

KRZYSZTOF RADZICKI*, STEPHANE BONELLI**

LOKALIZACJA PROCESÓW FILTRACYJNYCH ORAZ
OKREŚLENIE STOPNIA ICH NASILENIA ZA POMOCĄ
ANALIZY MODELEM IRFTA ŚWIATŁOWODOWYCH
POMIARÓW TEMPERATURYDETERMINATION OF SEEPAGE LOCATION AND ITS
INTENSITY BY APPLICATION OF IRFTA MODEL TO
FIBRE-OPTICS TEMPERATURE MEASUREMENTS
ANALYSIS

Streszczenie

Rozwój procesów filtracyjno-erozyjnych stanowi jedno z głównych zagrożeń dla bezpieczeństwa ziemnego obiektu piętrzącego. Analiza danych z sieci kontrolno-pomiarowej jest podstawowym narzędziem ich rozpoznawania i oceny. W tym zakresie grupą skutecznych i uznanych metod używanych w krajach zachodnich, a prawie nieznaną i niestosowaną w Polsce, jest termomonitoring procesów filtracyjnych. Szczególnie wartościowe są: możliwość światłowodowego pomiaru temperatury oraz precyzyjna ocena zaawansowania procesów filtracyjnych z zastosowaniem analizy termicznej modelem odpowiedzi opóźnionej IRFTA. Transport wody i transport ciepła są procesami sprzężonymi. Napływ w głąb korpusu obiektu ciepła ze zbiornika wraz z filtrującą wodą, jak również zmiany wilgotności gruntu wokół strefy filtracji wpływają na zmiany w rozkładzie temperatury w obiekcie. Przedstawiono model odpowiedzi impulsowej IRFTA (Impulse Response Function Thermal Analysis) umożliwiający, poprzez analizę pomiarów temperatury, lokalizację procesów filtracyjnych oraz określenie stopnia ich natężenia. W artykule opisano przykład aplikacji modelu IRFTA do rozpoznania procesów filtracyjnych w wale kanału Oraison.

Słowa kluczowe: filtracja, przeciek, monitoring zapór, funkcja odpowiedzi impulsowej

Abstract

Erosion and seepage processes development is one of the principal menaces for the hydraulic structure safety. The analysis of the data from the monitoring systems is the principal tool for their identification and their evolution determination. The effective group of the monitoring methods is the thermal-monitoring methods of the seepage process. These methods, very well known in many countries, are almost unknown in Poland. Heat and water transports are the coupled processes. Transport of the heat from the reservoir inward the dams body linked to the water seepage and changes of the humidity in the soil around the seepage zone, both their influence on the heat distribution in the dam. We present IRFTA (impulse response function thermal analysis) model that allows for seepage processes identification and for their intensity determination by analysis of the temperature measurements. Application of IRFTA model for seepage processes determination at the earth dike of the Oraison's canal is described in the paper.

Keywords: seepage, leakage, dams monitoring, thermo-monitoring, impulse response function

* Dr inż. Krzysztof Radzicki, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Dr hab. inż. Stephane Bonelli, Cemagref Aix-en-Provence, Francja.

1. Wstęp

Wczesna i precyzyjna identyfikacja w obiekcie piętrzącym procesów filtracyjnych oraz ocena ich dynamiki zwiększają bezpieczeństwo obiektu. Ponadto znacząco zmniejszają koszty jego eksploatacji przez minimalizację kosztów remontów realizowanych dla dokładnie określonej przestrzeni procesu erozyjnego, w początkowej fazie jego rozwoju. Przekłada się to również na zapewnienie większych gwarancji w gospodarce wodą na danym obiekcie. Poszukuje się więc nowych i rozwija się już istniejące metody monitoringu, aby osiągnąć w tym zakresie jak najlepsze rezultaty. Jedną z metod monitoringu obiektów piętrzących jest termomonitoring.

Metody termomonitoringu opierają się na analizie relacji w transporcie ciepła i wody w ośrodku gruntowym korpusu lub podłoża obiektu. Na rozkład temperatury w obiekcie wpływają przede wszystkim temperatury powietrza i wody w zbiorniku. W niektórych przypadkach znaczący, lokalny wpływ na temperaturę skarp obiektu mogą mieć także inne czynniki zewnętrzne, jak wpływ nasłonecznienia, wiatru i inne. Przy braku filtracji dystrybucja ciepła w gruncie odbywa się wyłącznie przez przewodzenie. Jest to proces relatywnie powolny. W przypadku wystąpienia filtracji, ciepło transportowane jest ze zbiornika znacznie szybciej w głąb korpusu wraz z masą wody. Proces ten nazywa się „adwekcją” i powoduje znaczące zaburzenia termiczne w polu temperatury.

Rozwój światłowodowej technologii umożliwiającej ciągły pomiar temperatury na długości zapory, jak i opracowanie w ostatnich latach nowych modeli [1, 6, 7] analizy procesów termo-hydraulicznych spowodowały, że metody termiczne są rekomendowane obecnie przez Europejski Zespół do spraw Erozji Wewnętrznej Komitetu Wielkich Zapor jako najskuteczniejsze z metod detekcji przecieków i monitoringu procesów filtracyjnych [3, 5].

Niemniej, jeszcze cztery lata temu istotnym problemem była niemożność analizy temperatur w obrębie, odpowietrznej stopy zapory lub wału kanału. Jest to obszar, w którym położenie kabla światłowodowego jest możliwe w już istniejących zaporach, przy niewielkich kosztach i bez istotnego naruszania struktury obiektu. Jednocześnie jest to strefa, w której przepływ wody przez obiekt intensyfikuje się, szczególnie jeśli w tej części obiektu zlokalizowany jest również drenaż. Z drugiej strony, analiza pomiarów temperatury z tej strefy wymaga uwzględnienia wpływu zarówno temperatury powietrza, jak i wpływu temperatury zbiornika (przy nasilonej filtracji lub przecieku). Istniejące modele nie pozwalały na analizę temperatury obiektu, na które w całości lub częściowo wpływa temperatura powietrza, i w konsekwencji umożliwiały analizę pomiarów temperatury wykonanych wyłącznie głęboko w korpusie obiektu. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie było opracowanie opisanego w dalszej części artykułu modelu analizy funkcji odpowiedzi opóźnionej IRFTA (Impulse Response Function Thermal Analysis), który powstał przy współpracy Instytutu Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej i Instytutu Naukowego Cemagref (Francja). Model ten pozwala na analizę pomiarów temperatury zrealizowanych w dowolnym punkcie zapory lub wału kanału, również w ich stopie odpowietrznej. Istotną cechą modelu IRFTA jest również definicja fizyczna jego parametrów. Pozwala ona na określenie fizycznych parametrów analizowanych zjawisk, w tym stopnia ich nasilenia.

2. Opis modelu IRFTA

Transport ciepła opisuje równanie zachowania energii (1)

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial T}{\partial x^2} - q C_f \frac{\partial T}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- T – temperatura,
- C – objętościowa pojemność cieplna ośrodka wodno-gruntowego,
- C_f – objętościowa pojemność cieplna wody,
- λ – przewodność cieplna ośrodka wodno-gruntowego,
- q – prędkość filtracji.

Jest to równanie paraboliczno-liniowe. Odpowiedź opisanego nim układu na impuls obciążenia termicznego przyłożonego na jego granicy jest liniowa. Pozwoliło to na zastosowanie funkcji Greena i teorii systemów liniowych do opracowania modelu IRFTA, umożliwiające analizę mierzonej w korpusie obiektu temperatury jako superpozycji odpowiedzi termicznej ośrodka gruntowego na wpływ temperatury powietrza oraz wpływ temperatury wody (zbiornik, kanał, rzeka). Odpowiedź termiczna gruntu na każde z przyłożonych obciążeń termicznych opisana jest całką splotu czasowego dla funkcji odpowiedzi impulsowej oraz funkcji obciążenia,

$$y(t) = (h * a)(t) = \int_0^t h(t - \tau) a(\tau) d\tau \quad (2)$$

gdzie * jest operatorem splotu.

W modelu IRFTA funkcja odpowiedzi impulsowej jest przybliżona dwuparametrową (α, η) funkcją wykładniczą

$$h(t) \approx R(\alpha, \eta) \quad (3)$$

Powyższa metodyka, przy zastosowaniu metody analizy harmonicznej, umożliwia zdefiniowanie roli parametrów modelu. Parametr η reprezentuje czas opóźnienia odpowiedzi systemu w punkcie pomiaru na przyłożone na granicy obciążenie. Inaczej mówiąc, parametr ten określa czas przejścia sygnału termicznego od skarpy obiektu do punktu pomiarowego. Natomiast parametr α jest współczynnikiem tłumienia sygnału o wartościach od 0 do 1, gdzie 0 oznacza całkowite wytłumienie sygnału, a 1 brak tłumienia sygnału. Biorąc pod uwagę wpływ temperatury powietrza, jak i temperatury wody na temperaturę w korpusie, model zdefiniowany jest następująco

$$T(x, t) = \theta_c + R_w(x, t) * \theta_w(t) + R_p(x, t) * \theta_p(t) \quad (4)$$

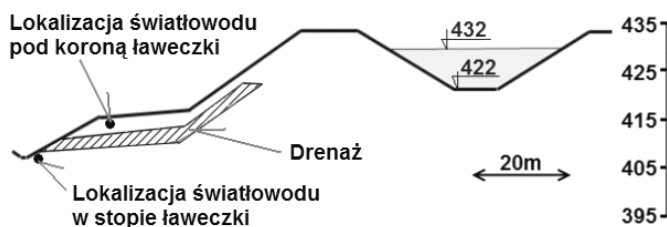
gdzie:

- θ_c – stała,
- R_w, R_p – aproksymacja funkcji odpowiedzi impulsowej odpowiednio dla obciążenia od temperatury wody i od temperatury powietrza,
- θ_w, θ_p – temperatura wody i temperatura powietrza.

Pomierzona temperatura $T(x,t)$ stanowi superpozycję odpowiedzi ośrodka porowatego korpusu obiektu piętrzącego na wpływ temperatur wody i powietrza, które reprezentują odpowiednio drugi i trzeci człon równania (4). Ostatecznie więc model IRFTA posiada cztery parametry. Dwa z nich, α_w i η_w , opisują transformacje sygnału termicznego od strony skarpy odwodnej (obciążenie ciepłem wody). Z kolei parametry α_p i η_p określają transformacje sygnału termicznego od strony skarpy odpowietrznej (obciążenie termiczne ciepłem powietrza). Aplikacja modelu IRFTA polega na modelowaniu ciągów pomiarów temperatury pomierzonych dla poszczególnych punktów pomiarowych na długości światłowodu. W rezultacie dla każdego modelowania określone zostają wartości parametrów modelu, dla których dopasowanie modelu do danych pomiarowych jest najdokładniejsze. Wykorzystanie definicji fizycznej parametrów modelu w relacji do wartości tych parametrów umożliwia szczegółowe rozpoznanie procesów hydro-termicznych w obiekcie, w tym umożliwia określenie lokalizacji i stopnia nasilenia procesów filtracyjnych.

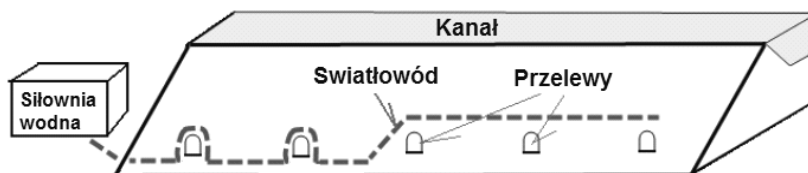
3. Przykład analizy modelem IRFTA pomiarów temperatury zrealizowanych w wale kanału Oraison

Wał kanału Oraison jest jednym z obiektów piętrzących we Francji opomiarowanych termometrycznie siecią światłowodową. Schematyczny przekrój wału pokazano na rysunku 1. Średnia wysokość wału wynosi 27 m. Dno i ściany kanału pokryte są szczelnym ekranem z płyt betonowych. Kabel światłowodowy jest usytuowany w stopie obiektu, na długości około 1000 m (rysunek 2), następnie na długości kilkudziesięciu metrów jego położenie wznosi się. Przez kolejne około 700 m kabel biegnie pod koroną odpowietrznej ławeczki.



Rys. 1. Schemat przekroju wału kanału Oraison

Fig. 1. Schema of fiber optic monitoring system



Rys. 2. Schemat instalacji kabla światłowodowego systemu termomonitoringu

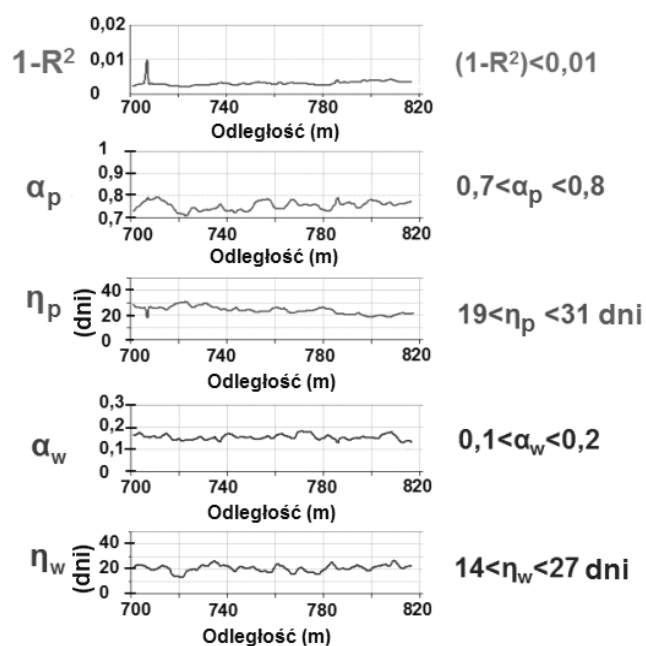
Fig. 2. Schema of fiber optic monitoring system

Do analizy pomiarów temperatury wału Oraison zastosowano model IRFTA (4). Długość czasowa modelowanych serii pomiarowych wynosiła 2 miesiące. Był to minimalny czas pozwalający na dopasowanie modelu do danych, przy czym uzyskane odwzorowania były bardzo dokładne, uzyskano wartości współczynnika korelacji bliskie jedności. W wyniku modelowania rozpoznano w obiekcie pięć stref hydrotermicznych bezpośrednio powiązanych z różnym stopniem zaawansowania procesów filtracyjnych. Analiza wartości parametrów modelu umożliwiła fizyczną interpretację przebiegu badanych procesów oraz pozwoliła określić stopień ich nasilenia. Stwierdzono brak filtracji w wale stanowiący zagrożenie dla tego wału lub wymagający podjęcia jakichkolwiek prac remontowych. W artykule przedstawiamy rezultaty modelowań dla dwóch wybranych stref, które pozwolą w czytelny sposób pokazać metodę aplikacji modelu IRFTA.

Pierwsza prezentowana strefa jest zlokalizowana na długości 700 do 815 m długości światłowodu położonego w stopie odpowietrznej wału. Wyniki zastosowania modelu IRFTA do odwzorowania temperatur pomierzonych w tej strefie przedstawia rys. 3. Analizując wpływ temperatury powietrza na temperaturę światłowodu, obserwujemy wartości parametru α_p określającego tłumienie amplitudy w zakresie między 0,8 a 0,7. Oznacza to odpowiednio tłumienie tylko 20% do 30% amplitudy sygnału, a więc znaczący wpływ temperatury powietrza. Opóźnienie odpowiedzi (η_p) temperatury światłowodu na zmianę temperatury powietrza wynosi w analizowanej strefie 20 do 30 dni. Na rysunku 4 porównano ciągi pomiarowe temperatury powietrza i temperatury światłowodu pomierzonej w jednym z punktów w przedmiotowej strefie. Widać, że wartość opóźnienia pomiędzy maksymalnymi, jak również pomiędzy minimalnymi temperaturami obu krzywych równa jest około 30 dni. Potwierdza to poprawność modelowanych wartości parametrów modelu IRFTA.

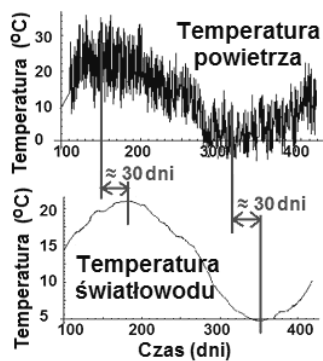
Z drugiej strony wpływ temperatury wody na temperaturę światłowodu jest bardzo mały. Tłumienie amplitudy sygnału termicznego od temperatury wody waha się pomiędzy 80% a 90% (α_w zmienia się od 0,2 do 0,1), a czas odpowiedzi na zmiany temperatury wody (η_w) wynosi między 14 a 27 dni. Powyższe wartości parametrów modelu wykluczają w tej strefie wału nasiloną filtrację. Korelacja modelu z danymi jest bardzo dokładna. Wartości funkcji 1-R2 przedstawione na rys. 4, gdzie R2 jest współczynnikiem korelacji, są bliskie 0. Zakres wartości tej funkcji wynosi od 0 do 1, gdzie 0 oznacza pełne odwzorowanie danych, a 1 brak korelacji.

Druga prezentowana w artykule strefa hydrotermiczna zlokalizowana jest na długości 880 do 950 m światłowodu położonego w stopie odpowietrznej wału. Wyniki modelowania modelem IRFTA są przedstawione na rys. 5. Porównując wartości parametrów pomiędzy przedmiotową a opisaną wcześniej strefą wału, widzimy, że tłumienie sygnału termicznego dla temperatury zbiornika jest mniejsze w przedmiotowej strefie, szczególnie na długości 880 do 925 m światłowodu. Na tym odcinku wartości α_w wahają się od 0,2 do 0,25 (tłumienie wynosi odpowiednio od 80% do 75%). Równocześnie transport ciepła od strony zbiornika jest szybszy niż dla poprzednio omówionej strefy. Wartość η_w wynosi pomiędzy 9 a 20 dni. Powyższe wartości oznaczają niewielkie nasilenie procesu filtracyjnego w rozpatrywanej strefie. Z drugiej strony obserwacja ta znajduje potwierdzenie również w zmianie sygnału z granicy odpowietrznej, który jest bardziej znaczący (α_p wynosi od 0,76 do 0,91) i szybszy (η_p waha się pomiędzy 11 a 20 dniami), niż w przypadku wcześniej rozpatrywanej strefy.



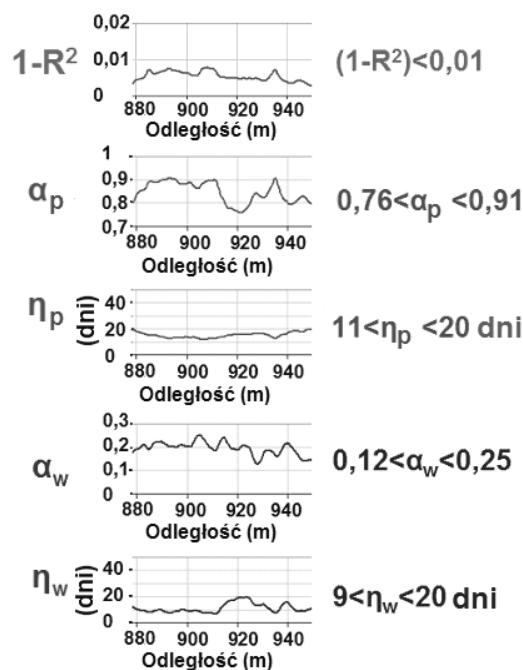
Rys. 3. Wartości parametrów modelu IRFTA dla analizowanych ciągów temperatur pomierzonych nadługości od 700 do 815 m światłowodu

Fig. 3. Values of the IRFTA models parameters for temperature analysis between 700 and 815 m distance of the fiber optic cable



Rys. 4. Opóźnienia w maksymalnych i minimalnych wartościach temperatury światłowodu w stosunku do temperatury powietrza

Fig. 4. Time-lag of the response of the fiber optic temperature for air temperature influence



Rys. 5. Wartości parametrów modelu IRFTA dla analizowanych ciągów temperatur pomierzonych na długości od 880 do 950 m światłowodu

Fig. 5. Values of IRFTA models parameters for temperature analysis between 880 and 950 m distance of the fiber optic cable Schema of fiber optic monitoring system

Wy tłumaczenie fizycznych przyczyn tego zjawiska jest proste. Niewielkie nasilenie filtracji powoduje zwiększenie się obszaru zawilgocenia gruntu, również w kierunku skarpy odpowietrznej. Wpływa to na zmianę parametrów termicznych, takich jak: przewodność cieplna i objętościowa pojemność cieplna ośrodka porowatego i w konsekwencji na szybszy i bardziej znaczący napływ ciepła również ze strony odpowietrznej. Dopiero przy znaczącej filtracji, której nie obserwujemy na przedmiotowym wale, ciepło ze zbiornika będzie dominowało nad ciepłem transportowanym od strony odpowietrznej i spowoduje tłumienie sygnału termicznego ze strony odpowietrznej.

4. Wnioski

Wykorzystanie światłowodów jako czujników pozwala na ciągły w przestrzeni, a zarazem precyzyjny i wczesny termomonitoring procesów filtracyjnych. Innymi istotnymi atutami tej technologii są niezawodność i prostota systemu pomiarowego (jeden kabel światłowodowy, jedna kalibracja). Z powyższych powodów termomonitoring procesów filtracyjnych jest rekomendowany przez Komitet Wielkich Zapór (ICOLD) do stosowania w zaporach ziemnych. Obecnie, co najmniej kilkadziesiąt zapór ziemnych oraz kilkaset kilometrów wałów na całym świecie jest oprzyrządowanych termometrycznie, światłowodowo.

Równocześnie prowadzone są dalsze prace rozwojowe omawianych technologii. W ostatnich kilku latach powstały zaawansowane modele analizy pomiarów temperatury. Jednym z nich jest omówiony w artykule model odpowiedzi funkcji impulsowej IRFTA. Pozwala on na lokalizację procesów filtracyjnych i określanie stopnia ich zaawansowania oraz umożliwia opis procesów termohydraulicznych w odniesieniu do geometrii obiektu. Co bardzo istotne, model ten pozwala na analizę pomiarów zrealizowanych w stopie odpowietrznej obiektu, to jest w strefie, w której można zainstalować system światłowodowego termomonitoringu na istniejącym obiekcie relatywnie małym kosztem i bez istotnego naruszania struktury obiektu. Model IRFTA stosowany jest do analiz procesów filtracyjnych na opomiarowanych termometrycznie francuskich ziemnych obiektach piętrzących.

Literatura

- [1] Artières O., Bonelli S., Fabre J.-P., Guidoux C., Radzicki K., Royet P., Vedrenne C., *Active and passive defences against internal erosion, in Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees*, TUM Edt, 2007, 235-244.
- [2] Cunat P., Beck Y-L, Fry J-J, Courivaud J-R, Fabre J-P, Faure Y-H, Radzicki K., *Leakage detection based on temperature measurement with fiber optic: methods and results*, Hydro 2009.
- [3] Fry J.J., Fell R., *Internal erosion of existing embankment dams and their foundations*, Draft of ICOLD bulletin presented at Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain 2010.
- [4] Johansson S., *Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements*, 17eme Congrès des Grands Barrages, Vienna, Q.65-R.54, 1991, 991-1005.
- [5] Koelewijn A., *IJkdijk Piping experiments-four large-scale field tests leading to failure by seepage erosion, instrumented with both traditional and experimental detection techniques*, Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain 2010.
- [6] Pinette P., *Return on experience from the 2009 IJkdijk piping tests: early detection of Internal Erosion precursors with Fiber Optics Early Warning Systems*. Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain 2010.
- [7] Radzicki K., *Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites (Zastosowanie analizy odpowiedzi opóźnionej w pomiarach temperatury ziemnych obiektów hydrotechnicznych do identyfikacji przecieków)*, Praca doktorska, AgroParisTech, Paryż 2009.