

Zastosowanie modelowania matematycznego w analizie procesów wymiany ciepła w korycie rzecznym

Sebastian R. BIELAK

Współczesną politykę wodną krajów członkowskich Unii Europejskiej określa Ramowa Dyrektywa Wodna (dyrektywa 2000/60/WE). Podkreśla ona konieczność dążenia do poprawy stanu środowiska wodnego, w tym ochrony wód powierzchniowych i ekosystemów wodnych, znajdujących się w dobrym stanie ekologicznym, oraz podniesienie jakości ekologicznej ekosystemów zdegradowanych na skutek działalności człowieka. Jednym z elementów oceny jakości środowiska wodnego jest jego stan fizyczno-chemiczny. Bardzo przydatnym narzędziem, które może być stosowane w ocenie tego stanu w rzekach i potokach, jest model jakości wód. W takim modelu, na bazie matematycznego odwzorowania geometrii koryta, jego parametrów hydraulicznych oraz wymiany ciepła z otoczeniem, wywołanej zjawiskami meteorologicznymi oraz niektórymi procesami termodynamicznymi,

można symulować nie tylko procesy fizyczno-chemiczne, ale również biologiczne, wpływające na jakość wody.

Matematyczny model jakości wód płynących może być stosowany w celu:

- lokalizacji obszarowych źródeł zanieczyszczeń,
- wyznaczenia dopuszczalnych (dobowych, miesięcznych itp.) ładunków zanieczyszczeń dla istniejących źródeł punktowych,
- zaplanowania położenia wylotów kanałów odprowadzających do rzek oczyszczone ścieki z oczyszczalni,
- ustalenia przyczyn pogarszania się jakości wody na danym odcinku cieku,
- lokalizacji odcinków cieku, w których na skutek zanieczyszczenia wody występują niekorzystne dla organizmów wodnych warunki środowiskowe uniemożliwiające ich prawidłowy rozwój,
- ochrony cieków przeznaczonych do lokalizacji ujęć wody pitnej,

- prognozowania zmian jakości wody przy symulacji różnych wariantów rozwoju zlewni,

- wyboru optymalnej strategii rozwoju zrównoważonego zlewni.

Spośród wymienionych zagadnień najczęściej poddawane są analizie te, które prowadzą do zdefiniowania zagrożeń ekologicznych zasobów wodnych danego obszaru, takich jak: długotrwały deficyt tlenowy, eutrofizacja wód, zakwaszenie, zanieczyszczenie substancjami toksycznymi (np. syntetycznymi związkami organicznymi lub metalami ciężkimi), zasolenie oraz pogorszenie warunków sanitarnych. W ocenie jakości wód powierzchniowych dominującą rolę odgrywają modele matematyczne, w tym w szczególności modele numeryczne, wykorzystujące rozwiązania przybliżone, natomiast modele analityczne oparte na dokładnych rozwiązaniach równań fizyki matematycznej są stosowane rzadko.

Biebrzańskie Bagna w granicach Basenu Dolnego Biebrzy



Program Qual2k i Dolina Biebrzy

Niezbędnym składnikiem każdego modelu jakości wód płynących są zdefiniowane procesy wymiany ciepła, jakie zachodzą między korytem rzeczny i środowiskiem. Przykładem może tu być model nizinnej rzeki Biebrzy, do którego konstrukcji wykorzystany został program Qual2k – opracowany przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska U. S. EPA. Pierwotna wersja tego programu (o nazwie Qual2e) powstała już w 1987 r., po czym w dość krótkim czasie zyskała dużą popularność wśród użytkowników zajmujących się jednowymiarowym modelowaniem jakości rzek. Liczne zastosowania programu, w tym zarówno przez amerykańskie służby związane z ochroną środowiska, jak i ośrodki badawcze z całego świata spowodowały, że w ostatnich dwóch dekadach Qual2k był sukcesywnie rozbudowywany i doskonalony.

Matematyczny model wymiany ciepła między korytem Biebrzy Dolnej a otaczającym go środowiskiem naturalnym obejmował 50-kilometrowy odcinek tej rzeki, rozciągający się od miejscowości Osowiec aż po ujście do Narwi. Hydrauliczną podbudowę modelu wymiany ciepła stanowił model przepływu wody w korycie w stanie ustalonym. Zintegrowane ze sobą oraz skalibrowane wymienione modele posłużyły do skonstruowania dwóch modeli jakościowych, opisujących przemiany biochemiczne i fizyczne substancji chemicznych, transpor-



Kanal Rudzki powyżej ujścia do Biebrzy

towanych w wodzie oraz zgromadzonych w osadach dennych Biebrzy. Zastosowanie modelu wymiany ciepła zostało ograniczone do symulacji krótkich, kilkugodzinnych przedziałów czasowych, w których założono, że przepływ wody w korycie i warunki meteorologiczne, wpływające na wymianę ciepła, były stałe.

Dane niezbędne do skonstruowania i weryfikacji modelu zostały zgromadzone 29 lipca i 25 września 2007 r. oraz 23 lipca 2008 r., na terenie Basenu Dolnego Biebrzańskiego Parku Narodowego. W badaniach terenowych zmierzono: temperaturę powierzchniowej warstwy wody w Biebrzy (17 punktów pomiarowych, głębo-

kość pomiaru 0,5 m) oraz w ujściowych odcinkach jej dopływów punktowych, tj. w Kanale Rudzkim, Klimaszewnicy, Wissie i Kosódce, temperaturę wody w Biebrzy w strefie dennej (6 punktów pomiarowych, głębokość pomiaru 1,8–4,5 m), współrzędne geograficzne punktów pomiarowych (z dokładnością do 5 m), a także obserwowano warunki pogodowe. Program Qual2k został użyty do stworzenia serii trzech symulacji stanu ustalonego (po jednej na każdy dzień pomiarów terenowych), które razem stanowiły substytut modelu dynamicznego, opisującego wymianę ciepła między rzeką a jej otoczeniem w dłuższym horyzoncie czasowym.

Panorama rozlewisk Biebrzy widziana z wieży widokowej w Osowcu-Twierdzy





Podmokły ols na Czerwonym Bagnie

W celu uzupełnienia bazy danych pozyskano wyniki pomiarów meteorologicznych prowadzonych w stacji klimatologicznej IMGW „Biebrza”, znajdującej się najbliżej obszaru badawczego (miejscowość Biebrza w granicach Basenu Środkowego BPN). Dane te obejmowały takie parametry jak: temperatura powietrza, temperatura punktu rosy, prędkość wiatru, zachmurzenie oraz nasłonecznienie. Ponadto pozyskano dane na temat wysokości opadu atmosferycznego z posturunków opadowych IMGW znajdujących się w granicach Basenu Dolnego lub jego otuliny, tzn. w miejscowościach: Osowiec, Burzyn, Radziłów oraz Wizna.

Konstrukcja modelu

Podstawowym celem skonstruowania modelu wymiany ciepła było odzwierciedlenie wpływu zjawisk meteorologicznych i termodynamicznych na procesy biochemiczne zachodzące w rzece, zarówno w wodzie, jak i na granicy woda – osady dennie. Istota działania modelu opierała się na matematycznym odwzorowaniu wymiany ciepła między Biebrzą Dolną

a jej bezpośrednim otoczeniem, w której uwzględniono:

- wymianę ciepła wywołaną przepływem wody, w tym: transport w korycie, punktowe i obszarowe dopływy lub odpływy wody z koryta,
- wymianę ciepła spowodowaną oddziaływaniem czynników atmosferycznych, takich jak np. promieniowanie słoneczne, wiatr, temperatura powietrza itp.,
- wymianę ciepła wywołaną procesami oraz zjawiskami zachodzącymi na granicy między wodą denną a osadami zgromadzonymi na dnie rzeki.

Procesy uwzględnione w modelu wymiany ciepła zostały opisane za pomocą powszechnie znanych równań matematycznych, uzyskanych drogą empiryczną lub za pomocą fizycznych badań laboratoryjnych, dostępnych w publikacjach dotyczących fizyki atmosfery oraz meteorologii. Podstawowym źródłem ciepła w korycie rzeczonym było promieniowanie słoneczne. Ponieważ ponad 99% całej energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi przypada na fale o długości poniżej 4 μm , dlatego też

mówiąc o promieniowaniu słonecznym właściwie powinno się używać określenia „słoneczne promieniowanie krótkofalowe”. Całkowite ciepło przechodzące z powietrza atmosferycznego do rzeki zostało określone jako funkcja promieniowania słonecznego, które w trakcie przenikania przez kolejne warstwy atmosfery zostaje częściowo rozproszone, zaabsorbowane lub odbite, natrafiając na różnego rodzaju naturalne przeszkody. Tymi przeszkodami są chmury (w atmosferze) lub też wysoka roślinność, porastająca brzegi rzeki, która częściowo lub całkowicie zacienia koryto rzeczne.

Istotnym składnikiem bilansu ciepła w korycie Biebrzy Dolnej okazało się długofalowe promieniowanie emitowane przez atmosferę w kierunku powierzchni Ziemi, czyli tzw. promieniowanie zwrotne. Odgrywało ono szczególne znaczenie w czasie dni pochmurnych, bo jego wartość była wprost proporcjonalna do rodzaju i wysokości zachmurzenia. Innym ważnym elementem modelu było przewodnictwo ciepła, w tym zarówno molekularne (cząsteczkowe) jak i turbulencyjne, które mogło wystąpić na granicy zwierciadła wody rzecznej i powietrza atmosferycznego. Przewodnictwo molekularne to przenoszenie ciepła przez molekuły z ośrodka o wyższej temperaturze do ośrodka o niższej temperaturze, natomiast przewodnictwo turbulencyjne to przenoszenie ciepła na skutek ruchu poszczególnych ośrodków. Ostatnią wielkością fizyczną, która została uwzględniona w modelu, był strumień przepływu ciepła między osadami dennymi a znajdującą się nad nimi wodą.

Kalibracja i weryfikacja modelu

Kalibracja modelu wymiany ciepła między Biebrzą a jej otoczeniem polegała na dostosowaniu wartości parametrów meteorologicznych (temperatura powietrza, temperatura punktu rosy, zachmurzenie, prędkość wiatru, nasłonecznienie) oraz

Narew w okolicach wsi Strękowa Góra





Wiosenne rozlewiska Biebrzy w pobliżu wsi Burzyn

fizycznych (temperatura wód przepływających obszarowo między korytem rzeki i mokradłami), do wartości temperatury wody w korycie rzeki, uzyskanej w wyniku bezpośrednich pomiarów terenowych w punktach kontrolnych. Dla każdego pojedynczego odcinka rzeki odbywało się to metodą kolejnych przybliżeń, w których wartość analizowanych parametrów była szacowana w sposób pośredni w oparciu o procedurę numerycznego przybliżania wyników symulacji. Do kalibracji modelu wykorzystano dane pochodzące z pomiarów wykonanych 29 lipca 2007 r. oraz 25 września 2007 r., natomiast dane z 23 lipca 2008 r. zostały wykorzystane do weryfikacji wcześniej skalibrowanych symulacji. Wartości wielkości fizycznych charakteryzujących właściwości cieplne wody i osadów dennych, takie, jak gęstość, pojemność cieplna, dyfuzyjność cieplna czy miąższość warstwy osadów biorącej udział w wymianie ciepła, zostały wstępnie oszacowane na podstawie dostępnej literatury fachowej, a następnie poddane kalibracji.

Pozyskane dane meteorologiczne z godzin: 8:00, 14:00 i 20:00 poddano interpolacji, ponieważ model wymagał danych w godzinowym kroku czasowym. Odczytane w ten sposób wartości wprowadzono do arkusza kalkulacyjnego programu Qual2k jako dane początkowe, które następnie poddano kalibracji. Konsekwencją krótkiego (kilkugodzinnego) czasu pomiarów temperatury wody w rzece oraz wykorzystania do obliczeń hydraulicznych przepływu wody w Biebrzy modelu stanu ustalonego było to, że symulacja oddziaływania warunków meteorologicznych na wymianę ciepła w kory-

cie rzeczonym została przeprowadzona przy założeniu niezmienności w czasie – skalibrowanych dla poszczególnych odcinków rzeki – wartości parametrów meteorologicznych. Zmienność tych parametrów zachodziła natomiast przestrzennie, tzn. ich wartość była różna wzdłuż biegu Biebrzy Dolnej, na całej jej długości, wynoszącej ok. 50 km.

Podsumowanie efektów symulacji

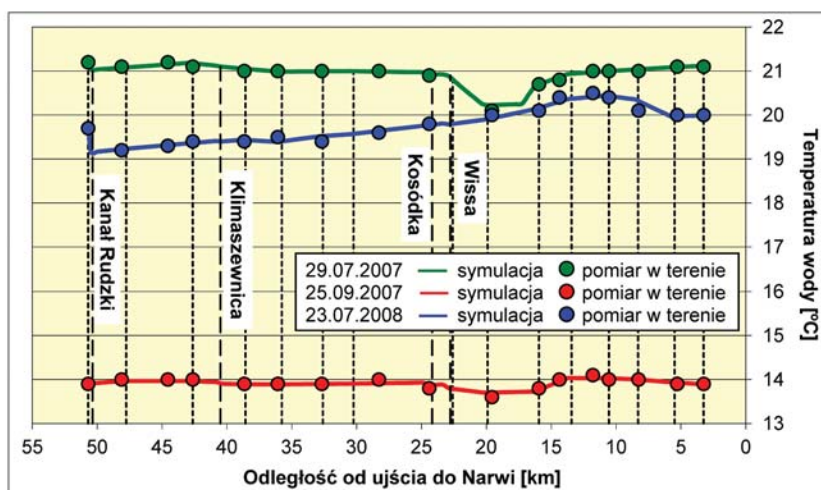
Wyniki badań potwierdziły dużą przydatność programu Qual2k nie tylko do symulacji wymiany ciepła wywołanej przepływem wody w korycie, ale również wpływu zjawisk meteorologicznych i termodynamicznych na wymianę ciepła między rzeką a jej otoczeniem, do którego zaliczono atmosferę, osady dennie oraz mokradła. Uzyskane efekty symulacji kom-

puterowych można podsumować w następujący sposób:

We wszystkich okresach pomiarowych (lipiec i wrzesień 2007, lipiec 2008) punktowe dopływy Biebrzy zasilają rzekę wodami chłodniejszymi od niej nawet o kilka stopni Celsjusza. Najwyższa różnica temperatur dotyczyła Klimaszewnicy (2-5°C), w następnej kolejności była Kosówka (1-2°C) oraz Wissa i Kanał Rudzki (1°C). Schładzający wpływ Kanału Rudzkiego oraz Wissy był szczególnie widoczny latem 2008 r., kiedy to w korycie Biebrzy zanotowano niskie stany wody (rys.). Spadek temperatury wody w rzece poniżej ujścia Kanału Rudzkiego wyniósł wtedy 0,5°C.

Wpływ warunków pogodowych, w tym w szczególności nasłonecznienia, na termikę wód Biebrzy Dolnej był proporcjonalny do wielkości zmierzonego przepływu w kory-

Rozkład temperatury wody w Biebrzy Dolnej w poszczególnych symulacjach modelu





Na przełomie kwietnia i maja kniec błotna (*Caltha palustris*), czyli popularny kaczeniec, masowo kwitnie na rozlewiskach Biebrzy

cie. Przy stanach niskich (lipiec 2008) zaobserwowano wyraźny wzrost temperatury wody wraz z biegiem rzeki, a różnica między początkiem i końcem 50-kilometrowego odcinka rzeki wynosiła 1,5°C. Z kolei przy wysokich stanach wody (lipiec i wrzesień 2007) jej temperatura była zdecydowanie bardziej ustabilizowana, nie zaobserwowano tendencji do spadku lub wzrostu wartości z biegiem rzeki, a ewentualne odchylenie od wartości średniej wynosiło nie więcej niż 0,5°C. Najwyraźniej wpływ promieniowania słonecznego, nawet w środku lata, był zbyt mały, aby możliwe było nagrzanie ogromnych mas wody transportowanych korytem lub przepływających obszarowo między rzeką a otaczającymi ją mokradłami.

Na odcinkach, gdzie dochodziło do obszarowej wymiany wody między korytem Biebrzy i mokradłami, występowały różnice w temperaturze wód powierzchniowych. Zazwyczaj były one niewielkie i wynosiły 1-2°C, jednak na niektórych odcinkach były zdecydowanie większe i sięgały nawet 5-10°C. Można tu wyróżnić trzy sytuacje:

- temperatura wód zasilających Biebrzę była wyższa o 1-2°C – najwyraźniej rzeka odbierała swoje własne wody odprowadzone kilka kilometrów wcześniej na płytkie, wystawione na działanie promieniowania słonecznego rozlewiska, w których ruch wody był nieznaczny, przez co woda szybciej się nagrzewała;
- temperatura wód zasilających Biebrzę była niższa o 1-5°C – sytuacja analogiczna jak wyżej, z tą tylko różnicą, że wody pochodziły z fragmentów mokradel porośniętych wysokimi na 2-3 m trzcinowiskami, które zacieniały taflę wody i w ten sposób ograniczały jej nagrzewanie;
- temperatura wód zasilających Biebrzę była niższa o 5-10°C – w tym przypadku nasuwa się przypuszczenie, że Biebrza była zasilana mieszanymi wodami powierzchniowo-podziemnymi. Zjawisko to było najbardziej widoczne w lipcu 2008 r., gdy przy niskich stanach wody występowało na kilku odcinkach rzeki. Dodatkowym argumentem przemawiającym za tą tezę jest fakt, iż skoro w Klimaszewnicy (która jest otwartym kanałem biegnącym wśród pól, bez zadrzewień i roślinności w litoralu) zanotowano temperaturę wody niższą niż w Biebrzy nawet o 5°C, to tym bardziej zarośnięte trzcinowiskami i zasilane wodami podziemnymi mokradła mogły zasiląć Biebrzę wodami chłodniejszymi o 5-10°C.

Pomiary w lipcu 2008 r. wykazały, że na całej długości Biebrzy Dolnej temperatura wody przy dnie była wyższa o 0,2-0,5°C w stosunku do temperatury mierzonej 0,5 m pod powierzchnią zwierciadła wody. Zjawisko to zaobserwowano przy bardzo dobrych warunkach pogodowych (silne nasłonecznienie) oraz różnej głębokości na-

pełnienia koryta, wynoszącej od 1,8 do 4,3 m. Przyczynę zjawiska należy upatrywać w wydzielaniu ciepła przy dnie na skutek:

- tarcia o dno mas wodnych transportowanych korytem rzeczonym,
- przebiegu biochemicznych procesów rozkładu materii organicznej zgromadzonej na dnie.

Na odcinku od 13,4 do 15,9 km biegu Biebrzy (licząc od ujścia do Narwi) dochodziło do wyraźnego wzrostu temperatury wody w rzece, na skutek:

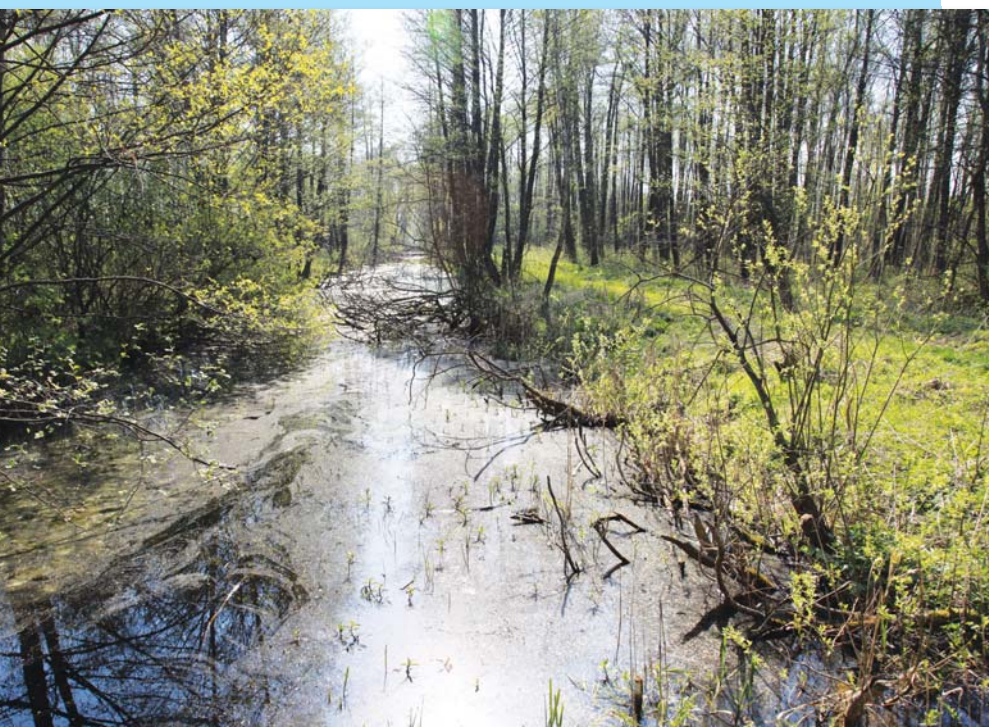
- zmiany parametrów geometrycznych koryta – szerokość rzeki gwałtownie się zwiększała (nawet do ponad 30 m), natomiast głębokość napęlenia zmniejszała, np. w lipcu 2008 r., przy niskich stanach wody, głębokość Biebrzy na wysokości wsi Brzostowo wynosiła miejscami zaledwie 0,5 m;
- obszarowego zasilania rzeki wodami cieplejszymi o kilka stopni Celsjusza – ponieważ okoliczny teren to podmokłe pastwiska z niemal doszczętnie wygryzioną roślinnością przez stada krów i koni, należy przypuszczać, że źródłem cieplejszych wód są nagrzane od słońca, płytkie rozlewiska, z których woda powoli przesącza się w kierunku koryta Biebrzy.

W końcowym odcinku Biebrzy, tj. od 3 do 10,5 km, zaznaczył się wpływ wysokiej roślinności nadrzecznej (korony drzew, zarośla wierzbowe), która zacieniała taflę wody nieznacznie obniżając jej temperaturę. ♦

Literatura

- S. C. Chapra 1997, *Surface Water – Quality Modeling*. Wydawnictwo McGraw-Hill Companies Inc., New York-Toronto.
- S. C. Chapra, G. J. Pelletier, H. Tao 2008., *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University, Medford.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej. Dziennik Urzędowy Wspólnot Europejskich L 327/1 z 22.12.2000, str. 275-346.
- P. Holnicki, Z. Nahorski A. Żochowski 2000., *Modelowanie procesów środowiska naturalnego*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej i Zarządzania, Warszawa.
- K. Kożuchowski (red.) 2006, *Meteorologia i klimatologia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- J. L. Schnoor 1996, *Environmental Modeling. Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil*. Wydawnictwo John Wiley & Sons, Inc., New York-Singapore.

Zarastający Kanał Kapicki nad Środkową Biebrzą



Dr inż. Sebastian R. Bielak – Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Politechnika Krakowska.