Soboń J., 2024, *Przekrój geologiczny (A'-A'') Radlna 2 – Tarnów 8 i rzut rejonu lokalizacji otworu [źródło własne]*.

- Soboń J.A., 2020, *Geological hydrogeological and technological conditions of the use of production-injection systems in the Lower Jurassic (Liassic) reservoir horizons of the Polish Lowland*, [w:] Wróbel M., Jewiarz M., Szlęk A. (eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer Proceedings in Energy*, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_60 [materiały konferencyjne].
- Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., Bartoń R., Wilk A., 2021, *Charakterystyka serii zlepieńcowo-olistostromowej z obszaru paleodoliny Szczurowej-Wojnicza na podstawie interpretacji obrazu sejsmicznego*, *Nafta-Gaz*, nr 11, s. 709–724, <http://dx.doi.org/10.18668/NG.2021.11.01>.
- Urbaniec A., 2021a, *Charakterystyka litofacyjna utworów jury górnej i kredy dolnej w rejonie Dąbrowa Tarnowska – Dębica w oparciu o interpretacje danych sejsmicznych i otworowych*, *Prace Naukowe INiG-PIB*, nr 232, <https://doi.org/10.18668/PN2021.232>.
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczytko N., Ślącza A., Żaba J., Żytko K., 2011, *Regionalizacja tektoniczna Polski*, Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław.

Features of drilling and improving the quality of well cementing in conditions of abnormally low reservoir pressures

Yevhen Stavychnyi¹ , Yaroslav Femiak²,
Oleg Vytyaz² , Jan Ziaja³ 

¹ Public Joint Stock Company Ukrnafta, Ukraine

² Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine

³ AGH University of Krakow, Faculty of Drilling, Oil and Gas, Poland

Abstract: An overview and actuality of oil and gas production are provided. The article reviews the mining and geological features of the Verkhnyomaslovske field of PJSC “Ukrnafta”. It is established that this field belongs to the category of fields with hard-to-recover hydrocarbon reserves. It is shown that the main complication in well drilling is the absorption of drilling mud. Attention is focused on the tasks and implemented solutions for well production casing. It has been established that the lack of necessary and inconsistency plugging materials to cementing conditions causes absorption of the grouting mortar, resulting in defects in the work and the need for additional time and financial costs to eliminate them. At the same time, it is difficult to estimate the extremely negative impact of grouting mortar absorption on the filtration and capacitance characteristics of the formation. The main parameters of the grouting mortar that caused its absorption are analysed. A new lightweight plugging material with a cement batter density of 1.25 g/cm³ was developed. The main parameters of the grouting mortar and stone based on the developed plugging material were investigated and tested in accordance with the thermobaric and technological conditions of cementing a typical well of the Verkhnyomaslovske field. The obtained results of research make it possible to improve the quality of casing support under abnormally low reservoir pressures (ALRP) conditions at the Verkhnyomaslovske field, as well as, in the future, at other fields with related mining and geological conditions.

Keywords: field, well, grouting mud, casing, cement stone

PARAMETRY WIERCENIA I POPRAWA JAKOŚCI CEMENTOWANIA OTWORÓW NAFTOWYCH W WARUNKACH ANORMALNIE NISKICH CIŚNIEŃ ZŁOŻOWYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono przegląd i aktualny stan produkcji ropy naftowej i gazu ziemnego na świecie. Omówiono cechy wiertniczo-geologiczne pola naftowego Wierchniomasłowieckiego ze względu na eksploatację. Wykazano, że główną komplikacją podczas wiercenia otworu jest ucieczka płuczki wiertniczej. Stwierdzono, że brak niezbędnych materiałów tamujących ucieczki płuczki oraz niedopasowanie tych materiałów do warunków cementowania powoduje dalsze komplikacje i awarie wiertnicze. Pociąga to za sobą konieczność poświęcenia dodatkowego czasu i kosztów finansowych na ich usunięcie. Jednocześnie trudno oszacować skrajnie negatywny wpływ kolmatacji strefy złożowej na zmianę współczynnika filtracji, a w konsekwencji na wielkość wydobywania. Analizie poddano główne parametry osadu filtracyjnego, które spowodowały jego osadzanie się na ścianie otworu. Opracowano nowy, lekki zaczyn cementowy o gęstości wynoszącej 1,25 g/cm³ możliwy do zastosowania jako dodatek tamponujący do płuczek wiertniczych. Zbadano i przetestowano go pod kątem tworzenia nieprzepuszczalnego osadu filtracyjnego i kamienia cementowego w warunkach ciśnienia i temperatury typowych dla otworów na złożu Wierchniomasłowieckim. Uzyskane wyniki badań pozwalają na poprawę jakości uszczelnienia otworów w warunkach anormalnie niskich ciśnień złożowych na złożu Wierchniomasłowieckim, a w przyszłości na innych złożach o podobnych warunkach złożowo-geologicznych.

Słowa kluczowe: złożo ropne, skała zbiornikowa, otwór wiertniczy, płuczka wiertnicza, kamień cementowy

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7_9

1. Introduction

Despite the priorities of the transition to green energy, oil and gas remain an extremely important component of the energy market on a global scale.

Long-term and active hydrocarbon production has caused the transition of a significant number of oil and gas fields to the final stage of development. As a result, hydrocarbon production in such conditions requires a review of the technological processes used at all stages of the well life cycle.

The results of research by scientists of PJSC “Ukrnafta” (Ukraine) confirm that the part of fields with hard-to-recover reserves in this company is about 70% (Doroshenko 2013). More than 72% of oil reserves and 10–15% of natural gas reserves are considered to be hard-to-recover. In addition, 45% of gas fields have initial recoverable reserves of less than 1 billion m³, 88% of oil fields have reserves of less than 1 million tons and are classified as ‘very small’ (Karpenko 2015).

However, fields with hard-to-recover reserves are a significant reserve and potential for increasing own hydrocarbon production. Thus, in 2023, PJSC “Ukrnafta”, as the largest oil producer, produced 1.41 million tons of oil with condensate and 1.09 billion m³ of gas of natural and oil. Accordingly, oil production increased by 3% and gas production by 6% (<https://biz.nv.ua...>).

In 2023, JSC “Ukrgasvydobuvannya” (Ukraine) produced more than 13.9 billion m³ of gross natural gas, up 5% year-on-year (almost 13.23 billion m³). In total, Ukraine produced over 18.7 billion m³ of gross natural gas in 2023. Compared to the previous year, gas production increased by 0.9% – from 18.54 billion m³ to 18.7 billion m³. Private companies, on the contrary, reduced natural gas production by almost 14% to 3.7 billion m³ in 2023. The decline in gas production by private companies is due to both difficulties in selling gas on the domestic market amid weak demand and a ban on gas exports, and the suspension of some special permits (primarily “Ukrnaftoburynnya” and Smart Energy) (Kosatka).

It should be noted that currently about 20% of the fields account for 80% of hydrocarbon production, and the remaining 80% account for only 20% of hydrocarbon production (Doroshenko et al. 2013).

2. Statement of the research problem

PJSC “Ukrnafta”, as the largest oil company in Ukraine, holds licences for oil and gas production at 85 fields. Among them is the Verkhnyomaslovet'ske oil field, which discovered in 2001 and located in Lviv region, about 10 km southeast of Boryslav. At the moment, this field is classified as a hard-to-recover field due to the degree of depletion of initial recoverable oil reserves in menilite deposits, which is about 97% (much

more 80%) and the presence of low-permeability formations where hydrocarbon reserves are located (less than 0.05 km^2 for oil). In such conditions, the main risks that may arise both at the design stage of well and during construction and subsequent exploitation must be analysed.

In tectonic terms, the field is confined to two structural and tectonic units: the Skiba Zone and the Intermediate Layer. The Skiba Zone within the field is represented by the Pivdenno-Popelska and Popelska scales of the Oriv Skiba; the Intermediate Layer is represented by the Verkhnyomaslovska and Pivdenno-Maslovska anticlines.

Geomorphologically, the Verkhnyomaslovske field located in the Outer Carpathians, in around of lowland relief of the regional ridges and the Upper Dniester Beskydy. To the south-west, the field borders on the Carpathian ranges, so the elevation of this part of the field reaches 800–900 m above sea level. In the north-east, the elevation above sea level is 500–600 m.

The oil and gas content and prospects of the field were associated with the Popelska scale and Verkhnyomaslovska fold deposits. The Verkhnyomaslovska fold of the Intermediate Layer and the Oriv Skiba divided into individual blocks Boryslav, Pomiaraki and Ivanykivka by transverse tectonic faults. Within the Boryslav block, there are western, central, and eastern sections, which, in turn, divided into smaller elements – areas. The spatial location of the tectonic faults of the Oriv Skiba coincides in plan with the position of the Intermediate Layer faults.

Development of the menilite deposits began in 2002 by the drilling of exploration well 1-Verkhnyomaslovska, and of the Stryi deposits by the drilling of reconstituted well 25-Novoskhidnytsya.

It should be noted that the Verkhnyomaslovske oil field is partially located within the eastern part of the third zone of the sanitary protection district of the Skhidnytsia mineral water deposit of the Naftusia type. The construction of the project wells within the third zone of the sanitary protection district of the Skhidnytsia health resort is possible subject to compliance with the requirements of the relevant articles of the Law of Ukraine 'On Resorts'. In addition, the territory of Verkhnyomaslovske field includes a part of the territory of Skole Beskydy National Nature Park (Monchak 2005, Senyushkovych 2020). The conditions of work in an environmentally sensitive region require detailed planning of the entire process and implementation of highly efficient technological solutions at all stages of well construction as an engineering structure, including during their completion.

As a rule, in recent times, given the complex landscape in mountainous terrain, wells at the Verkhnyomaslovske field have been constructed with a J-shaped profile (Fig. 1). As an example, a typical well was constructed with a design bottom hole depth of MD – 1244 m (TVD – 1102 m) and taking into account the mining and geological conditions and the opening of the target horizons, the actual bottom hole was MD – 1235 m (TVD – 1082 m). The maximum zenith angle was 35° with a total reach of 460 m.

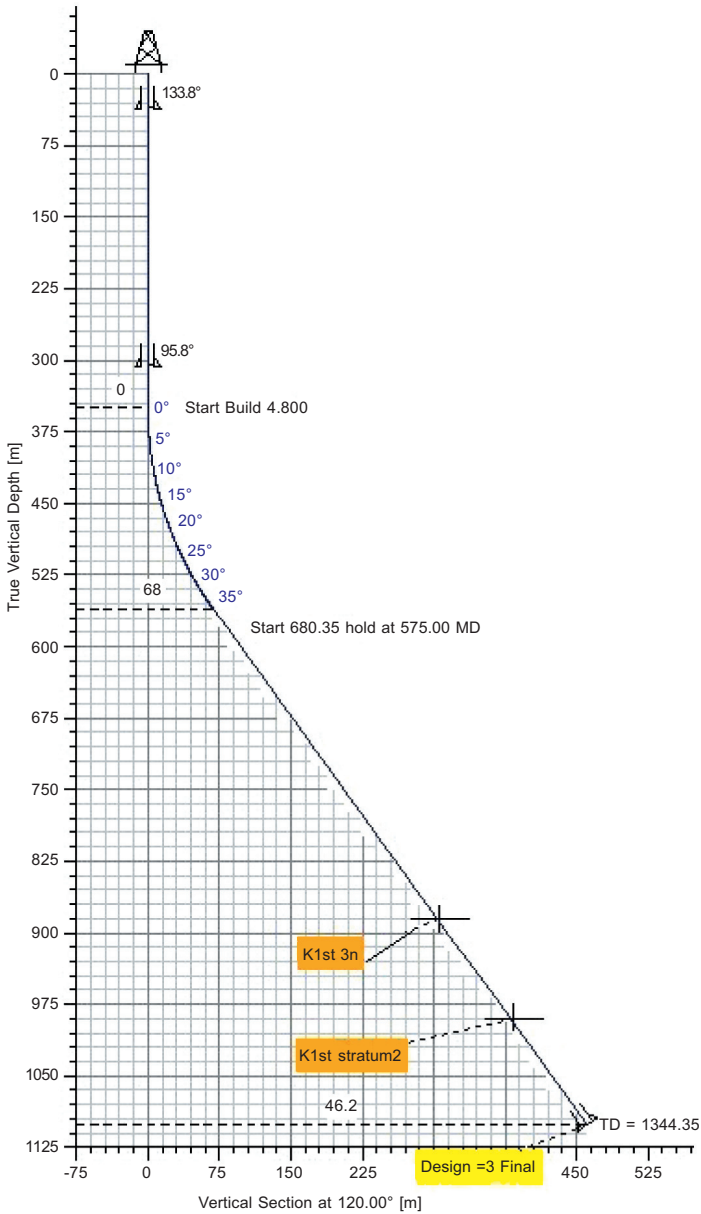


Fig. 1. Profile of well No. B Verkhnyomaslovetzka

The difficult geological conditions of well construction in fields with hard-to-recover reserves require innovative approaches to all technological processes at the well, including the well casing. For example, in the Verkhnyomaslovetzka oil field conditions, where the reservoir pressure of the menilite horizons was about 50 atm at a depth

of 1250 m, the repression on the productive horizons during drilling exceeded the reservoir pressure by 170% and during cementing by 220%. The reservoir pressure of the productive horizons of the Stryi deposits at the Verkhnyomaslovetske field is in the range of 40–45 atm.

The porosity of the Stryi deposits ranges from 9.5% to 13.5%. At the same time, permeability is characterised by a range of 1.98–9.45 mD. Repressions during drilling and cementing have a negative impact on the filtration and capacitance parameters of formation and lead to a decrease in the potential well production rate. The absorptions that occurred during drilling were eliminated by saturating the drilling mud with anti-absorption fillers.

At the well No. A Verkhnyomaslovetska, during drilling from a depth of 936 m to the bottom hole (1250 m), as well as during the logging, the drilling mud absorption was observed in the total volume of 99.5 m³. During flushing before cementing, the well absorbed another 14.5 m³. During the cementing of the production casing diameter 177.8 mm, the grouting mortar was also absorbed.

At well No. B Verkhnyomaslovetska, the absorption started at a depth of 973 m and was observed throughout the entire period of opening the productive section. The total volume of absorption during the drilling period was 62.5 m³. During the pre-cementing flushing, the well absorbed another 17 m³, and during the cementing of the production casing diameter 177.8 mm, an additional 11 m³ of grouting mortar was absorbed.

For cementing production casings for wells No. A and No. B Verkhnyomaslovetska, a backfill for low and normal temperatures with reduced water loss of the PCT-50 PV type was used. A buffer slurry based on a dry buffer mixture of type AB to separate the process fluids was used. The results of the research are shown in Table 1.

At the first stage of research (experiments 1–2), the basic formulations of TR and BS were used as a basis. During the research (experiments 3–5), the formulations of mud with the concentration of the retardant reagent NTFK equal for both portions of the TR and buffer slurry (0.455 kg/m³ of mixing water) were tested. During the tests, significant time frame of the beginning and end of the setting of the grouting mortar were noted, and therefore further research were carried out without the retardant reagent (experiments 6–8).

According to the results of research, it was found that the plugging material PCT-50 PV used in the formulation of the grouting mortar slurry lead is characterised by reduced strength characteristics. Thus, at a water-cement ratio of $W/C = 0.51$, the bending strength at the age of cement stone of 1 day at a temperature of 18°C for the forming of sample beams is 0.4 MPa, which is insufficient to ensure the required quality of casing support. Despite the absence of the retarder reagent NTFK in the formulations, the beginning and end setting times were 9-00 / 11-00 hour-min for the grouting mortar slurry tail and 15-00 / 17-00 hour-min for the slurry lead.

Table 1
Results of research the formulations of grouting mortars for cementing of the production casing diameter 177.8 mm of well No. A Verkhnyomaslovetzka in the interval 1250–0 m

Experiment number	Type cement	Formulation of grouting mortar, mass share					Density of grouting mortar [g/cm ³]	Flowability of grouting mortar [mm]	Research conditions		Time of setting, hour-min		Thickening time, hour-min	Strength of stone in bending after 24 h [MPa]	Mass fraction of additive per 1 m ³ [kg]
		quantity of cement	additive		water				temperature [°C]	pressure [MPa]	beginning	end			
			name	quantity	density [g/cm ³]	pH	quantity								
1	PCT-50 PV slurry lead	100	NTFK	0,015	1.0	7.5	51	250	22	0.1	-	-	1.4	0.294	
2	PCT-50 PV slurry tail	100	NTFK	0.03	1.0	7.5	42	250	32	0.1	-	-	3.2	0.714	
3	PCT-50 PV slurry lead	100	NTFK defoamer	0.023 0.116	1.0	7.5	51	250	32	23.0/ 0.1	15 – 00 ⁽¹⁾	17 – 00 ⁽¹⁾	2.4 ⁽¹⁾	0.455 2.27	
4	PCT-50 PV slurry tail	100	NTFK defoamer	0.02 0,1	1.0	7.5	44	250	32	23.0/ 0.1	10 – 55	12 – 10	4.0	0.455 2.27	
5	AB	100	NTFK XNT FL-CH	0.058 0.300 ⁽²⁾ 0.300 ⁽²⁾	1.0	7.5	128	250	20	0.1	-	-	-	0.455	
6	PCT-50 PV slurry tail	100	defoamer	0.1	1.0	6.6	44	250	32	0.1	9 – 00	11 – 00	3.5	2.27	
7	PCT-50 PV slurry lead	100	defoamer	0.116	1.0	6.6	51	250	32	32/0.1	15 – 20	17 – 50	0.4 ⁽³⁾	2.27	
8	AB	100	XNT FL-CH	0.30 ⁽²⁾ 0.30 ⁽²⁾	1.0	6.6	128	250	20	0.1	-	-	-	-	

⁽¹⁾ Cement stone forming conditions – first 6 hours at $t = 22^{\circ}\text{C}$, next 18 hours at $t = 32^{\circ}\text{C}$

⁽²⁾ The chemical reagent content into the amount of dry mixture to be introduced during the preparation of the buffer slurry (at the rate of 3.0 kg of reagent per 1 Mg of dry mixture)

⁽³⁾ At the temperature of forming of cement stone samples of 18–19°C for 24 hours

This indicator is significantly overestimated and adversely affects the quality of casing cementing in the cementing interval, reliable separation of productive formations and can lead to the forming of cement stone with increased permeability, reduced strength and corrosion resistance characteristics, as well as worsens the quality of cement stone adhesion to the casing, and can contribute, in some cases, to the appearance of flows and migration of reservoir fluids into overlying formations.

Researches on the compatibility of the grouting mortar and buffer slurry was conducted, which established their incompatibility in the contact zone – a decrease in flowability, deterioration of structural homogeneity, accompanied by the release of filtrate from the mixed solution, especially in a volume ratio of 1 : 9. However, after conditioning the mud using the LMR-1 device (stirring time 3 min at a speed of 1500 rpm), the fluidity was 210 mm along the AzNDI cone. At the same time, it should be noted that the use of incompatible technological mud is undesirable, as it carries risks associated with increased hydrodynamic losses during pumping of mud in the annulus, deterioration of filtration characteristics of mud in the mixing zone and contributes to a negative impact on the reservoir properties of the productive formation, increases the risks associated with loss of mud mobility in the intervals of formations with increased permeability.

Based on the results of the absorption of the grouting mortar in wells No. A and No. B Verkhnyomaslovetska were repaired and insulated with counter cementing. For example, in well No. B, due to the absence of cement stone in the interval from 0 to 608 m, we injected 17 Mg of PCT 50–100 grouting mortar in a volume of 12.5 m³ with a cement density of 1.80 g/cm³. Such works entail additional time and financial costs and may also have a negative impact on the filtration and capacitive characteristics of the formations.

3. Forming of the article objectives

Ensuring fast well construction can be achieved by implementing advanced technological solutions. At the same time, a prerequisite for high-quality well cementing in complicated mining and geological conditions of formations with ALRP is the use of sedimentation-stable plugging systems with reduced grouting mortar density and accelerated structure formation kinetics, which form cement stone with the required physical and mechanical properties.

The purpose of the article is to evaluate the implemented technological solutions for drilling and cementing wells under ALRP conditions and to design, research and justify the need use the special plugging materials.

4. Results of the research

In the period from 2005 to 2020, eight wells were drilled at the Verkhnyomaslovske field within the central section of the Boryslav block, and two wells were drilled as horizontal wells. From 2021 to the first half of 2024, an additional nine wells were drilled at the Verkhnyomaslovske field.

The typical well design (design horizon K_{2st} , zenith angle about 35°) involves a directional casing diameter 339.7 mm to a depth of 36 m, a conductor diameter 244.5 mm to a depth of 306 m and a production casing diameter 177.8 mm to a depth of approximately 1250 m (TVD – 1100 m). In case of penetration of the menilite horizon P_{3ml} , the well design envisages running a production string diameter 177.8 mm to a depth of approximately 1550 m (TVD – 1400 m). Additional exploration of well No. 105 on the Yamna deposits (P_{1jm}) is provided by casing with a production string diameter 177.8 mm (TD – 1553 m) and a production liner diameter 127 mm (TD – 1497–2067 m).

The analysis of the main technical and economic indicators of well drilling at the Verkhnyomaslovske field was carried out (Tab. 2). The wells of this field were considered. The interval of drilling wells in the approximate range of the productive thickness of 800–1455 m (considering the opening of the horizons of the Stryi and menilite deposits) was taken as a basis.

Please note that well No. 103 Verkhnyomaslovska (design horizon P_{3ml} Boryslav sandstone) was drilled in 2021, where the reservoir pressure of the project horizon was lower, approximately two times lower than the reservoir pressures for wells No. 1 and No. 10, and compared to well No. 21, which was put into production in 2012, the reservoir pressure of the horizon P_{3ml} Boryslav sandstone for well No. 103 was only 56% of the initial one. This decrease in reservoir pressure put additional requirements on PJSC “Ukrnafta” to select and optimize drilling and completion processes. A clay-free biopolymer type of drilling mud GLYDRIL was used, which ensures shielding of the low-pressure formation without adversely affecting the filtration and capacitive parameters (permeability recovery factor was 96%). Clay-free biopolymer drilling muds are being used in other wells.

Also, to minimize the impact of repressive processes on the formation with ALRP associated with the trip round, modern BHA and highly efficient rock destruction tools were used. Wells No. 1, 10, 21, 31 were drilled by drilling departments. Wells No. 102, 103, 104 have already been drilled using individual services. All wells are directional, based on a depth of 1101m and drilling with bits without coring. Modern bits and screw motors have already been used at wells No. 10, 21, 31.

As you can see, the implementation of effective technological solutions during the construction of wells at the Verkhnyomaslovske field has shown the possibility of increasing the rate of penetration from 3.9 to 6.6 times.

Table 2
Analysis of well construction at the Verkhnyomaslovetske field

Parameters	Wells				
	1	10	21	31	103
Year of well drilling	2001	2011	2012	2012	2021
Time of drilling mud impact on the formation [days]	58	46	44	45	20
Number of deepening flights	14	21	18	21	7
Number of core trip	10	9	3	4	2+ARFT
Total core sampling interval [m]	55	44	15	17	15
Drilling mud type	–	–	clay mud polymer-potassium		clayless
Core permeability recovery factor	–	27	–	75	96
Project horizon	P ₃ ml	P ₃ ml, Kliva, Boryslav sandstone	P ₃ ml Boryslav sandstone	P ₃ ml Kliva	P ₃ ml Boryslav sandstone
Reservoir pressure at the time of put on production [MPa]	10.84	9.00	8.92	7.80	4.90
Flow rate at the time of put on production [Mg]	5.0	10.40	9.09	9.73	28.78
Reservoir pressure 2021/2022 [MPa]	–	5.50	5.51	4.34	4.90

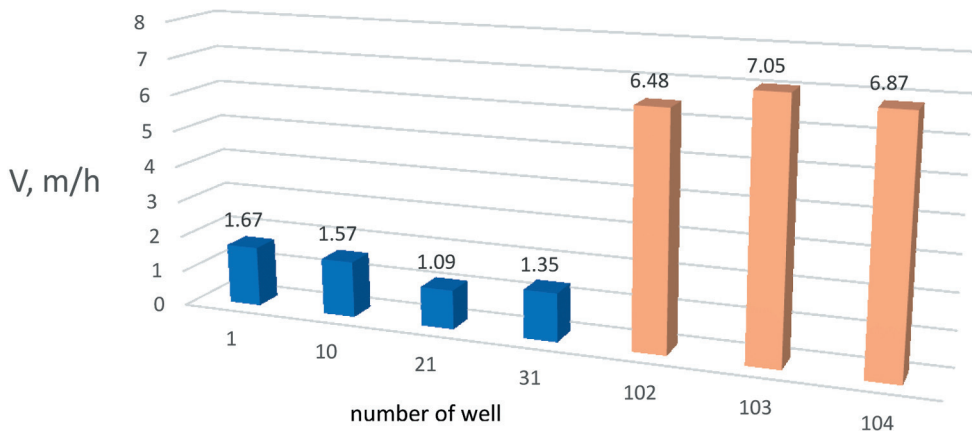


Fig. 2. Rate of penetration at the Verkhnyomaslovetske field

The increase in the rate of penetration is closely related to the monthly rig progress (Fig. 3), which is a time indicator of the efficiency of work performance.

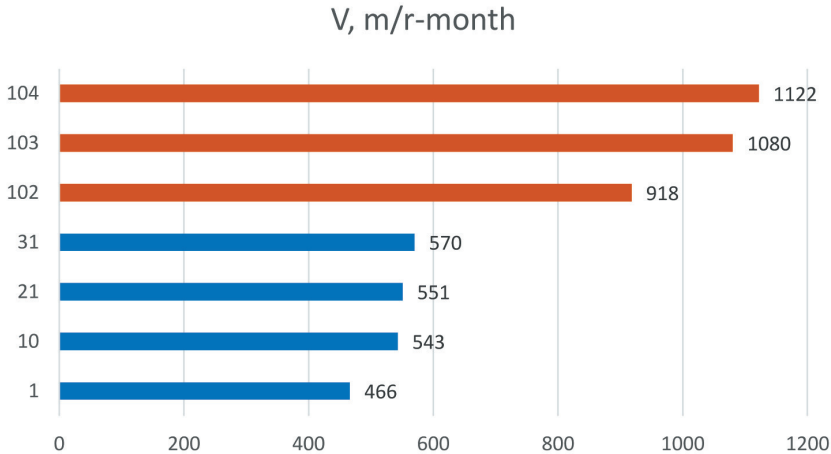


Fig. 3. Monthly rig progress at Verkhnyomaslovske field (averaged depth of 1101 m)

The analysis of the monthly rig progress shows that the implemented efficient technological solutions allowed to increase it almost twofold compared to the most efficiently drilled well No. 31.

Compared to other wells, for well No. 103, the time of contact between the drilling mud and the reservoir was more than halved (20 days as opposed to 44–58 days for other wells), and the number of trips round was reduced by almost three times. The production casing was cemented with expandable backfill with reduced water loss, with a grouting mortar with a density of 1.80–1.83 g/cm³ in the productive layer and a light-weight slurry with a density of 1.54–1.56 g/cm³ above it using structured buffer slurries. These technological solutions were confirmed by the well flow rate at the time of commissioning. However, given the long-term operation of the wells, the reservoir pressure has been reduced by almost half.

As each well is drilled and additional geological information is obtained, the geological model of the field and the hydrodynamic model of oil deposits are refined (Fig. 4). The design of a detailed digital geological and hydrodynamic model and its timely updating ensures that correct and efficient technological decisions are made during well deepening, during selecting new wells for drilling and field development.

Due to the complication of mining and geological conditions for drilling due to the depletion of reservoir energy, the company's geological department is tasked with finding and laying new wells in the most favorable conditions.

An important stage in well construction is their completion. In this case, close attention should be given to well casing.

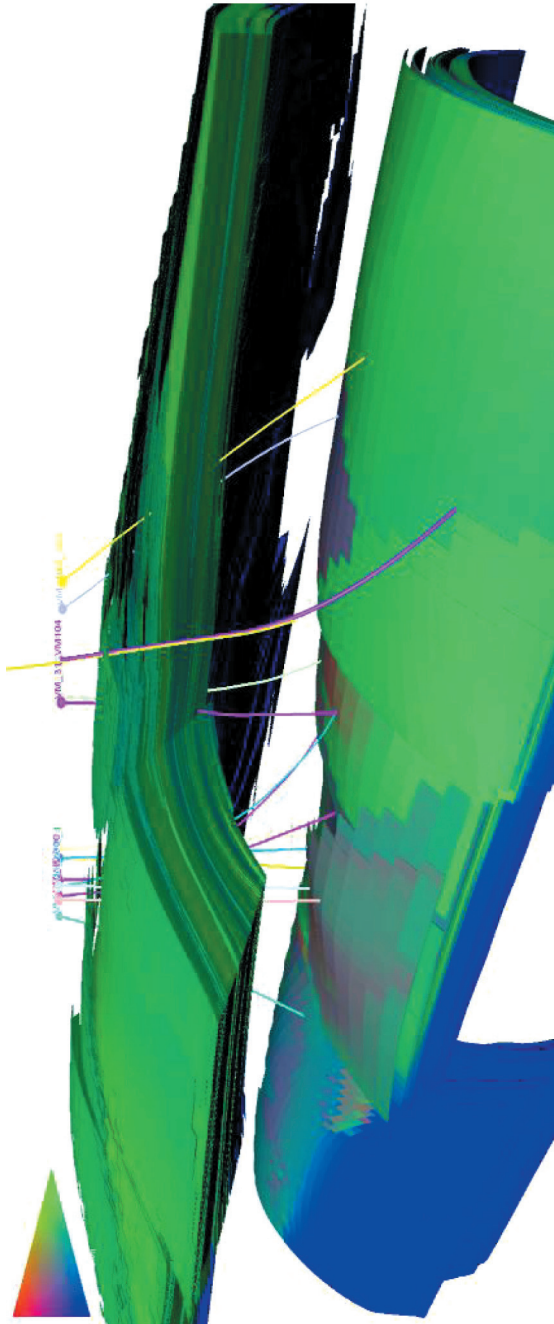


Fig. 4. Digital model of the field

Complicated mining and geological conditions require improving the quality of productive horizons delineation, which can be achieved by implementing effective technological solutions and using sedimentation-stable reinforced plugging materials (Koroviaka et al. 2024).

Violation of the support system of casing and the lack of high-quality horizon delineation can be a prerequisite for fluid flow or griffin formation, and creates additional risks to both the environment and human safety (Lutchmedial 2016).

The reports by leading hydrocarbon operators state that the lack of quality cementing is one of the main factors in accidents and uncontrolled fluid showing (British Petroleum 2010).

Reliable separation of horizons can be ensured if a high-quality insulating screen is formed in the well support system of «rock – cement stone – casing» (Heinold et al. 2002, Jadhav 2015, Ziaja et al. 2017).

It can be argued that ensuring high-quality disclosure of productive horizons and their subsequent delineation during cementing is an urgent task to minimize the negative influence of technological fluids on the filtration and capacitive properties of formations (Liu 2021).

The repression on productive intervals can be partially reduced by providing appropriate materials and cementing wells in accordance with the hydraulic program. Hydraulic modelling of the cementing process should include calculation of fluid injection modes with the show of all the main cementing parameters, dynamic modelling of the cement slurry injection process, consideration of all geometric dimensions of the annulus, rheological characteristics of technological fluids, analysis of drilling mud replacement by cement based on the initial data, calculation of dynamic and hydrostatic pressure (Hossain 2016).

However, despite the availability of significant cement production capacity in Ukraine, the market for plugging materials cannot be fully supplied with quality materials.

Portland cement production was relatively stable in 2014–2020. Production peaked in 2021 at 11 million tones. According to analysts, the expected demand for construction cement in Ukraine will be 15–16 million tons per year. In 2013–2018 only four business groups: CRH, Buzzi/Dyckerhoff, “Ivano-Frankivskcement” and “Kryvyi Rih Cement” accounted for 83% of production, and in 2019–2021, they will account for 95%. The construction of new facilities would cost approximately fi100 million to produce 1 million tons of cement (Delo).

Plugging cements, which are used for cementing of oil and gas wells, account for approximately 0.3% of building cement production in Ukraine. At the same time, the regulatory requirements for the quality of plugging cements are quite strict. Therefore, it is unprofitable to produce special plugging materials in small quantities at large cement plants.

In such conditions, plugging materials are mainly manufactured according to the technical specifications developed and approved in accordance with the established procedure. As a rule, they are based on building cements or, in some cases, special plugging cements, and fillers and modifiers are added at specialized units or enterprises. The composition of plugging materials, i.e. the components of the system, is selected depending on the requirements for mixtures, purpose and conditions of use.

The classical and proven technology for wells casing at the Verkhnyomaslovetske field involved the use of lightweight plugging materials to isolate the annular space above the productive intervals.

Lightweight plugging materials are prepared based on basic cements with the addition of various additives and fillers.

The carried-out research have highlighted the possibility of using composite cements and additives of blast furnace slag and silica fly ash, as well as limestone, to produce basic cements with regulated strength (Gursel et al. 2016, Gholampour and Ozbakkaloglu 2017, Proske et al. 2018, Król et al. 2020, Tkaczewska and Malata 2023).

Other research confirm the feasibility of using multicomponent cements (Stryczek et al. 2023) or cements with other active pozzolanic additives (Kapeluszna et al. 2020).

Fine filler such as limestone and its derivatives, based on research in the building industry, have an influence on the rheological and technological properties of grouting mortar (Tarun et al. 2003, De Schutter 2011). At the same time, calcium carbonate, the main component of limestone, reacts with calcium aluminates to form hydrated calcium carbonate. The presence of hydrated calcium carbonate inhibits the transition of ettringite to monosulfate, thus, in hydration products the amount of monosulfate decreases or disappears, and the amount of ettringite increases (Zajac et al. 2014). The reaction of calcite with C_3A to form carboaluminates suggests that limestone may to some extent play the role of a structuring regulator, which reduces the amount of gypsum as a grip regulator (Matschei et al. 2007). In addition, taking into account the nucleation effect, limestone additive grains act as crystallizing nucleus for cement hydration products (Hea et al. 2012, Zajac et al. 2014).

At the same time, research confirm that a significant part of calcite is reactive. Calcite influences on the mineralogical variant of the AFm phase(s). Calcite additives influence on the amount of free C-H, as well as on the balance between the AFm and AFt phases, although C-S-H is not affected in most of the composition range (Matschei et al. 2007).

In Ukraine, limestone is widely used in cements, its derivatives and plugging materials.

However, in some cases, base cements with low grinding fineness are used. As an example, we evaluated a base cement used as a basis for the preparation of lightweight plugging materials with a specific surface of $220 \text{ m}^2/\text{kg}$. Figure 5 shows research of the cement particle size and its distribution in the material.

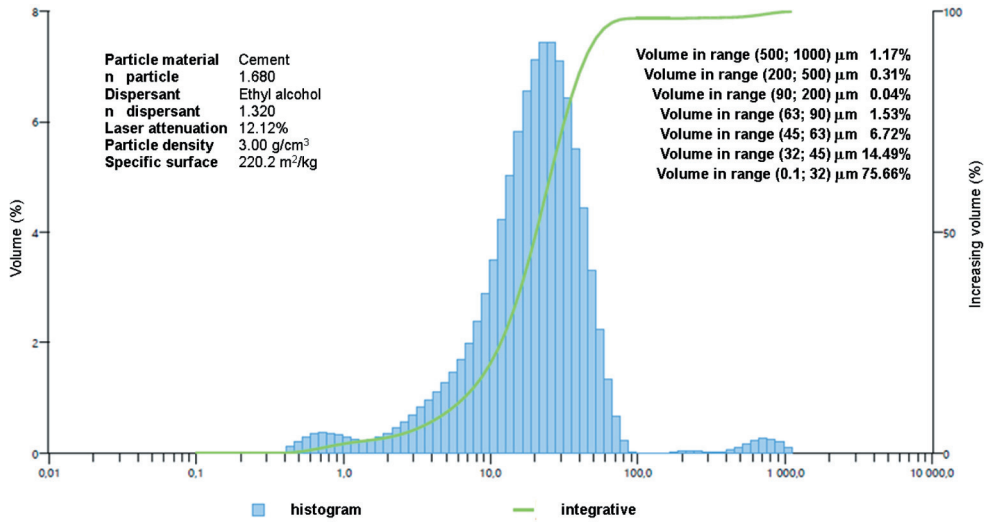


Fig. 5. Particle size of the base cement

The low specific surface of the base binder agent (Fig. 5) will have a direct influence on the prepared plugging material. As a result, the line of basic lightweight plugging cements has low sedimentation stability and reduced strength characteristics of cement stone. As a result, in most cases by the results of acoustic logging metrics, the quality of cementing with lightweight plugging material is rather poor, due to its deteriorated technological and exploitation properties. In addition, due to impaired sedimentation stability and uncontrolled water loss indicator, such materials have a negative influence on the filtration and capacitive characteristics of the reservoir.

The density of the lightweight grouting mortar will mainly depend on the density and ratio of the component materials, the water-mix ratio and the density of the dispersion medium.

The almost complete absence implementation volumes of aerated grouting mortars is due to the significantly reduced strength of cement stone based on them and the disturbance of the uniformity of the insulating ring due to the potential forming of gas belts during structuring.

The most effective method of adjusting the density of the grouting mortar is to use the optimal proportion of lightening additives in the plugging material and correction the water-mix ratio. However, it should be added that an increase in the water-mix ratio will contribute to loss of sedimentation stability, resulting in the deposition of solid particles and migration of the dispersion medium to the upper layers. In such a situation, the structuring grouting mortar may be forming with channels and water belts will form in the top part grouting mortar.

One of the ways to regulate sedimentation stability is to bind part of the free water due to the dispersion of binder agent and hydrophilic additives, stabilizer reagents, reducing the duration of structuration and the use of strengthening fillers that contribute to the forming of the structure frame. In some cases, quite often, additive of drilling clay powder is used, which has a positive effect on the stability of the grouting mortar but has an extremely negative influence on the physical and mechanical properties of cement stone and corrosion resistance.

The tightness of the insulation screen will depend on the composition of the plugging material, the properties of the grouting mortar and the features and conditions of forming its structure (Ulm and Coussy 1996, Kudapa 2023).

In Ukraine, the most widely used plugging materials are those with a grouting mortar density of 1500 kg/m^3 . However, in some cases, significant risks arise when using such materials to ensure high-quality and complete filling of the annular space, especially in the conditions of abnormally low reservoir pressures. Reducing the density of the grouting mortar by increasing the dispersion medium requires the introduction of a significant number of various stabilizers, which also leads to a significant deterioration in the physical and mechanical properties of the cement stone.

As an example, the actual use of lightweight plugging material involved the following formulation: lightweight plugging material – 100%, W/C – 0.85 and NTFK – 0.057%. The density of the grouting mortar was 1.54 g/cm^3 with a flowability of more than 250 mm. The coefficient of sedimentation resistance after 2 hours at rest was 0.93, and after 3.5 hours at rest – 0.88.

During the input control research, the water separation rate was at the lower limit of the permissible value, and the strength index exceeded the lower limit by 18%. Testing of the grouting mortar for well cementing conditions required the addition of a retarder (NTFK), which led to a significant deterioration in the properties of the grouting mortar (Fig. 6) and cement stone.

The grouting mortar based on this lightweight material is characterized by a high ratio of water separation (free water) 9 ml. At the same time, the onset of setting of the cement was 14 hours, and with modelling of downhole conditions, the ratio of water separation was 25 ml. Reducing the water-mix ratio by 14% of water leads to accelerated structuring and the onset of setting in 2 hour 45 min. In such conditions, significant risks to the success of cementing can arise and lead to a defect in the work or an emergency.

A prerequisite for ensuring high-quality horizon delineation is the use of stabilized plugging systems. The use of such materials makes it possible to obtain grouting mortar with zero ratio of water separation and a regulated water drainage value, which, in combination, ensures the forming of a non-shrinking cement stone.

Cellulose ester-based reagents are efficiently to bind free water in plugging systems (Bülichen et al. 2012). The use of stabilizer reagents must provide good retention capacity of the grouting mortar in different temperature ranges (Haichuan et al. 2015).




		
<i>WS = 9 ml (after 2 hours at 22°C)</i>	<i>WS = 20 ml (after 3.5 hours at 22°C)</i>	<i>WS = 25 ml (result) (after 2 hours at 50°C)</i>

Fig. 6. Water separation (WS) of the serial lightweight grouting mortar

The peculiarity of directional wells casing is the need to use sedimentation-stable plugging systems. Since even a slight water separation of the grouting mortar will contribute to the forming of a migration channel and a water belt (Fig. 7), which will impair the adhesion of the cement stone to the bounding surfaces and may lead to off-column flows (Ammerer and Hashemi 1983, Piatkivskyi 2024).



Fig. 7. Visualization of sedimentation stability breach of the grouting mortar

In addition, stabilized grouting mortar should be used when cementing productive reservoirs or highly permeable reservoirs. This is because it is necessary to minimize the negative influence of the grouting mortar filtrate on the filtration and capacitance characteristics of the reservoirs and prevent unexpected filtering of the dispersion medium. The loss of a part of water of the grouting mortar can lead to its premature thickening and provoke an avalanche-like grip, as a result the grouting mortar becomes non-pumpable.

To create the prerequisites for reliable horizon delineation, it is necessary to properly prepare the wellbore for cementing. Difficult dynamic loads on the casing system, in the absence of a reliable cement stone behind the casing, can cause leakage of tightness of the insulation screen (Li et al. 2023).

Another important condition for ensuring reliable horizon delineation is the forming of a strong, low-permeability and corrosion-resistant cement stone. Such pre-conditions can be achieved by reducing intergranular and capillary porosity, as well as intensification the hydration processes of the plugging material (Sanytskyi et al. 2010).

The use of plugging systems based on composite cements during hydration ensures the forming of thermodynamically stable compounds already at the first stages of the solidification process. In turn, this contributes to the forming of cement stone with high tightness and hermeticity. Such compounds with good crystal-forming properties are the basis for obtaining cement stone with low permeability and high strength in both bending and compression (Ihnatov et al. 2022, Senyushkovych et al. 2022). Research have confirmed the possibility of producing self-reinforcing composites (Taylor 1990).

It is possible to optimize hydration reactions and increase their kinetics by reducing the particle size distribution of binder particles. Figure 8 shows the particle size distribution of microcement with a specific surface of 659.6 m²/kg. For comparison, the base materials have a specific surface of 220 m²/kg to 350 m²/kg.

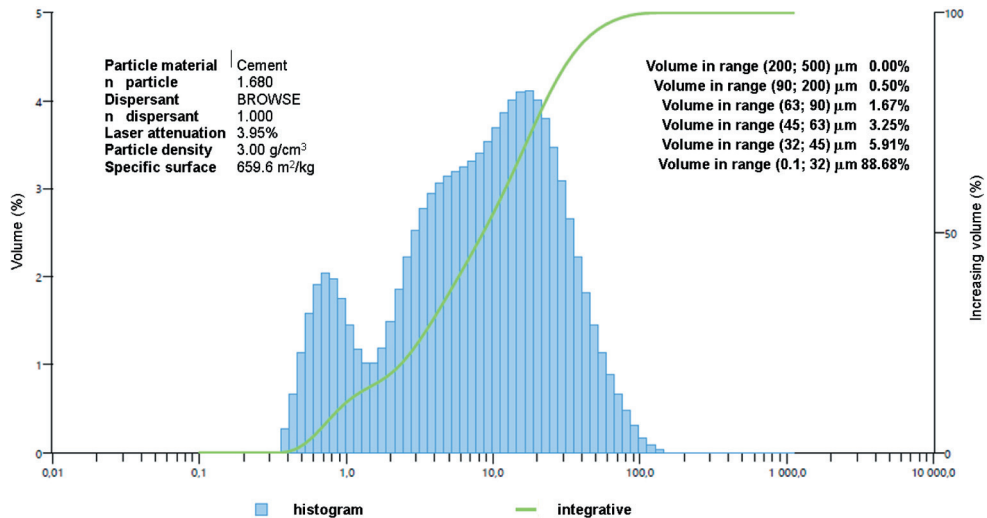


Fig. 8. Integral distribution of the fractional composition of microcement

With an increase in the specific surface of the plugging material, the constant of reaction rate increases inversely with the square of the particle radius. The increase in the dispersion of plugging mixtures helps to increase the chemically active surface of the material and this allows to release part of the internal energy of the substance, which is then realized in physical and chemical transformations (Sanytskyi et al. 2010).

The thermobaric conditions of the well will have a direct influence on the structuring process and its kinetics, which must be considered when designing the plugging material. At the same time, the components of the plugging material, in particular, their content and quantity, as well as the fractional composition, must be selected individually for each well.

Effective materials for the development of lightweight plugging materials and providing at least non-shrinking plugging materials or slightly expanding are coal ash or shale additives. Ash or variety of fly ash flotation product is a finely dispersed material with the inclusion of microspheres. The bulk density is 300–500 kg/m³. The size of microspheres is in the range of 10–400 microns. The presence in the chemical composition of SiO₂ and Al₂O₃ oxides contributes to the forming of corrosion-resistant stone, and the presence of free CaO and MgO contributes to the forming of cement stone with an expansion effect.

The combined use of ash additives and Portland cement ensures the interaction of calcium hydroxide with active silica sol and aluminosilicates, forming complex hardening compounds.

However, a significant content of fly ash in the cement composition leads to a delay in the dynamics of strength gain and, as a result, cement stone has lower values of early strength (Stryczek et al. 2023).

Compared to other lightening additives, the presence of glass spheres in the ash provides an effective reduction in the density of the plugging material. However, one of the disadvantages is the ability of spherical balls to fracture under a certain differential pressure. Nevertheless, there is a wide range of hollow spheres on the market that can withstand differential pressure of up to 700 atm. The only question will be the cost of these additives and the price competitiveness of the resulting lightweight plugging material.

To ensure the expansion effect of cement stone in a larger percentage equivalent, quicklime can be added to the composition of the plugging material, for example. However, the thermobaric conditions of the well require additional technological solutions in the calcination of lime burning as an expansion agent.

The results of the quantitative analysis of the elemental composition of lightening additives BS and TR are shown in Table 3.

Based on a summary of the results of X-ray fluorescence spectroscopy and X-ray diffraction analysis, it was found that the research material of TR has a qualitative composition, is very identical to the material of BS and differs from it primarily by a relatively higher content of the amorphous component. Like the sample of BS, the material of TR is a mixture of X-ray crystalline phases of mullite aluminosilicate

$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, silimanite aluminosilicate Al_2SiO_5 , and calcium carbonate CaCO_3 . In addition, the material contains a relatively higher content of iron oxide, which, however, is not detectable by X-ray diffraction. The X-ray amorphous part of the material probably includes potassium aluminosilicate.

Table 3
Quantitative analysis of the elemental composition of lightening additives

Composition (in terms of oxides) [wt.%]	Analysis number BS			Average value BS	Analysis number TR			Average value TR
	1	2	3		1	2	3	
Al_2O_3	30.92	30.46	31.25	30.88	26.38	26.14	26.58	26.37
MgO	0.80	0.86	0.75	0.80	1.65	1.58	1.54	1.59
SiO_2	58.63	57.73	58.67	58.34	53.86	53.27	53.82	53.65
P_2O_5	0.26	0.23	0.26	0.25	0.23	0.22	0.22	0.22
SO_3	0.17	0.19	0.16	0.17	0.23	0.41	0.23	0.29
K_2O	2.52	2.73	2.32	2.52	6.26	6.33	6.28	6.29
CaO	2.29	2.69	2.24	2.40	2.05	2.55	2.05	2.22
Fe_2O_3	2.86	2.71	2.81	2.79	7.68	7.84	7.63	7.71
TiO_2	1.41	1.45	1.40	1.42	1.38	1.38	1.38	1.38
V_2O_5	–	–	–	–	0.06	0.06	0.05	0.06

The composition of the plugging material, which includes a basic composite cement, microcement with a specific surface of $6596 \text{ cm}^2/\text{g}$, and a lightening additive based on ash of TR and BS, was designed. To ensure the required structural and rheological properties of the grouting mortar, for example, cellulose esters such as methylhydroxyethylcellulose or other type of stabilizer and plasticizer of polycarboxylate type or other type are used, for example, for deaeration – a silicone type defoamer or other type. Reinforcing additives, such as polypropylene or polyamide fibers, were used to increase the elastic and deformation properties of the cement stone. The formulation of the first portion of the designed plugging material is given in Table 4.

The obtained results indicate that the grouting mortar with a density of 1.25 g/cm^3 based on the developed plugging materials has satisfactory rheology (flowability index) and zero water separation. The strength of the cement stone based on C-HLW2- BS at the age of one day is 0.4 MN/m^2 , and at the age of two days – 1.1 MN/m^2 , which exceeds by 22% the strength of the base material PCT Pol 50–100 (density 1.52 g/cm^3) at the age of two days. At the same time, the base material of PCT Pol 50–100 did not reach sufficient strength of cement stone at the age of one day (samples were destroyed when disassembling the molds).

Table 4
Results of research the formulations of the first portion of the lightweight grouting mortar for cementing of the production casing $\varnothing 178$ mm in the wells of the Verkhnyomaslovetske field

Type cement	Formulation of grouting mortar, mass share				Density of grouting mortar [g/cm ³]	Flowability of grouting mortar [mm]	Water separation rate [ml]	Research conditions		Time of setting, hour-min		Thickening time to 30 Bc, hour-min	Strength of stone in bending after 24/48 hour [MPa]		
	quantity of cement	additive		water				temperature [°C]	pressure [MPa]	beginning	end				
		name	quantity	density [g/cm ³]										pH	quantity
PCT Pol 50-100	100	PCT Pol 50-100 defoamer	100 0.25	1.0	7.5	85	1.52	245	0.2	22	0.1	9-40	17-00	4-50	-/0.9
C-HLW2-TR	100	cement microcement additive TR defoamer stabilizer plasticizer reinforcing adm.	45 25 30 0.2 0.2 0.1 0.02	1.0	7.5	75	1.26	205	0	22	0.1	13-45	15-45	4-20	0.3/0.9
C-HLW2-BS	100	cement microcement additive BS defoamer stabilizer plasticizer reinforcing adm.	45 25 30 0.2 0.2 0.1 0.02	1.0	7.5	75	1.25	200	0	22	0.1	13-10	15-35	4-30	0.4/1.1

The evaluation of the rheological characteristics of the grouting mortar based on C-HLW2-BS is shown in Figure 9 using the device FANN 35SA, which characterizes the change in the twist angle at different speeds. In this case, the plastic viscosity is 90 mPa·s, and the dynamic shear stress is 350.4 dPa.

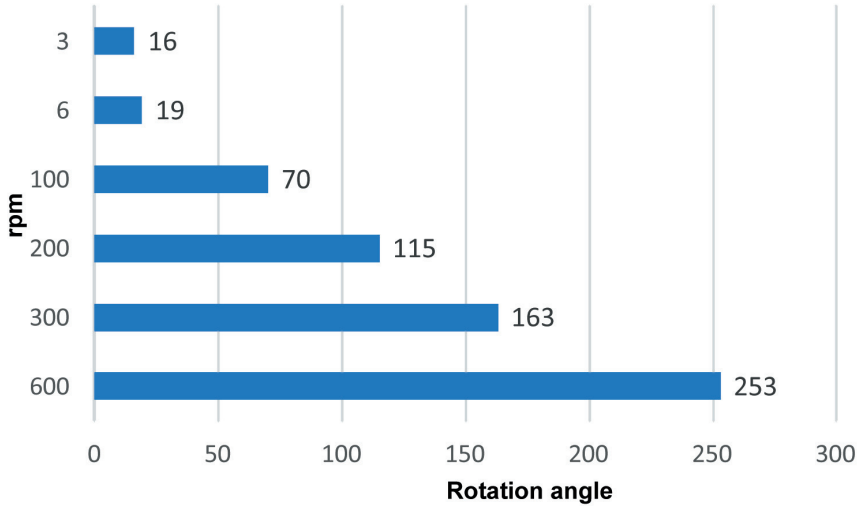


Fig. 9. Changes in the twisting angle at different rotational speeds

In addition, the first portion of the grouting mortar was tested on the consistometer KC-3 according to the schedules reflecting the technical, technological and thermobaric conditions of cementing with a research duration of $T_c = 2$ hours 40 minutes (Fig. 10).

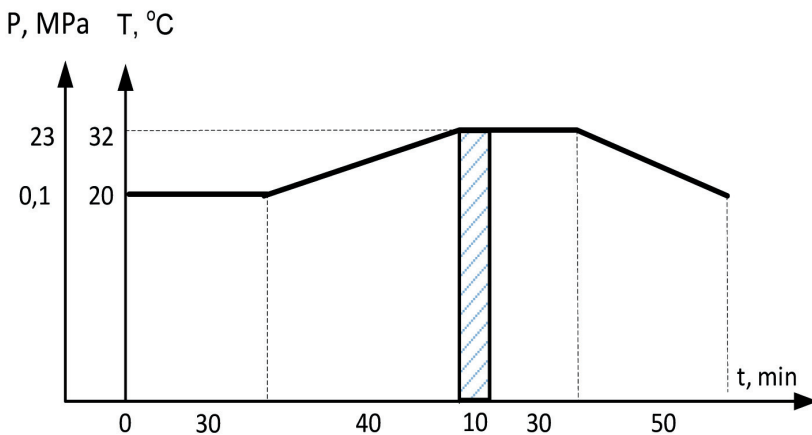


Fig. 10. Research schedule for the first portion of the grouting mortar of the typical well No. C Verkhnyomaslovetska (interval 1250–0 m)

Based on the results of modelling the thermobaric and technological procedures for cementing a production casing for a typical well in the Verkhnyomaslovetske field, it can be stated that the research materials C-HLW2-TR and C-HLW2-BS meet the established conditions of use.

For the well conditions, we tested and evaluated the dynamics of strength gain by the non-destructive method using OFITE UCA (Fig. 11).

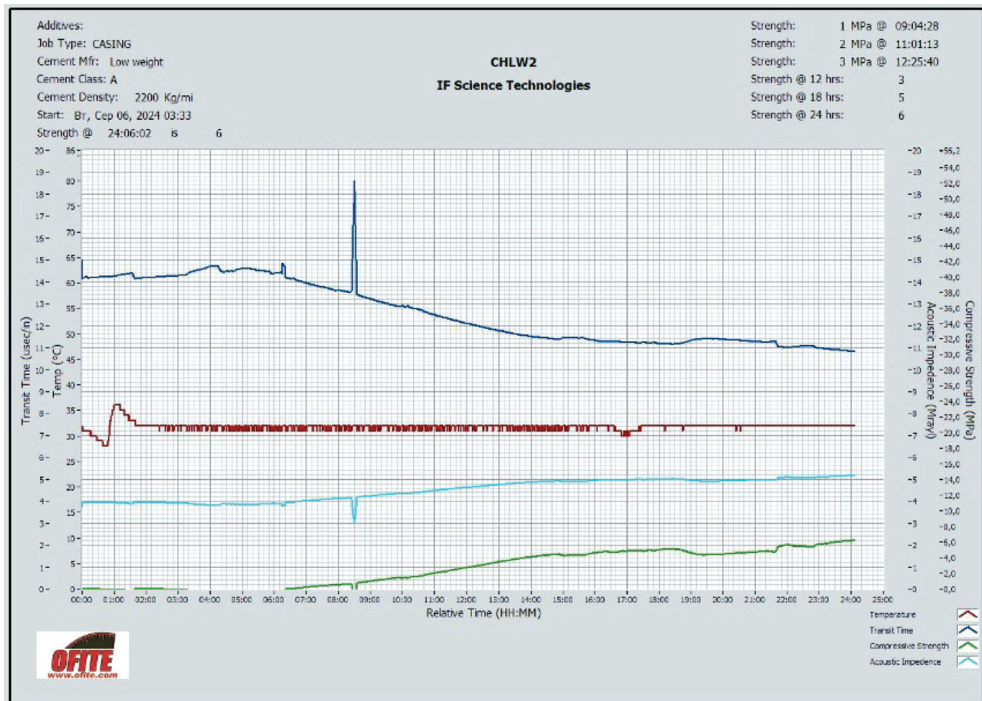


Fig. 11. Dynamics of the strength gain of the C-HLW2-BS plugging material for the conditions of well No. C Verkhnyomaslovetske field

According to the test results, it was found that the research material C-HLW2-BS is characterized by rapid structuring (6 hour – 30 min beginning of strength gain). The compressive strength at the age of one day is 6 MPa.

In addition, a quantitative analysis of the elemental composition of cement stone samples C-HLW2-TR and C-HLW2-BS was also carried out. The results of the quantitative analysis of the elemental composition of the research cement stone samples are given in Table 5.

As we can see, the cement stone research samples of plugging materials are close in elemental composition in terms of oxides.

It is known that C_3S plays a key role in providing strength among the main phases of cement clinker. At the same time, cement stone which made of C_3S monocrystals

has a compressive strength of 68 MPa, which made of C_3S – 63 MPa, of C_3A – 8 MPa, and of C_3AF – 17 MPa (Runova et al. 2008). However, the polycomponency of the cement material and its multiphase composition can introduce complex changes that affect the hardening mechanism of the constituent minerals.

Table 5
Quantitative analysis of the elemental composition of cement stone samples

Composition (in terms of oxides) [wt.%]	Number of research C-HLW2-TR			Average value	Number of research C-HLW2-BS			Average value
	1	2	3	C-HLW2-TR	1	2	3	C-HLW2-BS
Al_2O_3	6.09	7.46	8.07	7.21	8.22	7.94	8.00	8.05
SiO_2	23.24	18.03	17.29	19.52	16.97	17.07	16.93	16.99
SO_3	1.92	1.99	2.00	1.97	2.78	2.63	2.62	2.67
K_2O	1.80	2.03	1.97	1.93	1.17	1.29	1.17	1.21
CaO	60.32	63.31	63.09	62.24	63.60	63.77	63.93	63.76
MnO_2	0.40	0.44	0.45	0.43	0.44	0.46	0.45	0.45
Fe_2O_3	5.40	5.84	6.21	5.82	5.55	5.59	5.65	5.59
SrO	0.11	0.12	0.13	0.12	0.16	0.16	0.16	0,16
TiO_2	0.59	0.64	0.69	0.64	0.97	0.94	0.99	0.97

The study and comparison of the X-ray phase analysis (Fig. 12) of the lightweight plugging material used in well No. 150 (obtained as a result drilling a cement cup in the casing at a depth of 1500 m), as well as the designed lightweight material C-HLW2-TR (BS) and the mass-produced lightweight cement plugging material PTC-Pol (PTC-P) were carried out.

Based on the X-ray phase analysis, it was found that the lightweight cement stone from well No. 150 Verkhnyomaslovetzke field (density of the grouting mortar before injection into the well was 1500 kg/m^3) has a slightly lower quantity of C_3S and other basic phases that take an active role in the early strength of the stone.

The researches plugging material C-HLW2-TR is a complex mixture of calcium hydroxide phases of portlandite $Ca(OH)_2$, calcite $CaCO_3$ with the presence of hydrated calcium silicate, aluminosilicate silimanite $Al_2O_3 \cdot SiO_4$ and probably hematite Fe_2O_3 . The data obtained by X-ray diffractometry are consistent with the results of X-ray fluorescence analysis. The material contains an X-ray amorphous component, the relative content of which (estimated using Match! software) is at least 50–55 mol.%. The amorphous phase is probably formed not by a single phase, but by a few phases, as evidenced by a wide halo in the range of counter angles of $12\text{--}40^\circ$. The sulphur content

is up to 2 wt.% in terms of oxide. Potassium is present, probably part of the aluminosilicates, but no X-ray crystalline mica was detected.

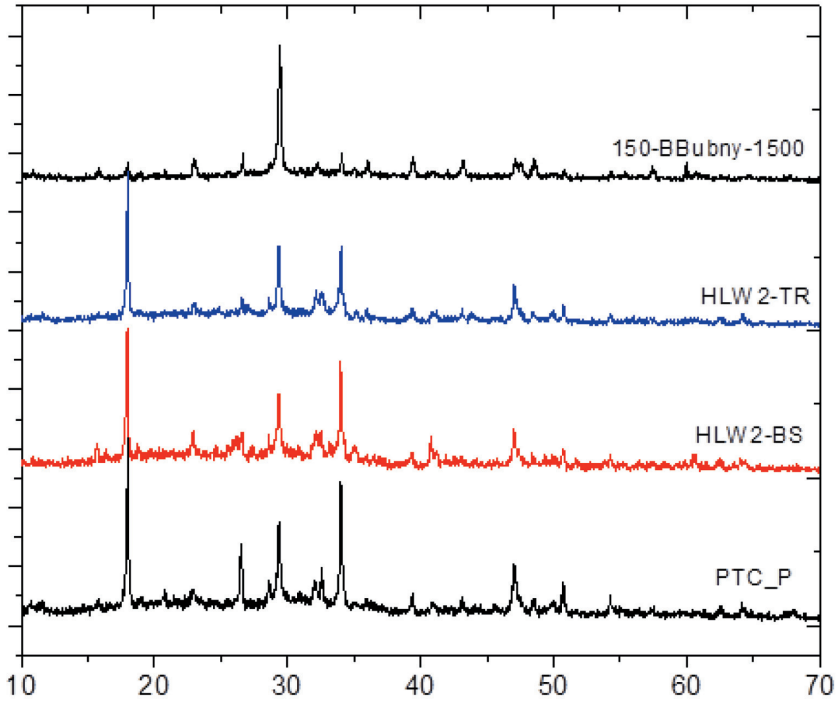


Fig. 12. X-ray diffraction analysis and comparison

For the lightweight material C-HLW2-BS, a mixture of phases of portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, calcium carbonate calcite CaCO_3 , and calcium silicate Ca_3SiO_5 was found. In addition, the X-ray crystalline phase of hydrated calcium silicate is likely presence. The diffractogram shows a halo in the region of the counter angles $13\text{--}40^\circ$. The material contains an X-ray amorphous component, the relative content of which, according to the estimation using the Match! software, is up to 75 mol.%; in general, at least 70 mol.% of the sample is in the X-ray amorphous state. The X-ray amorphous component is probably formed by calcium silicates. The sulfur content is 2.5–3.0 wt.%. Iron-containing phases are not recorded, but the iron content in terms of oxide is 5–6 wt.%.

In contrast to the lightweight cement stone from well No. 150 Verkhnyomaslovske field, the C_3S content in the proposed plugging systems (C-HLW2-TR and C-HLW2-BS) and the C-H content indicate a tendency of high kinetics of early strength gain. The C_2S content in the designed plugging systems indicates a potential reserve for strength gain at the age of 28 days and later. The base lightweight material PCT-Pol (PCT-P) (grouting mortar density 1530 kg/m^3) has a relatively satisfactory

early strength trend, taking into account the C_3S content, but due to the low quantity of C_2S , the reserve for stone strength in the long term is reduced.

It should be noted that the research of compositions which containing quartz and the results of these tests suggest that X-ray phases analysis for the research of hydrated composite systems with a SiO_2 content of more than 15 wt.% is not effective enough due to the significant background intensity of reflective SiO_2 . Such a quartz content facilitates to a decrease the ratio of 'passing signal/background', weak intensity of C-S-H reflections and other hydrate phases and neoplasms. Therefore, the hydrate phases of calcium hydrosilicate are difficult to assess due to their X-ray amorphous state.

A more detailed evaluation of the C-H, C_3S , and C_2S content is shown, as an example, for the cement stone of the lightweight material C-HLW2-BS.

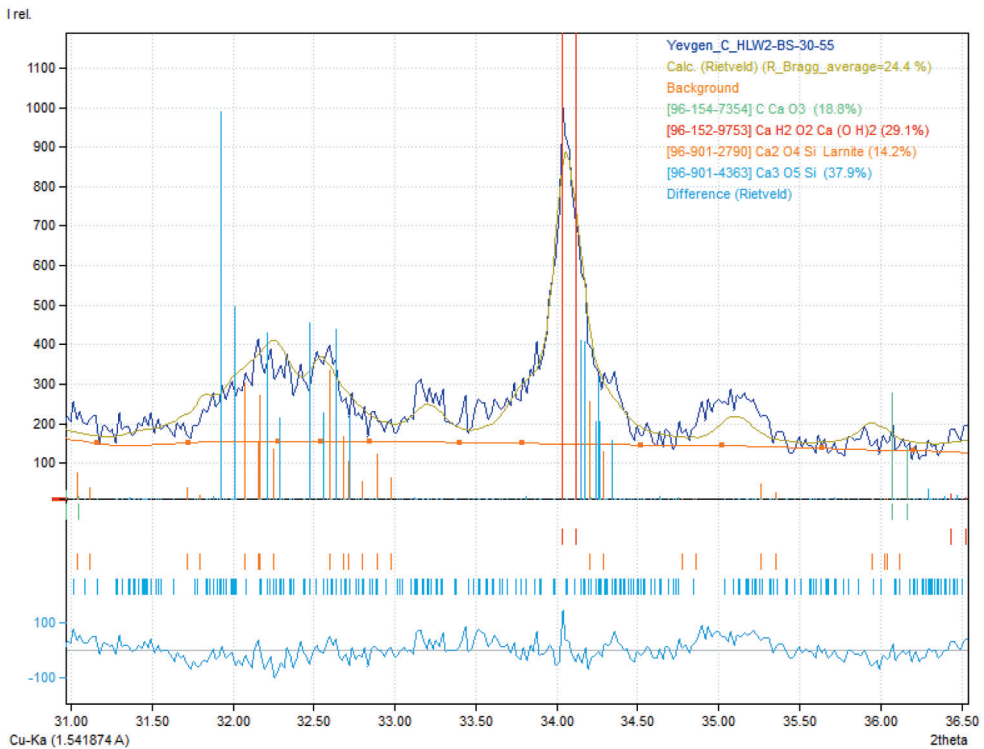


Fig. 13. X-ray phases analysis of the cement stone sample of the material C-HLW2-BS

As can be seen from Figure 13, the X-ray phases analysis in the range of counter angles $31.0\text{--}36.5^\circ$ makes it possible to establish the content of C-H at approximately 29% of C_3S – 38% of C_2S – 14%, $CaCO_3$ – 19%. Such distribution of hydrate phases in this range of research mainly indicates rapid kinetics of early strength and sufficient potential for the forming of a strong and dense structure at a later age.

The analytical and laboratory research carried out and the results obtained suggest that it is possible to improve the quality of casing under ALRP conditions at the Verkhnyomaslovske field, as well as at other fields with related mining and geological conditions.

5. Conclusion

Based on the analysis and research conducted, the following conclusions can be drawn:

1. Long-term exploitation and peculiarities of the geological structure of the Verkhnyomaslovske field confirm the need to implement modern technical and technological solutions at all stages of well construction.
2. The basic technological solutions for cementing production casings do not respond to the conditions for the qualitative delineation of productive horizons and ensuring reliable well casing, as evidenced by the absorption of the grouting mortar.
3. The developed composition of the lightweight plugging material can be the basis for grouting mortar with density of 1.25 g/cm^3 and a guarantee of filling the annular space with grouting mortar to the wellhead under conditions of potential absorption.
4. The structural and rheological parameters of the grouting mortar based on the developed lightweight material and the physical and mechanical properties of cement stone allow us to assert the prerequisites for ensuring high-quality well casing of the Verkhnyomaslovske field in the conditions of ALRP.
5. Strength studies and X-ray phase analysis confirm the high kinetics of structure forming of the designed compositions and the potential for further growth of strength characteristics. As a result, it can be argued that a cement stone with improved exploitation characteristics has been formed.

References

- Ahafonov D.Yu., Tershak B.A., Stavychnyi Ye.M., Plytus M.M., Pyatkovskiy S.A., Savchuk N.M., 2022, *The experience of successful completion of the well at the Verkhnyomaslovske field of PJSC „Ukrnafta”*, Oil and Gas Power Engineering, no. 1(37), pp. 22–32, [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-1\(37\)-22-32](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-1(37)-22-32).
- Ammerer N.H., Hashemi R., 1983, *Completion Fluids Drilling*, vol. 44, no. 8.
- Büllichen D., Kainz J., Plank J., 2012, *Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose (MHEC) as water retention agent*, Cement and Concrete Research, vol. 42, pp. 953–959, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.016>.

- British Petroleum, 2010, *Deepwater Horizon accident investigation report. Executive summary*, deepwater-horizon-accident-investigation-report-executive-summary.pdf (bp.com) [access: 15.09.2024].
- De Schutter G., 2011, *Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete*. 36 Conference on Our World in concrete & Structures. Singapore.
- Doroshenko V.M., Zarubin Yu.O., Hryshanenko V.P., Prokopiv V.Yo., Shvydkyi O.A., 2013, *The main directions of improving the systems of field development and the potential of increasing oil production in Ukraine*, Oil & Gas Industry of Ukraine, no. 2, s. 27–30.
- Gholampour A., Ozbakkaloglu T., 2017, *Performance of sustainable concretes containing very high volume class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag*, Journal of Cleaner Production, vol. 162, pp. 1401–1417, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.087>.
- Gursel A.P., Maryman H., Ostertag C., 2016, *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash*, Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 823–836, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029>.
- Haichuan L., Chengbin X., Yonghui G., Lirong L., Zhu H., 2015, *Cement Slurries With Rheological Properties Unaffected by Temperature*, SPE Drilling & Completion, vol. 30(4), pp. 316–321, <https://doi.org/10.2118/178922-PA>.
- Hea H., Courardb L., Pirardc E., 2012, *Particle packing density and limestone fillers for more sustainable cement*, Key Engineering Materials, vol. 517, pp. 331–337, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.517.331>.
- Heinold T., Dillenbeck R.L., Rogers M.J., 2002, *The Effect of Key Cement Additives on the Mechanical Properties of Normal Density Oil and Gas Well Cement Systems*. Society of Petroleum Engineers (SPE), Paper presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, no. SPE-77867-MS, <https://doi.org/10.2118/77867-MS>.
- Hossain M.E., Islam M.R., 2018, *Drilling engineering: problems and solutions: A Field Guide for Engineers and Students*, Scrivener Publishing, <https://doi.org/10.1002/9781118998632>.
- Ihnatov A.O., Haddad J., Stavychnyi Y.M., Plytus M.M., 2022, *Development and Implementation of Innovative Approaches to Fixing Wells in Difficult Conditions*, Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, <https://doi.org/10.1007/s40033-022-00402-5>.
- Jadhav S., 2015, *Oil and gas production*, Scitus Academics Llc.
- Kapeluszna E., Kotwica L., Malata G., Murzyn P., Nocuń-Wczelik W., 2020, *The effect of highly reactive pozzolanic material on the early hydration of alite – C3A – gypsum synthetic cement systems*, Construction and Building Materials, vol. 251, art. 118879, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118879>.

- Karpenko O., Mykhailov V., Karpenko I., 2015, *To the forecast of hydrocarbon resources development in the eastern part of DDD*, Bulletin of the Taras Shevchenko Kyiv National University, no. 1(68), pp. 49–54.
- Koroviaka Ye., Stavychnyi Ye., Martynuk O., Ihnatov A., Yavorskyi A., 2024, *Research on occurrence features and ways to improve the quality of productive hydrocarbon horizons demarcation*, Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universtetu, no. 3, pp. 5–11, <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/005>.
- Król A., Giergiczny Z., Kuterasińska-Warwas J., 2020, *Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI*, Materials, vol. 13, iss. 10, art. 2257, <https://doi.org/10.3390/ma13102257>.
- Kudapa V.K., 2023, *Investigation of carbon black nanoparticles on effectiveness of cementation in oil and gas well*, Materials Today: Proceedings, vol. 99, pp. 162–169, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.111>.
- Li J., Liu J., Li Z., Liu Y., Wu X., Weitao S., 2023, *Influence Laws for Hydraulic Sealing Capacity in Shale Gas Well Cementing*, SPE Drilling & Completion, vol. 38, iss. 1, pp. 120–130, <https://doi.org/10.2118/212291-PA>.
- Liu G., 2021, *Applied Well Cementing Engineering*, Gulf Professional Publishing.
- Lutch C., 2016, *Safety and health for the oil and gas industry*, OSHE Consultants.
- Matschei T., Lothenbach B., Glasser F.P., 2007, *The role of calcium carbonate in cement hydration*, Cement and Concrete Research, vol. 37, iss. 4, pp. 551–558, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>.
- Monchak Yu.L., 2005, *Geological and economic estimation of oil and gas reserves at the Verkhnyomaslovske field: Report of the Central Research Laboratory of OJSC “Ukrnafta”*, Work Order No. 710143, Ivano-Frankivsk.
- Piatkivskyi S., 2024, *Well Rehabilitation is a Promising Area for Increasing Hydrocarbon Production*, Journal of Mechanical Engineering, vol. 74, iss. 1, pp. 141–158, <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0015>.
- Proske T., Rezvani M., Palm S., Muller C., Graubner C.A., 2018, *Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone*, pp. 107–119, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.012>.
- Runova R.F., Hots V.I., Nazarenko I.I., Sivko V.Y., Shlyuk P.S., 2008, *A new generation of construction materials and technologies of their application in construction*, UVPK “EksOb”, Kyiv.
- Senyushkovych M.M., 2020, *The project of industrial development of the Verkhnyomaslovske oil field: Report on the SRW of PJSC Ukrnafta*, Ivano-Frankivsk.
- Sanytskyi M.A., Sobol Kh.S., Markiv T.Ye., 2010, *Modified composite cements*, Lviv Polytechnic, Lviv.
- Senyushkovych M.V., Tershak B.A., Vytytskyi I.I., Martynuk O.B., 2022, *Special plugging systems*, IFNTUOG, Ivano-Frankivsk.

- Stryczek S., Gonet A., Kremieniewski M., Kowalski T., 2023, *Forecasting Strength Parameters of Hardened Geopolymer Slurries Applied to Seal Casing Columns in Boreholes*, *Energies*, vol. 16, art. 4458, <https://doi.org/10.3390/en16114458>.
- Stryczek S., Kremieniewski M., 2023, *Multi-Component Cements for Sealing Casing Columns in Boreholes*, *Buildings*, vol. 13(7), art. 1633, <https://doi.org/10.3390/buildings13071633>.
- Tarun R., Naik, Fethullah C., Yoon-Moon Ch., 2003, *Limestone powder use in cement and concrete*. Report No. CBU-2003-31 REP-525, Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science.
- Taylor H.F.W., 1990, *Cement Chemistry*, Academic Press, London.
- Tkaczewska E, Malata G., 2023, *Properties of the Cement, Slag and Fly Ash Mixture Composition Corresponding to CEM II/C-M and CEM VI*, *Materials Proceedings*, vol. 13(1), no. 11, <https://doi.org/10.3390/materproc2023013011>.
- Ulm F.J., Coussy O., 1996, *Strength Growth as Chemo-Plastic Hardening in Early Age Concrete*, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 122, no. 12, pp. 1123–1132.
- Zajac M., Rossberg A., Le Saout G., Lothenbach B., 2014, *Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements*. *Cement and Concrete Composites*, vol. 46, pp. 99–108, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>.
- Ziaja J., Stryczek S., Jamrozik A., Knez D., Vytyaz O., 2017, *Sealing slurries limiting natural gas exhalations from the annular space of a wellbore*, *Przemysł Chemiczny*, vol. 96, pp. 990–992, <https://doi.org/10.15199/62.2017.5.9>.

Websites

- Biz, <https://biz.nv.ua/ukr/markets/ukrnafta-naskilki-kompaniya-zbilshila-vidobutok-nafti-i-gazu-u-2023-roci-50384281.html> [access: 10.10.2024].
- Kosatka, <https://kosatka.media/category/gaz/news/ukrajina-u-2023-r-zbilshila-vidobutok-gazu-mayzhe-na-1> [access: 10.10.2024].
- Delo, <https://delo.ua/industry/klyuc-do-vidbudovi-ci-vistacit-cementu-dlya-povojennoho-vidnovlennya-krayini-427567/> [access: 10.10.2024].

