



Poprawa bezpieczeństwa obiektów hydrotechnicznych poprzez realizację przesłon przeciwfiltracyjnych z zawiesin twardniejących

Improving the safety of hydrotechnical facilities by implementing cut-off walls made of hardening slurries



dr hab. inż. Paweł Fałaciński

prof. Politechniki Warszawskiej,
Wydział Inżynierii Środowiska,
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki,
pawel.falacinski@pw.edu.pl,
ORCID: 0000-0001-7090-5233



dr inż. Łukasz Szarek

Politechnika Warszawska,
Wydział Inżynierii Środowiska,
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki,
ORCID: 0000-0002-5794-9271



mgr inż. Robert Sołtysik

Soley sp. z o.o.



mgr inż. Nadzeya Fialkouskaya

Pietrucha International
sp. z o.o.



dr inż. Jacek Gralewski

Pietrucha International
sp. z o.o.

Streszczenie

Bezpieczeństwo obiektów hydrotechnicznych jest kluczowe dla strategicznego bezpieczeństwa Polski zarówno w zakresie zaopatrzenia w wodę, jak i ochrony obszarów zurbanizowanych przed powodzią. W pracy opisano wybrane rozwiązania służące poprawie stabilności ziemnych obiektów hydrotechnicznych w dobie zmieniającego się klimatu oraz postępujących przemian zachodzących w zlewniach rzecznych. Zaprezentowano możliwość uszczelnienia korpusu oraz podłoża ziemnych budowli hydrotechnicznych poprzez zastosowanie przesłon przeciwfiltracyjnych z zawieszin twardniejących. Scharakteryzowano materiał w kontekście wykorzystania w nim różnego rodzaju ubocznych produktów spalania oraz przedstawiono wymagania odnośnie do właściwości technologicznych (w stanie płynnym) i użytkowych (po stwardnieniu) stawianych zawieszinom twardniejącym użytym w przesłonach przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych. Artykuł przedstawia aktualne, wykonywane w praktyce technologie wykonywania przesłon

przeciwfiltracyjnych, takie jak: DSM, CSM, wykop wąskoprzestrzenny oraz CDMM.

W pracy zaprezentowano studium przypadku dotyczące zastosowania nowej technologii – hybrydowej przesłony przeciwfiltracyjnej (HPP). Analiza została opracowana na przykładzie remontu ziemnej zapory czołowej zbiornika retencyjnego w Cedzynie. Wykonane doszczelnienie zapory polegało na realizacji przesłony przeciwfiltracyjnej w technologii CDMM, a następnie do świeżo zmieszanego z zawiesziną twardniejącą gruntu wprowadzono dodatkowe elementy uszczelniające w postaci grodzic winylowych ze specjalnie uszczelnionymi zamkami. Technologia ta przynosi wiele korzyści, m.in. eliminuje ryzyko powstania uprzywilejowanej drogi filtracji przez przesłonę w trakcie formowania się struktury cementowo-gruntowej (faza przejściowa z postaci płynnej w stałą). Przedstawiona metoda stanowi przełom i wyznacza nowy kierunek rozwoju branży hydrotechnicznej.

Słowa kluczowe obiekt hydrotechniczny, przesłona przeciwfiltracyjna, zawieszina twardniejąca

Abstract

The safety of hydraulic structures is crucial to Poland's strategic security in terms of water supply and the protection of urban areas from flooding. This paper presents selected solutions to improve the safety of earthen hydraulic structures in an era of changing climate and ongoing transformations in river basins. The possibility of sealing the body and subsoil of earthen hydraulic structures by constructing cut-off walls made of hardening slurries is demonstrated. The material is characterized in the context of its use of various combustion by-products, and the requirements for the technological properties (in the liquid state) and performance (after hardening) of hardening slurries used in cut-off walls in flood embankments are presented. The paper presents current, practical technologies for constructing cut-off walls, including DSM, CSM, narrow-space excavation, and CDMM.

The paper presents a case study of the application of a new technology, the so-called Hybrid Anti-filtration Cut-off Wall. A case study was presented using the example of the renovation of the earthen frontal dam of the Cedzyna reservoir. The dam's sealing involved constructing a filter screen using CDMM technology, followed by the introduction of additional sealing elements in the form of vinyl sheet piles with specially sealed interlocks into the freshly mixed soil. This technology offers advantages, including eliminating the risk of a privileged filtration path through the screen during the formation of the cement-soil structure (the transition phase from liquid to solid). The presented technology represents a breakthrough and sets a new direction for the hydraulic engineering industry.

Keywords hydrotechnical facility, cut-off wall, hardening slurry

WPROWADZENIE

Charakter wezbrań w polskich rzekach ulega istotnym przekształceniom. Zjawisko to wynika z postępujących zmian klimatu, coraz bardziej intensywnych opadów oraz przekształceń w zlewniach, związanych z modyfikacją sposobu użytkowania gruntów. Istniejące obiekty hydrotechniczne, np. wały przeciwpowodziowe, mogą nie być przygotowane na wzrost rzędnych wody, co wiąże się z dwoma rodzajami ryzyka: przelaniem się wody przez koronę wału oraz deformacjami filtracyjnymi spowodowanymi wydłużeniem czasu przejścia fali powodziowej. W pierwszym przypadku rozwiązaniem jest

podwyższenie korony wału – tymczasowe lub w ramach modernizacji – oraz utrzymanie dobrego stanu międzywala. W drugim przypadku stosuje się uszczelnienie korpusu i podłoża, np. poprzez wykonanie przesłony przeciwfiltracyjnej. Szeroko wykorzystywanym materiałem do budowy przesłon przeciwfiltracyjnych są zawiesziny twardniejące. Według normy PN-EN 1538:2015-08 [1] zawieszina twardniejąca to: „zawieszina, która twardnieje z upływem czasu. Jest to zawieszina zawierająca cement lub inne spoiwo oraz dodatkowe materiały jak il (bentonit), granulowany żużel wielkopiecowy lub popioły lotne (PFA), wypełniacze i domieszki”.

ZAWIESINY TWARDNIEJĄCE

Prowadzone badania opisane w [2] wskazują na zdolność zawieszin twardniejących do wiązania w swoim składzie różnego rodzaju ubocznych produktów spalania. Jest to możliwe bez pogorszenia ich właściwości technologicznych i użytkowych, a w niektórych przypadkach nawet z poprawą odporności korozyjnej [3, 4]. Ponadto zastosowanie takich zawieszin pozwala na obniżenie wbudowanego śladu węglowego przesłony przeciwfiltracyjnej w fazie budowy, a lepsza odporność korozyjna może pozytywnie wpłynąć na trwałość samej przesłony [5].

WŁAŚCIWOŚCI ZAWIESIN TWARDNIEJĄCYCH

Właściwości technologiczne zawiesiny w stanie płynnym bada się metodami analitycznymi do wykorzystywanych w wiertnictwie [6]. Do tych właściwości należą:

- Gęstość objętościowa – istotna ze względu na zachowanie stateczności wykopu wąskoprzestrzennego oraz wypieranie zawiesiny przez docelowy materiał w przypadku wbudowywania metodą dwufazową.
- Lepkość – ma znaczenie w związku z produkcją i transportem zawiesiny, np. pompowaniem, z łatwością głębienia wykopu pod jej osłoną, a także wypieraniem jej z wykopu [4, 7, 8]. Zbyt niska jej wartość może powodować penetrację zawiesiny w grunt, natomiast zbyt wysoka – trudności z pompowaniem.
- Odstój dobowy – jest procentową miarą sedymentacji zawiesiny (skłonności do segregacji), homogeniczności oraz jej stabilności. Sedymentacja zawiesiny może prowadzić do powstania w przesłonie stref stwardniałej zawiesiny o składzie i właściwościach istotnie odbiegających od założeń projektowych [9].
- Wytrzymałość strukturalna (wytrzymałość na ścinanie) – charakteryzuje właściwości tiksotropowe zawiesiny. Odpowiada za stateczność ścian wykopu, przeciwdziała odrywaniu się ziaren gruntu oraz zapewnia wymaganą stabilność zawiesin zanieczyszczonych urabianym gruntem [4].

Właściwości technologiczne zawiesin twardniejących zależą w głównej mierze od zawartości w nich bentonitu, tj. ilości oraz aktywności montmorylonitu. Z kolei właściwości użytkowe, po stwardnieniu, określa się najczęściej metodami zaczerpniętymi z geotechniki i technologii betonu [4]. Podstawowymi właściwościami są:

- Wytrzymałość na ścinanie (kąt tarcia wewnętrznego i spójność) badana jest w aparacie trójosiowym. Istotna dla zachowania się zawiesiny w przesłonie przeciwnafiltracyjnej [10], co wpływa na odporność na przecięcie hydrauliczne i sufozję, a także szczelność i wytrzymałość mechaniczną.
- Wytrzymałość na ściskanie – jest jednym z podstawowych parametrów zawiesiny twardniejącej i stanowi kluczowy wskaźnik przy projektowaniu materiału. Oprócz ciężaru własnego naprężenia ściskające wynikają z oddziaływania na pionową przesłonę tarcia, spowodowanego osiadaniami nasypu i jego podłoża. Zbyt duża wytrzymałość zwiększa sztywność materiału, co może prowadzić do rozluźnienia gruntu na styku z przesłoną i powstawania uprzywilejowanej drogi filtracji wody.
- Przepuszczalność hydrauliczna – jest miarą szczelności zawiesiny twardniejącej, właściwości szczególnie ważnej w kontekście uszczelniania korpusów ziemnych oraz ich podłoża.
- Odporność filtracyjna – to miara szczelności zawiesin twardniejących. Określana za pomocą przepuszczalności hydraulicznej



Fot. 1. Technologia DSM do realizacji przesłon przeciwnafiltracyjnych

w warunkach długotrwałej filtracji medium agresywnych. Jest to odporność na negatywne zmiany szczelności [11].

W tab. 1 przedstawiono wymagania dotyczące właściwości technologicznych i użytkowych zawiesin twardniejących, stosowanych do wykonywania przesłon przeciwnafiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych, sformułowane na podstawie doświadczeń krajowych.

Tab. 1. Wybrane właściwości zawiesin twardniejących stosowanych do wykonywania przesłon przeciwnafiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych. Opracowanie własne na podstawie [12]

Lp.	Właściwość	Jednostka	Wartość	Metoda oznaczania
1	2	3	4	5
Właściwości technologiczne				
2	Gęstość objętościowa:	g/cm ³		BN-90/1785-01
	– metoda wykopu wąskoprzestrzennego		1,15–1,40	
	– metoda wgłębnego mieszania – DSM		1,30–1,50	
3	Lepkość umowna	s	≤50	BN-90/1785-01
4	Odstój dobowy wody	%	≤4,0%	PN-85/G-02320
5	Wytrzymałość strukturalna po 10 min	Pa	1,4–10,0	BN-90/1785-01
Właściwości użytkowe po 28 dniach dojrzewania				
6	Wytrzymałość na ściskanie	MPa	0,5–2,0	PN-EN 12390-3 2011
7	Współczynnik przepuszczalności hydraulicznej k_{10}	m/s	≤10 ⁻⁸	Metody laboratoryjne jak dla gruntów spoistych



Fot. 2. Technologia CSM do realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych

TECHNOLOGIE WYKONYWANIA PRZESŁON PRZECIWFILTRACYJNYCH

Przesłony przeciwfiltracyjne z zawiesziny twardniejącej wykonuje się różnymi metodami, które stale rozwijają się w kierunku zwiększenia wydajności pracy, poprawy

procesu mieszania oraz uzyskania większej szczelności przesłon. Obecnie w praktyce można wyróżnić następujące technologie realizacji tych przesłon:

- Deep Soil Mixing (DSM) – technologia, w której grunt rodzimy miesza się z zawiesziną przy użyciu specjalnego mieszadła umożliwiającego jednoczesne zagłębianie narzędzia oraz podawanie zawiesziny (fot. 1). Po osiągnięciu projektowanej głębokości mieszadło jest podnoszone przy jednoczesnym podawaniu pod ciśnieniem zawiesziny. W ten sposób powstaje przegroda przeciwfiltracyjna w postaci rzędu kolumn gruntowo-cementowo-bentonitowych o grubości dochodzącej do ok. 0,8 m i głębokości efektywnej sięgającej 12 m.

- Cutter Soil Mixing (CSM) – technologia, która polega na wprowadzaniu w grunt bębnow skrawająco-mieszających, wyposażonych w specjalne noże skrawające i mieszające grunt z wtłaczaną pod ciśnieniem zawiesziną. W efekcie powstają zachodzące na siebie panele o określonej długości, grubości i projektowanej głębokości, które tworzą ciągłą przesłonę przeciwfiltracyjną (fot. 2).

- Wykop wąskoprzestrzenny – technologia, która polega na głębieniu wykopu w sposób ciągły przy użyciu koparki podsiębiernej, z równoczesnym podawaniem zawie-

siny (fot. 3a), lub metodą kolejnych sekcji, w której poszczególne odcinki wykopu wykonywane są koparką chwytakową i jednocześnie wypełniane zawiesziną twardniejącą (fot. 3b). W pierwszym etapie realizowana jest co druga sekcja – pierwszej kolejności, a w drugim – sekcje zamykające.

- Continuous Deep Mixing Method (CDMM) – technologia polegająca na zagłębianiu w grunt mieszadła łańcuchowego z zamocowanymi na nim płytami uzbrojonymi w narzędzia skrawająco-mieszające o projektowanej szerokości (tzw. miecz). Podczas pracy maszyny następuje ciągle niszczenie struktury gruntu przy jednoczesnym podawaniu zawiesziny twardniejącej, w wyniku czego powstaje jednolita przesłona o grubości ok. 40–50 cm (fot. 4).

ZASTOSOWANIE NOWOCZESNEJ TECHNOLOGII HPP W CELU POPRAWY STANU TECHNICZNEGO ZAPORY CZOŁOWEJ ZBIORNIKA CEDZYNA

Zbiornik retencyjny w Cedzynie, użytkowany od 1972 r., zlokalizowany jest w km 16+265 rzeki Lubrzanki. Jego pojemność wynosi 1,554 mln m³. Główne elementy obiektu to:

- zaporę ziemną czołową o długości całkowitej 450 m,



a



b

Fot. 3. Technologia wykopu wąskoprzestrzennego: a) metoda ciągła, b) metoda sekcyjna



Fot. 4. Technologia CDMM do realizacji przesłon przeciwnieprzepływowych

• sekcja przelewowa z zamknięciami stalowymi w postaci klap.

Wszystkie obiekty zbiornika należą do III klasy ważności obiektów hydrotechnicznych (fot. 5).

Parametry techniczne charakteryzujące zaporę ziemną czołową:

- długość: 450 m,
- szerokość korony: 4,00 m,
- wysokość średnia: 7,20 m,
- rzędna korony zapory: 263,40–263,50 m n.p.m.,
- skarpa odwodna – nachylenie: 1:2,5,
- skarpa odpowietrzna – nachylenie: 1:2,
- nachylenie skarpy odpowietrznej poniżej ławki: 1:2,5,
- rzędna ławki: 260,50 m n.p.m.,
- szerokość ławki: 3,00 m.

Korpus zapory wykonano głównie z gruntu piaszczystego, a skarpe odwodną zabezpieczono ekranem z płyt betonowych

z dylatacjami szczelnymi oraz fartuchem z gruntu spoistego, połączonym z betonowym ubezpieczeniem skarpy odwodnej.

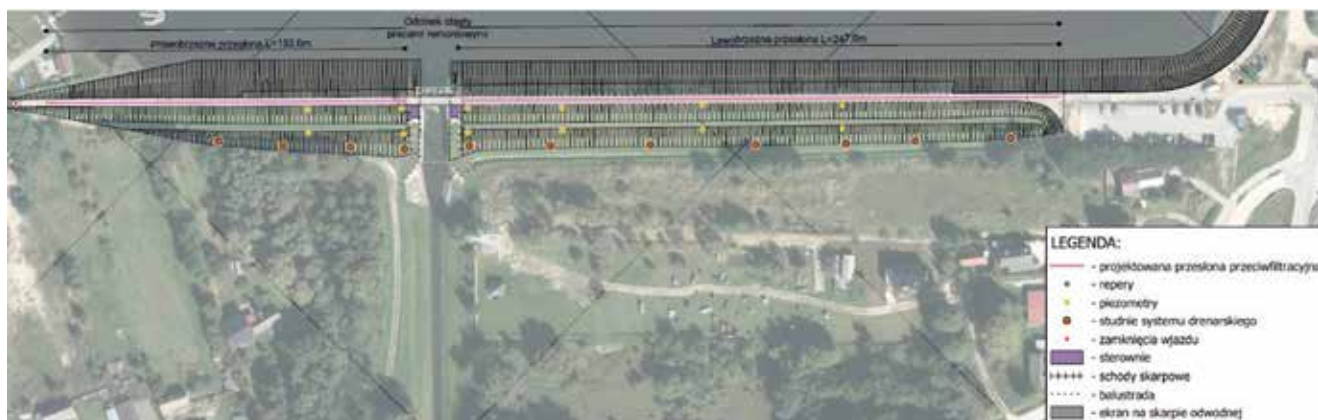
Na podstawie okresowych ocen i kontroli stanu technicznego obiektu stwierdzono przekroczenia wartości granicznych gradientów filtracji w podłożu pod zaporą oraz w jej sąsiedztwie. Może to wskazywać na występowanie zjawiska przebiecia hydraulicznego za korpusem zapory od strony odpowietrznej, które w dłuższym okresie mogłoby doprowadzić do uszkodzenia lub nawet zniszczenia konstrukcji zapory.

Obliczenia zamieszczone w raporcie z kontroli określiły wielkość współczynnika bezpieczeństwa zapory poniżej dopuszczalnej wartości normowej: $SF = 1,5$. W konsekwencji wydano zalecenie obniżenia poziomu piętrzenia wody do 258,00 m n.p.m., co przełożyło się bezpośrednio

na ograniczenie funkcjonalności obiektu. Skutki tej decyzji były szczególnie dotkliwe dla lokalnej społeczności. Obniżenie poziomu wody mogło zmusić dziesiątki właścicieli pensjonatów, punktów gastronomicznych, obiektów turystycznych oraz szkółek żeglarskich do zamknięcia działalności, pozbawiając ich źródła dochodu. Ponadto mocno zredukowała się funkcja retencyjna zbiornika. Projekt remontu stał się tym samym inwestycją o kluczowym znaczeniu nie tylko inżynierskim, ale i społecznym.

Jednym z najważniejszych działań naprawczych było ograniczenie filtracji wody w obrębie korpusu zapory oraz w jej podłożu. Roboty remontowe obejmowały doszczelnienie istniejącej lewej części zapory czołowej na długości ok. 247 m oraz jej prawej części na długości prawie 153 m, wraz z podłożem, poprzez wykonanie hybrydowej przesłony przeciwnieprzepływowej (HPP). Realizacja tego rodzaju przesłony pozwala znacząco ograniczyć ryzyko powstawania ścieżek filtracyjnych, a jednocześnie zapewnia wysoką szczelność konstrukcji. HPP wykonuje się poprzez połączenie technologii CDMM z technologią grodzic winylowych, wyposażonych w zintegrowaną uszczelkę.

Generalnym wykonawcą inwestycji była firma Soley. Roboty rozpoczęto od realizacji na koronie zapory platformy roboczej o szerokości 8,5 m, z powierzchnią stabilizacją gruntu, umożliwiającą bezpieczne wprowadzenie maszyny wykonującej



Fot. 5. Zapora czołowa zbiornika Cedzyna [13]

doszczelnienie w technologii CDMM oraz palownicy z wibromłotem do instalowania grodzic PVC w przesłonę. Tak przygotowana platforma pozwalała również kontynuowanie prac w każdych warunkach pogodowych (fot. 6).

Przesłona CDMM została wykonana za pomocą trencznika składającego się z miecza wyposażonego w łańcuch o zamkniętej pętli, z ostrzami skrawająco-mieszającymi. Do świeżej mieszanki, powstałej ze zmieszania gruntu korpusu zapory i gruntu w podłożu zapory z zawieszoną twardniejącą, wprowadzono dodatkowe elementy doszczelniające, które zapobiegały tworzeniu się uprzywilejowanych dróg filtracji (fot. 7). Mogą one być skutkiem naporu wody spowodowanego różnicą poziomów wody przed i za wykonywaną przesłoną. Zjawisko to występuje podczas realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych przy stosowaniu innych technologii na bazie zawieszin twardniejących, gdy w trakcie remontu utrzymuje się objętość zbiornika, nawet pomimo obniżonego poziomu piętrzenia. W przypadku HPP nie jest wymagane obniżanie poziomu lustra wody ani opróżnianie zbiornika podczas realizacji prac remontowych.

W przedmiotowym remoncie elementy doszczelniające w postaci grodzic winylowych wprowadzano do przesłony przed związaniem zawiesziny, za pomocą stalowej prowadnicy, tzw. mandreli. Operacja montażu pojedynczej grodzicy o długości 16,0 m i szerokości 0,6 m zajmowała 4-osobowemu zespołowi maks. 15 min. W trakcie prowadzenia robót regularnie kontrolowano szczelność zamków grodzic w celu zapewnienia integralności uszczelnienia. Po zakończeniu robót doszczelniających odtworzono koronę zapory poprzez wykonanie nasypu z gruntu zdeponowanego na składowisku.

Przy integracji obu technologii eliminowane jest ryzyko powstawania uprzywilejowanych dróg filtracji podczas formowania się struktury cementowo-gruntowej w fazie przejściowej z postaci płynnej w stałą.

Dodatkowo badania wykazały, że technologia HPP pozwala osiągnąć gwaranto-



Fot. 6. Platforma robocza na koronie zapory czołowej

wany współczynnik $k_{10} = 1 \times 10^{-11}$ m/s. Ponadto HPP charakteryzuje się zdecydowanie wyższą szczelnością w porównaniu z innymi technologiami

i – zdaniem autorów artykułu – stanowi obecnie najbardziej efektywną metodę poprawy szczelności ziemnych obiektów hydrotechnicznych.



Fot. 7. Realizacja przesłony w technologii HPP

PODSUMOWANIE

W Polsce jest ok. 8600 km obwałowań przeciwpowodziowych. Według służb odpowiedzialnych za stan techniczny tych budowli w przybliżeniu połowa z nich stanowi potencjalne zagrożenie, głównie z powodu zaawansowanego wieku, a ok. 11% wymaga natychmiastowego remontu. Modernizacja wałów z wykorzystaniem przesłon przeciwfiltracyjnych jest szansą na poprawę bezpieczeństwa przeciwpowodziowego przy uwzględnieniu zmian zachodzących w charakterze wezbrań rzek.

Zaprezentowana technologia hybrydowej przesłony przeciwfiltracyjnej jest nowoczesnym rozwiązaniem służącym podwyższeniu szczelności ziemnych obiektów hydrotechnicznych (w tym wałów przeciwpowodziowych), a co się z tym wiąże – poprawie bezpieczeństwa, odporności na zmiany klimatu i funkcjonalności obiektów piętrzących. Ze względu na brak konieczności obniżania poziomu lustra

wody podczas prac remontowych HPP stanowi przełom i wyznacza nowy kierunek w branży hydrotechnicznej. ■

Literatura

- [1] PN-EN 1538:2015-08: Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Ściany szczelinowe.
- [2] Kledyński Z. i in., „Hardening Slurries with Fluidized-Bed Combustion By-Products and Their Potential Significance in Terms of Circular Economy” w *Materials*, nr 14, 2021, art. 9, <https://doi.org/10.3390/ma14092104>.
- [3] Szarek Ł. i in., „Durability, carbon footprint and contaminant immobilization in self-hardening slurries applied to cut-off walls: a review” w *Archives of Civil Engineering*, 69, 2023, art. 3, <https://doi.org/10.24425/ace.2023.145261>.
- [4] Kledyński Z., Rafalski L., *Zawiesiny twardniejące*. Warszawa: Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, 2009.
- [5] Huang X., i inni, „Use of self-hardening slurry for trench cutoff wall: A review” w *Construction and Building Materials*, vol. 286, 2021, art. 122959, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122959.
- [6] ISO 10414-1:2008. Petroleum and natural gas industries – Field testing of drilling fluids – Part 1: Water-based fluids.
- [7] Evans J.C., „Vertical cutoff walls” w *Geotechnical Practice in Waste Disposal*, 1993, s. 430–454.
- [8] Jefferis S. A., „Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs” w *Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, 1981, s. 435–440.
- [9] Jawański W., Nowicki W., Młodawski W., „Realizacja przesłony przeciwfiltracyjnej na lewym przyczółku zapory Chańcza” w *VII Konferencja Techniczna Kontroli Zapór*, Ryto, 1996.
- [10] Kledyński Z., Pisarczyk S., „Zawiesina twardniejąca jako materiał na przesłony przeciwfiltracyjne” w *V Konferencja Techniczna Kontroli Zapór*, Międzybrodzie Żywieckie, 1992.
- [11] Falaciński P., „Odporność filtracyjna zawiesin twardniejących z popiołami fluidalnymi w warunkach agresji chemicznej” w *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska*, nr 76. Warszawa: OWPW, 2018. ISBN 978-83-7814-755-8.
- [12] Borys M., „Przegrody przeciwfiltracyjne z zawiesin twardniejących w korpusach i podłożu wałów przeciwpowodziowych” w *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, nr 2(55), 2012.
- [13] Dokumentacja przetargowa: Remont zapory czotowej zbiornika wodnego Cedzyna (dostęp 9.12.2025), Platforma Zakupowa PGW Wody Polskie: <https://przetargi.wody.gov.pl/wp/postepowania-przetargow/r22941,Remont-zapory-czotowej-zbiornika-wodnego-Cedzyna.html>.