

Krzywa depresji w ziemnych zaporach wodnych przy uwzględnieniu sezonowych zmian temperatury

**Doc. mgr inż. Konstanty Anisimow, doc. dr inż. Sergiusz Dmitrijew,
doc. dr inż. Włodzimierz Osadczy, mgr inż. Denis Velykyi**

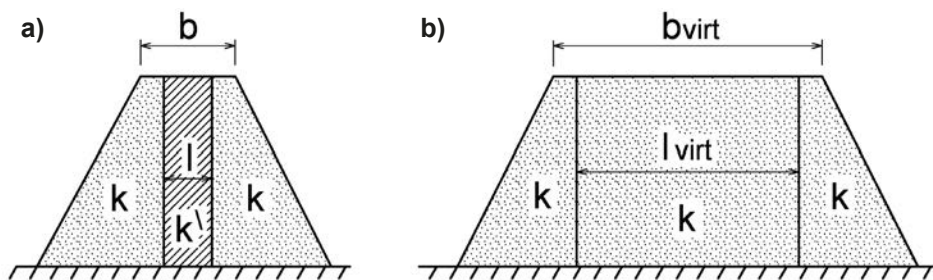
**Państwowa Akademia Budownictwa i Architektury w Odessie,
Katedra budownictwa energetycznego i wodno-gospodarczego**

Negatywne oddziaływanie procesów filtracyjnych w budowlach hydrotechnicznych w znaczącym stopniu wyznacza rodzaj konstrukcji oraz wymiary tych budowli. Tak jest w przypadku projektowania wszystkich rodzajów zapór wodnych. Woda filtruje także pod podstawą tych budowli oraz w miejscu ich styku ze skarpami. Przy tym strumień filtracyjny wywiera parcie na konstrukcje, usiłując wymyć spod nich grunt. Badania awarii konstrukcji hydrotechnicznych prowadzą do wniosku, że duża część z nich jest efektem destrukcyjnego działania filtracji.

Oddziaływanie wód gruntowych na stan osuwającej się skarpy przejawia się w różny sposób. Nasycając grunty, woda zmienia ich charakterystyki fizyko-mechaniczne i częściowo

charakterystyki odkształceń, zmniejszając wartość oporu na przesuw. Oprócz tego, wody gruntowe zwilżając ewentualne powierzchnie poślizgu, zmniejszają siły tarcia. Przy tym, woda wypełniając szkielet gruntowy, obniża normalne naprężenia σ w płaszczyźnie przesuwu i może doprowadzić do prawie całkowitego zaniku tarcia wewnętrznego w gruncie [1]. Zmiana położenia krzywej depresji również prowadzi do zmiany wartości mas przyłączonych w obliczeniach sejsmicznych.

W szeregu badań [2 ÷ 5] odnotowano fakt, że w ziemnych konstrukcjach i filtrach odwrotnych obserwowano wahania krzywej depresji niezwiązane ze zmianą poziomów górnej i dolnej wody. Te wahania często mają cykliczny charakter w okresie



Rys. 1. Metoda wirtualnych długości w obliczeniach ziemnych zapór wodnych
a) ziemna zapora wodna z rdzeniem o szerokości l , współczynnikami filtracji k' ,
b) ziemna zapora wodna, rdzeń jest wypełniony równoważnym masywem gruntu l_{virt} ze współczynnikiem filtracji k

rocznym: letni wzrost poziomu wody i spadek w zimie. Sugerowano, że takie wahania poziomów krzywej depresji powoduje zmiana właściwości lepkości wody poprzez sezonowe wahania temperatury. Zmiany temperatury wody doprowadzają do zmiany jej lepkości i zmieniają opór jej ruchu w ośrodku porowatym. Wszystko to prowadzi do zmiany współczynnika filtracji, który, z kolei, wpływa na położenie krzywej depresji.

Zmienność temperatury kształtuje falę temperatury, która rozprzestrzenia się w korpusie zapory wodnej i stopniowo zanika, co jest spowodowane dwoma czynnikami: filtracją wody w gruncie tworzącym budowlę i jego przewodnością cieplną. Taki charakter rozprzestrzeniania ciepła odpowiada konwekcyjnej wymianie cieplnej. Ograniczając się do liniowego sformułowania zadania i biorąc pod uwagę stałą prędkość filtracji, można zapisać:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial T}{\partial x} U_x \quad (1)$$

gdzie:

T – funkcja zmiany temperatury $T = f(x, \tau)$,

τ – czas,

x – podłużna współrzędna,

U_x – prędkość filtracji w projekcji na oś X , $U_x = \text{const}$,

a – współczynnik doprowadzenia temperatury nasyconego wodą gruntu korpusu zapory wodnej [$\text{m}^2/\text{dobę}$].

Rozwiązanie równania (1) można przedstawić jako funkcję złożonych zmiennych, w postaci:

$$T(x, \tau) = A e^{-Kx} \cos(\sigma\tau - cx) \quad (2)$$

gdzie:

$$K = \frac{1}{2a} \left[\sqrt{\frac{r + U_x^2}{2}} - U_x \right] - \text{wskaźnik tłumienia } (K > 0),$$

$$c = \frac{1}{2a} \left[\sqrt{\frac{r - U_x^2}{2}} \right] - \text{cykliczna częstotliwość drgania za } x,$$

$$r = \sqrt{U_x^4 + 16a^2\sigma^2}.$$

Otrzymana funkcja $T(x, \tau)$ opisuje wahania temperatury w dwufazowym środowisku korpusu zapory wodnej (woda – szkielet gruntowy) z uwzględnieniem wskaźnika tłumienia K i cyklicznymi częstotliwościami drgań w taki sposób: w czasie $\tau - \sigma$ i współrzędnej $x - c$, przy dodatnich x , τ i nie ujemnym U_x przy wahaniami temperatury górnej wody. Można opisać to zależnością (3) (warunek graniczny):

$$T(0, \tau) = A \cos(\sigma\tau) \quad (3)$$

Uwzględniając powyższe uwagi, otrzymano rozwiązanie z dokładnością do stałej. Jest więc:

$$T(0, \tau) = A \cos(\sigma\tau) + T_0$$

$$T(x, \tau) = A e^{-Kx} \cos(\sigma\tau - cx) + T_0 \quad (4)$$

gdzie:

T_0 – średnioroczna temperatura górnej wody.

W celu rozwiązania postawionego zadania zastosowano metodę wirtualnych długości, wykorzystywaną do wyznaczenia położenia krzywej depresji w gruntowych zaporach wodnych z ekranami i rdzeniami.

W praktyce budownictwa wodnego często spotyka się zapory wodne, w części których jest wbudowany rdzeń, wykonany z mało przepuszczalnego gruntu. Jeśli górny i dolny klin zapory wodnej wypełnia się piaskiem, to rdzeń zwykle składa się z gruntów ilastych. Współczynnik filtracji gruntu tworzącego rdzeń zapory wodnej jest zwykle znacznie mniejszy od współczynnika filtracji gruntu samej zapory wodnej. Dlatego krzywa depresji w zakresie grubości obszaru rdzenia ma znacznie większy gradient hydrauliczny niż w pozostałej części korpusu zapory (rys. 1).

Podstawą do wyznaczania krzywej depresji w rozważanym przypadku i wyznaczeniu filtracyjnego przepływu wody jest wirtualne zastąpienie gruntu rdzenia zapory wodnej gruntem z takim samym współczynnikiem filtracji, jak dla głównej masy zapory wodnej. Ten pomysł pociąga za sobą konieczność wprowadzenia w obliczeniach, zamiast rzeczywistej długości rdzenia, takiej długości, przy której otrzymujemy tę samą stratę ciśnienia jak przy rzeczywistym współczynnikiem filtracji rdzenia. Nowy rozmiar rdzenia wprowadzono w celu ułatwienia obliczeń przez akademika Mikołaja Pawłowskiego [6] i jest nazwany przez niego wirtualną długością strumienia filtracyjnego. Po wprowadzeniu, zamiast grubości rdzenia, wirtualnej długości otrzymujemy zapórę wodną o nieco zwiększonej szerokości z jednorodnego gruntu, której obliczenia przeprowadza się według znanych metod dla jednorodnej zapory wodnej. Kreśląc krzywą depresji dla nowego profilu jednorodnej zapory wodnej, odwrotnej do zamiany wirtualnej długości na grubość rdzenia, drogą graficzną można otrzymać przybliżoną krzywą depresji dla zapory wodnej z rdzeniem.

Wzór określający wirtualną długość dla zapory wodnej o prostokątnym rdzeniu, o grubości l , przedstawia się następująco:

$$l_{virt} = \frac{k}{k'} l \quad (5)$$

gdzie:

l_{virt} – wirtualna długość,

l – grubość rdzenia,

k – współczynnik filtracji gruntu zapory wodnej,

k' – współczynnik filtracji gruntu rdzenia.

Współczynnik filtracji zależy od temperatury filtrującej wody $k_f = f(T)$. Łącznie z tym, co podano powyżej, rozwiązanie równania konwekcyjnego przewodnictwa cieplnego (1), otrzymane w postaci (4), wskazuje osłabienie fali cieplnej w korpusie gruntowej zapory wodnej. Dzieliąc poruszającą się falę temperaturową w korpusie gruntowej zapory wodnej na szereg części w dowolnym czasie τ (rys. 2) można otrzymać szereg uśrednionych temperatur t_n^i każdej części jako połowę sumy temperatur na granicach i -tej części.

Temperatury strumienia filtracyjnego w dowolnym punkcie i czasie mogą być wyznaczone za pomocą otrzymanego rozwiązania równania konwekcyjnego przewodnictwa cieplnego (na etapie projektowania) lub bezpośrednimi pomiarami temperatury w piezometrycznej sieci zapory ziemnej przy wystarczającej rozbudowie takiej sieci. Im większa będzie liczba podziałów w ramach granic rozważanego strumienia filtracyjnego, tym wyższa będzie dokładność wykonanych obliczeń. Jak już wspomniano, współczynnik filtracji jest funkcją temperatury $k = f(T)$. Gdy wyznaczono już temperatury do każdej części podziału w ramach długości drogi filtracji, można wyznaczyć wartości współczynników filtracji w każdej części podziału w zależności od tej temperatury strumienia filtracyjnego, która odpowiada obliczonemu współczynnikowi filtracji w danym momencie (rys. 3).

W przypadku ogólnym (dla stanu filtracji bez ciśnienia, w przypadku jednorodnego gruntu korpusu zapory wodnej) w celu określenia równania krzywej depresji wykorzystuje się następujące zależności:

- jednostkowy przepływ przez cały korpus zapory, przyjęty dla całej długości drogi filtracji, wyznacza się według wzoru Dupuit [7]:

$$q = k_f \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} \quad (6)$$

gdzie:

h_1 – głębokość górnej wody;

h_2 – głębokość dolnej wody;

L – długość drogi filtracji.

- jednostkowy przepływ w pojedynczej części długości drogi filtracji wyznacza się z tej samej relacji:

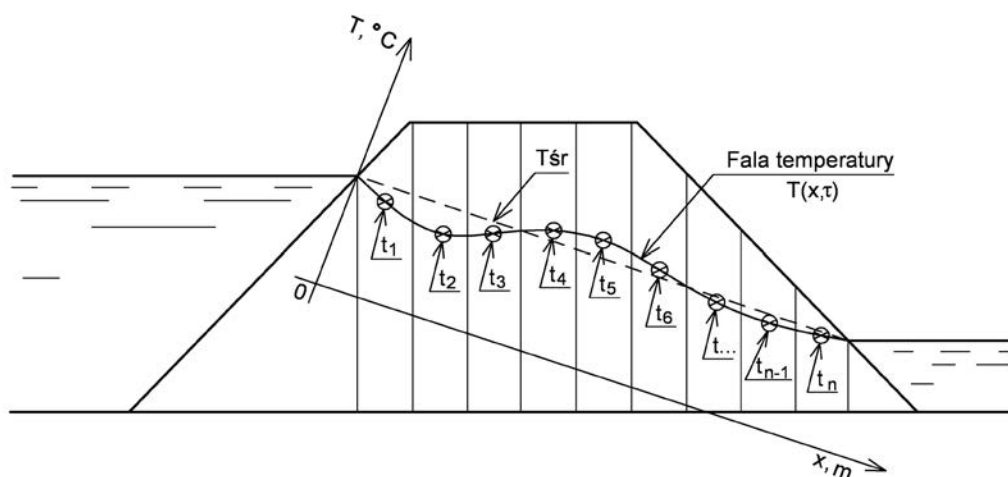
$$q = k_f \frac{h_1^2 - h_x^2}{2x} \quad (7)$$

gdzie:

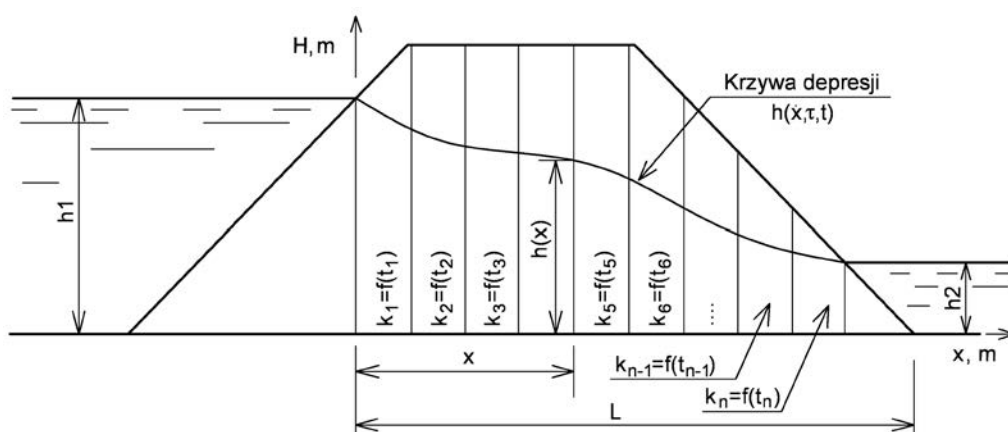
h_x – ciśnienie na końcu analizowanej części drogi filtracji;

x – długość uwzględnionej części drogi filtracji.

Przyrównując prawe części równań (6) i (7) oraz przy założeniu, że współczynnik filtracji w jednorodnej zaporze wodnej jest jednakowy we wszystkich przekrojach zapory wodnej, otrzymuje się:



Rys. 2. Tłumiona fala temperatury $T(x, \tau)$ w korpusie ziemnej zapory wodnej z podaniem temperatur w poszczególnych częściach podziału



Rys. 3. Wyznaczenie współczynników filtracji w podziale obliczeniowym w zależności od temperatury filtrującej wody

$$\frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} = \frac{h_1^2 - h_x^2}{2x} \quad (8)$$

Rozwiązując równanie (8) względem h_x , uzyskuje się wyrażenie do wyznaczenia krzywej depresji w stanie bez ciśnienia filtracji w przypadku jednorodności gruntu korpusu zapory wodnej i podstawy nieprzepuszczalnej.

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - (h_1^2 - h_2^2) \frac{x}{L}} \quad (9)$$

Mimo założenia, że grunt korpusu jest jednorodny, to współczynniki filtracji w każdym przekroju zapory wodnej mogą różnić się od współczynnika filtracji zdefiniowanego zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak też otrzymanych z obliczeń znormalizowanych w temperaturze 10°C. Biorąc pod uwagę powyższe, można postawić wniosek, że w celu określenia prawdziwego przebiegu krzywej depresji wzór (9) należy stosować z pewnymi warunkami. Po pierwsze, powinna być obliczona wirtualna długość każdej części podziału według wzoru (10):

$$l_v = \frac{k_{f0}}{k_f} l \quad (10)$$

gdzie:

l – długość podziału,

k_{f0} – współczynnik filtracji korpusu zapory wodnej, sprowadzony do temperatury 10°C,

k_f – rzeczywisty wskaźnik współczynnika filtracji w wybranym czasie, w przekroju ziemnej zapory wodnej ze współrzędną X na długości drogi filtracji, przy znanej temperaturze T , wyznaczonej w podziale według zależności (4).

Po drugie, długość drogi filtracji L i współrzędna X we wzorze (9) powinny być określone z zależności (11):

$$L = \sum_{i=1}^n l_{v,i}^i \quad x = \sum_{i=1}^m l_v^i \quad (11)$$

gdzie:

n i m – liczba obliczeniowych podziałów na długości drogi filtracji i liczba obliczeniowych podziałów od początku drogi filtracji do obliczanego przekroju.

WNIOSKI

Przedstawione w pracy propozycje zależności pozwalają na wyznaczenie położenia krzywej depresji uwzględniające okresowe temperaturowe zmiany filtrowanej wody w dowolnym

czasie. Przeprowadzone obliczenia testowe pokazują wpływ sezonowych zmian temperatury na wahania krzywej depresji w ramach +/- 7%. Takie wahania krzywej depresji mogą prowadzić do obniżenia współczynnika stateczności dolnej powierzchni skarpy ziemnej zapory wodnej poniżej dopuszczalnego.

Rozwiązania teoretyczne dotyczące reżimu filtracji wody pod ciśnieniem potwierdzono wynikami badań laboratoryjnych na zmodyfikowanym przyrządzie Darcy'ego z umieszczonymi czujnikami temperatury i są zgodne z wynikami obserwacji zmiany reżimów filtracji oraz temperatur wykonanych przez autorów w naturze i opisanych w literaturze [3, 5].

LITERATURA

1. Гольдштейн М. Н.: Исследования устойчивости оползневых масс и способы ее повышения / М. Н. Гольдштейн // Борьба с оползнями, обвалами и размывами на ж. д. Кавказа, Москва: Трансжелдориздат, 1961, 15-32.
2. Дмитриев С. В.: Необходимость учета влияния сезонных климатических воздействий при определении положения депрессионных кривых в грунтовых подпорных сооружениях / С. В. Дмитриев // Вестник ОГАСА, №36, Одесса: ОГАСА, 2009, 144-147.
3. Отчет по научно исследовательской работе. Обследование плотины и водосброса Беляевского водохранилища и разработка рекомендаций для капитального ремонта / [В. А. Зедгенидзе, К. И. Анисимов, С. В. Дмитриев и др.], Одесса: ОГАСА, ЭВС, 2008.
4. Ермакова Н. Н. Температурные наблюдения за фильтрацией на Пироговском гидроузле / Н. Н. Ермакова, Ф. И. Люкманова, инженеры (ФГУП «Канал имени Москвы») // Гидротехническое строительство, №6, 2002, 23-27.
5. Отчет о научно-исследовательской работе. Исследование работы конструкций и элементов сухого дока и проведение комплексных наблюдений в соответствии с инструкцией / [Шипилов А. В., Анисимов К. И., Бельская Л. М. и др.], Одесса: ОИСИ, ГС, 1990.
6. Чугаев Р. Р.: Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета) / Р. Р. Чугаев, Ленинград: Энергия, 1967.
7. Чугаев Р. Р.: Гидравлика (техническая механика жидкости). Изд. 2 / Р. Р. Чугаев, Ленинград: Энергия, 1971.
8. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации: ДСТУ Б В.2.1-23:2009, [действителен с 2010-10-01], Киев: УкрНДПНТБ, 2009.