

Richard Ashley, Wojciech Dąbrowski, Katarzyna Mendel, Piotr Stępień

Empiryczna ocena zależności pomiędzy wskaźnikami jakości ścieków w kanalizacji

Ładunki zanieczyszczeń, w tym również bakterii [1], odprowadzane przez przelewy burzowe do rzek pochodzą głównie ze spływów powierzchniowych oraz z wymywania osadów ściekowych obecnych w kanałach. Dlatego też transport zanieczyszczeń z powierzchni zlewni do wpustów deszczowych i dalej do kanałów oraz przelewów burzowych jest przedmiotem intensywnych badań służących budowie modeli matematycznych, których zadaniem jest dostarczenie informacji o zmianie jakości ścieków i odkładaniu się osadów w kanałach ogólnospławnych w okresach bezdeszczowych. Następnie modele te wykorzystywane są do badania transportu nanieczyszczeń w kanałach w czasie pogody deszczowej. Ponieważ w tym transporcie uwzględnia się również zanieczyszczenia wymywane z osadów ściekowych, a więc każdy model matematyczny musi być kalibrowany zarówno dla pogody deszczowej jak i bezdeszczowej. Kalibrowanie tych modeli jest niezwykle kosztowne i np. w Wielkiej Brytanii jeden tydzień kompleksowego monitoringu jakości ścieków w pojedynczym punkcie kontrolnym sieci kanalizacyjnej kosztuje około tysiąc pięćset funtów. W celu zmniejszenia tych kosztów w modelach matematycznych korzysta się z zależności występujących pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami składu ścieków w kanałach sanitarnych. W technologii ścieków od dawna dobrze udokumentowano korelacje pomiędzy ChZT , BZT_5 i OWO .

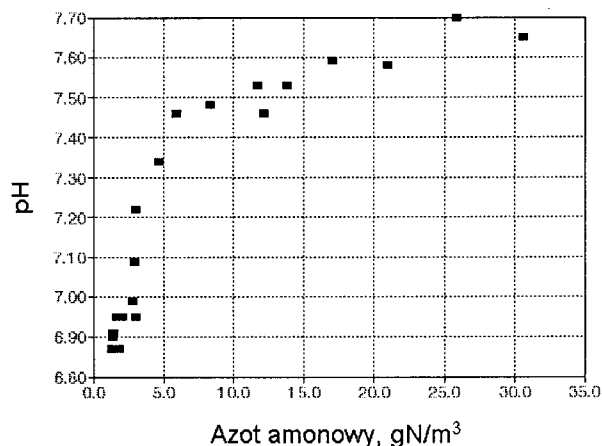
Przygotowując zestaw danych do obliczeń transportu masy w kanalizacji programami numerycznymi (np. *Mouse*, czy *Mosquito*) monitoruje się tylko stężenia niektórych zanieczyszczeń, a inne z bliżej nieokreślonym prawdopodobieństwem oblicza na podstawie tych pomierzonych. Takie postępowanie jest często niezbędne aby obniżyć koszty badań do wielkości możliwej do zaakceptowania przez instytucje pokrywające koszty matematycznego modelowania transportu masy w zlewniach kanalizacyjnych. Jednakże niesie to ze sobą niebezpieczeństwo powstania znaczących błędów obliczeń i w rezultacie istotnego zawyżenia (lub zaniżenia) przewidywanych zrzutów zanieczyszczeń przez przelewy burzowe.

W niniejszym artykule przedstawiono próbę weryfikacji zalecanych w raporcie *Mousetrap* [2] zależności występujących pomiędzy stężeniami zanieczyszczeń i natężeniem przepływu ścieków w kanałach ogólnospławnych w czasie pogody

bezdeszczowej. Do dyskusji nad stężeniami azotu amonowego oraz liczebnością bakterii *coli*, bakterii *coli* typu kałowego i paciorkowców (*Streptococcus*) wykorzystano wykonane przez Uniwersytet Abertay Dundee analizy ścieków bytowo-gospodarczych w punkcie pomiarowym zlokalizowanym w zlewni kanału ogólnospławnego drogi Perth, położonej w mieście Dundee (Szkocja). Zlewnia ta obejmuje powierzchnię 76 ha, o średnim spadku terenu 4%. Co godzinę, w czasie pogody bezdeszczowej, pobierano w sposób opisany w artykule [3] próby ścieków z kanału ogólnospławnego o wymiarach 1.060×690 mm.

Wyniki badań

W czterech spośród pięciu całodobowych pomiarów odczynu ścieków uzyskano wyraźną zależność pH od stężenia azotu amonowego. W jednym przypadku korelacja ta była wykładnicza (rys.1), a w pozostałych z powodu braku wyraźnej zależności funkcyjnej poszukiwano korelacji liniowych otrzymując wyniki zebrane w tabeli 1.



Rys. 1. Zależność pomiędzy pH i stężeniem azotu amonowego w ściekach bytowo-gospodarczych w kanale ogólnospławnym drogi Perth (17-04-92)

Współczynniki regresji wyznaczono osobno dla każdego jednodobowego zbioru wyników analiz metodą najmniejszych kwadratów. Chociaż we wszystkich badanych przypadkach wyższym wartościom odczynu ścieków odpowiadały wyższe stężenia azotu amonowego, wartości współczynników korelacji w jednym z przypadków sugerowały korelacje wysokie i w dwóch umiarkowane, a testy *t* Studenta na poziomie istotności $\alpha=0,01$ świadczyły o zachodzeniu korelacji, to jednak współczynniki kątowe liniowej zależności różniły się ponad sześciokrotnie. Powodem tak dużego rozrzutu wyników mogły być chociażby różnice w wartościach pojemności buforowej ścieków.

Prof. R. Ashley: University Abertay Dundee, Department of Civil Engineering, Surveying and Building, Bell Street, Dundee, DD1 1HG, Scotland
Dr hab.inż. W. Dąbrowski: Politechnika Krakowska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków oraz: Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Mgr inż. K. Mendel: Politechnika Krakowska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Tabela 1. Zależność pomiędzy pH i stężeniem azotu amonowego (gN/m^3) w ściekach

Data	Liczba pomiarów	Liczba stopni swobody	Współczynnik korelacji	Zależność
23-04-92	18	16	0,6386	$\text{pH}=0,04[\text{N}-\text{NH}_4^+]+6,75$
30-04-92	20	18	0,8020	$\text{pH}=0,069[\text{N}-\text{NH}_4^+]+6,47$
20-05-92	21	19	0,6814	$\text{pH}=0,028[\text{N}-\text{NH}_4^+]+6,54$

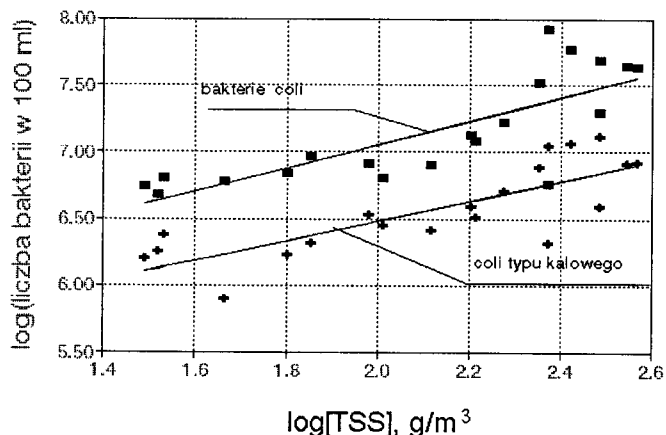
Tabela 2. Zależność pomiędzy stężeniem zawiesin ogólnych (TSS) w g/m^3 i liczbą bakterii *coli* (TC) w $\text{mln}/100 \text{ cm}^3$ ścieków

Data	Liczba pomiarów	Liczba stopni swobody	Współczynnik korelacji	Zależność
06-02-92	18	16	0,5478	$\log[\text{TC}]=1,107\log[\text{TSS}]+4,009$
17-04-92	21	19	0,2036	$\log[\text{TC}]=-0,325\log[\text{TSS}]+8,0184$
23-04-92	20	18	0,7912	$\log[\text{TC}]=0,901\log[\text{TSS}]+5,3$
30-04-92	22	20	0,1002	$\log[\text{TC}]=0,121\log[\text{TSS}]+6,6$

Tabela 3. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu ścieków w kanale ogólnospławnym drogi Perth i stężeniami wybranych wskaźników zanieczyszczeń w czasie pogody bezdeszczowej (06-02-92) (stężenia zanieczyszczeń w g/m^3 , przepływy w dm^3/s)

Wskaźnik	Liczba pomiarów	Liczba stopni swobody	Współczynnik korelacji	Zależność
$\text{N}-\text{NH}_4^+$	18	16	0,7744	$[\text{N}-\text{NH}_4^+]=1,103\text{Q}+7,601$
BZT_5	18	16	0,8037	$[\text{BZT}_5]=26,305\text{Q}-57,301$
ChZT	18	16	0,7072	$[\text{ChZT}]=57,21\text{Q}+81,903$
Zawiesiny	18	16	0,6820	$[\text{TSS}]=21,801\text{Q}+0,101$

Pomiary liczebności bakterii *coli* przeprowadzone metodą membranową [4] wykazały dla dwóch spośród czterech przebadanych dób zależności liniowe o stosunkowo niskich współczynnikach korelacji (0,7912, 0,5478) pomiędzy logarytmem ze stężenia zawiesin (TSS) i logarytmem z liczby bakterii *coli* (TC) (rys.2). W dwóch przypadkach współczynniki korelacji liniowej były tak niskie (0,2036 i 0,1002), że świadczyły o słabej korelacji, a wartości t dla nich i dla odpowiednich liczb stopni swobody, obliczone z testu t Studenta, były znacznie mniejsze od wymaganych dla poziomu istotności $\alpha=0,1$.



Rys. 2. Próba ustalenia zależności liniowych pomiędzy stężeniem zawiesin i liczbą bakterii w ściekach bytowo-gospodarczych w kanale ogólnospławnym drogi Perth (23-04-92)

Prognozowana w poradniku *Mousetrap* [2] korelacja:

$$\log[\text{TC}]=0,8\log[\text{TSS}]+6,1 \quad (1)$$

różniła się znacznie od wyników pomiarów co najmniej w dwóch z czterech całodobowych serii pomiarowych. Jednym z powodów rozbieżności wyników mogła być inna temperatura ścieków, mająca wpływ na przeżywalność i rozmnażanie bakterii *coli*. Ponadto dokładność metod oznaczania liczby bakterii *coli* jest mała. W poradniku *Mousetrap* [2] zalecana do stosowania jest również liniowa zależność pomiędzy logarytmem z liczby bakterii *coli* typu kałowego (FC) i logarytmem ze stężenia zawiesin ogólnych (TSS) w postaci:

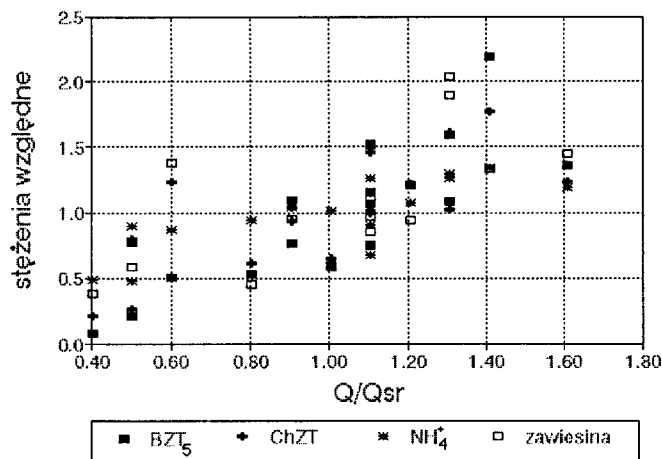
$$\log[\text{FC}]=1,2\log(\text{TSS})+4,56 \quad (2)$$

Niestety do przetestowania tej zależności dysponowano jedynie czterema dobowymi pomiarami stężenia zawiesin i liczby bakterii *coli* typu kałowego (mierzonej metodą membranową), z których jedynie jeden wskazywał na statystycznie istotną rosnącą zależność liniową logarytmu z liczby bakterii *coli* typu kałowego od logarytmu ze stężenia zawiesin ogólnych. Wyniki pomiarów nie wskazywały również na jakąś inną, niż liniową, zależność funkcyjną. Na podstawie tych danych dobrano metodą najmniejszych kwadratów współczynniki a i b równania liniowego:

$$\log[\text{FC}]=a \log[\text{TSS}]+b \quad (3)$$

uzyskując dla danych z 23-04-92 następujące wartości: $a=0,701$ i $b=5,021$, przy współczynniku korelacji równym 0,892. Liczebność bakterii określono w $\text{mln}/100 \text{ cm}^3$. W pozostałych dniach wartości współczynników korelacji były bardzo niskie.

Według poradnika *Mousetrap* [2] dla potrzeb numerycznej symulacji transportu zanieczyszczeń w kanalizacji przyjmuje się wstępny godzinowy rozkład wartości natężeń przepływu w kanale, jak również wskaźników bakteriologicznych. Jest on w dobie roboczej taki sam dla BZT₅, ChZT, azotu amonowego i zawieszin. Przeprowadzone w kanale drogi Perth pomiary wskazują jednak na znaczne zróżnicowanie godzinowego rozkładu wartości tych wskaźników.



Rys. 3. Zależność średnich stężeń azotu amonowego, zawieszin ogólnych (TSS), BZT₅ i ChZT od względnego natężenia przepływu ścieków w kanale ogólnospławnym drogi Perth w czasie pogody bezdeszczowej (06-02-92)

Na rysunku 3 pokazano, jak zmieniały się stężenia względne wybranych wskaźników ścieków w zależności od względnych wartości natężeń przepływu w kanale. Zależności takie mogą częściowo wynikać z erozji osadów w godzinach największych natężeń przepływu [5] oraz z większego procentowego udziału wód infiltracyjnych w godzinach nocnych. Otrzymanych korelacji nie można było tym razem porównać z wartościami zalecanymi w literaturze, gdyż mają one charakter indywidualny dla poszczególnych zlewni i znacznie większe natężenia przepływu w kanałach głównych nie muszą odpowiadać większym stężeniom zanieczyszczeń niż występujące w kanałach bocznych, przez które przepływa mniej ścieków.

Podsumowanie

Matematyczne modelowanie transportu zanieczyszczeń w kanałach ogólnospławnych ma istotne znaczenie dla oceny rzutu ładunków zanieczyszczeń przez przelewy burzowe do odbiorników. Zastosowanie metod matematycznego modelowania wymaga kalibracji modeli teoretycznych w oparciu o kosztowne badania polowe, które w praktyce ogranicza się zakładając na podstawie danych literaturowych zależności zachodzące pomiędzy stężeniami poszczególnych zanieczyszczeń. Porównano tutaj wyniki pomiarów przeprowadzonych w dniach roboczych w zlewni kanału ogólnospławnego drogi Perth (Dundee) z zależnościami zalecanymi przez autorów poradnika *Mousetrap* [2]. Zawarty jest w nim zestaw wstępnych danych do brytyjskiego programu obliczeniowego *Mosquito*, który służy do numerycznej symulacji transportu zanieczyszczeń w kanałach.

Wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów zależności liniowe pomiędzy logarytmami z liczby bakterii *coli* i logarytmami ze stężenia zawieszin ogólnych charakteryzowały się niskimi współczynnikami korelacji i odbiegały od wzoru podanego w poradniku *Mousetrap* [2].

O ile statystyka stanowi wartościowe narzędzie zarówno na etapie planowania eksperymentu jak i interpretacji rezultatów, o tyle wnioskowanie o występowaniu jednoparametrycznych zależności pomiędzy stężeniami zanieczyszczeń w kanałach ogólnospławnych w czasie pogody bezdeszczowej jest ryzykowne jeżeli zależności te nie mają ściśle określonej interpretacji fizycznej. Tak więc ostrożnie należy podchodzić do przyjmowania w oparciu o poradnik *Mousetrap* [2] wstępnych wartości stężeń poszczególnych zanieczyszczeń ścieków. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza matematycznego modelowania transportu bakterii, które mogą zmieniać populację w ściekach [6], osadzać się i być wymywane [5] oraz rozcieńczane wodami infiltracyjnymi. Temperatura ścieków i wielkość zlewni kanalizacyjnej są przecież parametrami wpływającymi na rozwój i obumieranie bakterii. Tak więc zalecane w literaturze [2] zależności pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami fizyczno-chemicznymi ścieków i liczebnością bakterii pomijają zapewne statystycznie istotne czynniki, jak temperaturę ścieków, wielkość zlewni i jej zagospodarowanie [6] i dlatego ich stosowanie może prowadzić do znaczących błędów w obliczeniach.

W badaniach nie określono żadnych statystycznie istotnych korelacji pomiędzy liczbą bakterii *Streptococcus faekalis* a składem chemicznym ścieków. Powodem tego mogło być zwierzęce pochodzenie tych bakterii, chociaż wartość ilorazu ich liczby do liczby bakterii *coli* typu kałowego [7] nie pozwalała na jednoznaczne potwierdzenie tej hipotezy.

LITERATURA

1. R. ASHLEY, W. DĄBROWSKI: Dry and storm weather transport of coliforms and faecal streptococci in combined sewage. Proc. of Conference on the Sewer as a Physical, Chemical and Biological Reactor, 1994, Aalborg, p. 11.
2. R. CRABTREE, R. GENT, S. SPOONER: *Mousetrap*: Specification of pollutant and sediment characteristic default values. *Mousetrap development Group Report No. UC 1950*, 1993, p. 32.
3. W. DĄBROWSKI, R. ASHLEY: Transport osadów w kanałach ściekowych – pobór próbek ścieków i osadu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1994, nr 5, ss. 135–139.
4. C. JEFFERIES, H.K. YOUNG, I. MCGREGOR: Microbial aspects of sewage and sewage sludge in Dundee, Scotland. *Wat. Sci. Tech.*, 1990, 22, No. 10/11, pp. 47–52.
5. C. NALLURI, W. DĄBROWSKI: Need for new standards to prevent deposition in wastewater sewers. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 1994, 120, No. 5, pp. 1031–1043.
6. C. JEFFERIES, H.K. YOUNG, I. MCGREGOR: Microbial aspects of sewage and sewage sludge in Dundee, Scotland. Proc. 2nd Wageningen Conference on Urban Storm Water Quality and Ecological Effects Upon Receiving Waters, 1989, p. 6.
7. G. TCHOBANOGLOUS: *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw Hill Book Company, Metcalf & Eddy Inc., 1979 (2nd edition), p. 920.

Empirical Evaluation of Correlation Between Quality Parameters of Sewerage Wastewater

The correlation between some of the pollutants present in the wastewater was analysed in terms of monitoring data obtained under dry weather conditions by Abertay University, Dundee in a nearby combined sewer. Increased pH levels were always concomitant with increased ammonia nitrogen concentrations.

There was a significant scatter in the number of total and faecal coliforms. The relationships between bacterial indicator species and TSS suggested in the literature were poorly confirmed by this study. This lack of correlation can be attributed to the impact of temperature on bacteria survival.