

Wybrane problemy projektowania i modelowania odwodnień terenów

Selected problems of design and modeling of drainage systems

ANDRZEJ KOTOWSKI, BARTOSZ KAŹMIERCZAK, PAWEŁ LICZNAR

Zaprezentowano ewolucję europejskich standardów projektowania i eksploatacji (wg PN-EN 752:2008 i PN-EN 752:2017) oraz metodologię badań niezawodności działania systemów odwodnień terenów zurbanizowanych (wg DWA-A 118:2006), w tym z uwzględnieniem zmian klimatu (wg Merkblatt Nr. 4.3/3:2009). Omówiono zasady prowadzenia tego typu badań z kryteriami do identyfikacji przeciążeń kanałów, odnośnie do wylewów i podtopień terenów. Podjęto próbę standaryzacji zasad modelowania zjawiska opad-odpływ w skanalizowanych zlewniach miejskich, do zarządzania ryzykiem zagrożeń środowiskowych. W szczególności, zaprezentowano metodologię identyfikacji, kalibracji i walidacji parametrów modeli hydrodynamicznych z uwzględnieniem niestacjonarności czasowo-przestrzennej opadów.

Słowa kluczowe: kanalizacja, modelowanie hydrodynamiczne, kalibracja i walidacja modelu

The evolution of European standards for design and operation (according to PN-EN 752:2008 and PN-EN 752:2017) and the methodology for testing the reliability of urban drainage systems (according to DWA-A 118:2006), including climate change (according to Merkblatt No. 4.3 / 3: 2009), are presented. Principles of conducting this type of research with the criteria for identification of channel overloads, regarding floods and flooding of areas were discussed. An attempt was made to standardize the principles of modeling the phenomenon of precipitation-outflow in sewer municipal catchments, to manage the risk of environmental hazards. In particular, the methodology for the identification, calibration and validation of hydrodynamic model parameters was presented, taking into account the temporal unstationary of precipitation.

Keywords: sewerage, hydrodynamic modeling, calibration and validation of the model

Wprowadzenie

Nagłe powodzie (ang. *Flash Flood*), wywołane przez intensywne opady (ulewne bądź nawalne) i związane z nimi gwałtowne spływy powierzchniowe wód, wyrządzają szkody na obszarach położonych w naturalnych bądź sztucznych zagłębieniach terenowych (podtopienia, erozje gleb, osuwiska). Powodzie miejskie (*Urban Flood*) związane są dodatkowo z niewydolnymi systemami kanalizacyjnymi – przy postępującym uszczelnianiu powierzchni i zaniku terenów biologicznie czynnych oraz zauważalnym wpływie zmian klimatycznych [1]. Orientacyjnym kryterium dla opadów stwarzających potencjalnie zagrożenie wystąpienia wylewów z kanałów i podtopień terenów jest dobowa suma wysokości ≥ 30 mm, a dla opadów stwarzających już realne zagrożenie ≥ 50 mm. Opady o intensywności ≥ 70 mm/dobę klasyfikowane są jako stwarzające zagrożenie powodziowe, a ≥ 100 mm/dobę jako katastrofalne [2].

Znaczna część wybudowanych w Polsce po II Wojnie Światowej systemów kanalizacji deszczowej bądź ogólnospławnej zwymia-

rowana została nieodpowiednimi obecnie metodami, z wykorzystaniem formuły Błaszczyka na natężenie deszczów (opartej na danych opadowych z przełomu XIX i XX wieku), która zaniża obecne natężenia opadów o około 40% we Wrocławiu (dla danych z lat 1960-2009) [3], o 36% w Warszawie oraz średnio o 33% w całym kraju (1986-2015) [4]. Tak zwymiarowane systemy mogą nie spełniać współczesnych, europejskich standardów odnośnie do dopuszczalnych częstości wylewów z kanałów, prowadzących do podtopień terenów. Wynika stąd konieczność badania niezawodności ich działania i podejmowanie już dzisiaj działań zaradczych, polegających np. na budowie zbiorników retencyjno-infiltracyjnych czy kanałów odciążających.

Ryzyko zaistnienia niekorzystnych w skutkach zjawisk typu *Flash Flood* czy *Urban Flood* określa się jako kombinację prawdopodobieństwa wystąpienia oraz miary ich negatywnych skutków. Ocena ryzyka takich zagrożeń, w warunkach zmieniającego się klimatu, jest niezbędna dla racjonalnej gospodarki wodnej miast. Dotyczy to zwłaszcza problemów bezpiecznego

projektowania i wymiarowania oraz eksploatacji systemów odwodnień terenów, tj. kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej. Badania niezawodności działania systemów kanalizacyjnych, zalecane normą PN-EN 752 i Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2014 r., są rzadko w Polsce stosowane, głównie z braku aktualnego atlasu opadów maksymalnych, w tym baz danych z lokalnego monitoringu opadów i przepływów w sieciach, a także dopiero tworzonych i wdrażanych podstaw metodycznych tworzenia modeli hydrodynamicznych systemów odwodnień terenów [3, 5]. W wielu instytucjach (nie tylko naukowych) prowadzone są obecnie prace badawcze zmierzające do standaryzacji tego typu badań w kraju i wdrożenia ich do praktyki inżynierskiej.

Ewolucje standardów projektowania i badań niezawodności kanalizacji

Osiągnięcie niezawodnego działania systemów kanalizacyjnych nie jest w pełni możliwe ze względu na stochastyczny charakter opadów. Dążyć możemy jedynie do bezpiecznego ich projektowania i eksploata-

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kotowski, dr inż. Bartosz Kaźmierczak, prof. PWr. dr hab. inż. Paweł Licznar – Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej

cji, tzn. dostosowywania systemów do przyjęcia maksymalnych (prognozowanych) strumieni wód opadowych, o częstotliwości występowania równej dopuszczalnej częstotliwości wystąpienia wylania na powierzchnię (i podtopienia terenu). Dotyczy to zwłaszcza przyszłych obciążen opadami – intensyfikowanymi przez zmiany klimatu [6].

Dotychczasowa polska norma (zharmonizowana z normą europejską) PN-EN 752 z 2008 r. ogranicza dopuszczalną częstotliwość wylewów z kanalizacji, czy też braku możliwości odbioru wód opadowych, do rzadkich częstotliwości (C) ich występowania w dostosowaniu do czterech rodzajów zagospodarowania przestrzennego terenów zurbanizowanych, tj.: od raz na 10 lat dla terenów wiejskich, do raz na 20, 30 lub 50 lat dla terenów miejskich (tab. 1) [7]. Natomiast do projektowania/wymiarowania nowych czy modernizowanych systemów kanalizacyjnych cytowana norma zaleca odpowiednio niższe częstotliwości deszczu obliczeniowego: od raz na rok dla terenów wiejskich, do raz na 2, 5 lub 10 lat dla terenów miejskich (tab. 1), przy których nie mogą występować przeciążenia kanałów grawitacyjnych, np. działanie pod ciśnieniem.

Tabela 1. Kryteria projektowe deszczu obliczeniowego i dopuszczalnych wylewów z kanałów wg PN-EN 752:2008 [7]

Lp.	Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość deszczu C ¹ [1 raz na C lat]	Częstość wylewów [1 raz na C lat]
1	Tereny wiejskie	1 na 1	1 na 10
2	Tereny mieszkaniowe	1 na 2	1 na 20
3	Centra miast, tereny usług i przemysłu	1 na 5	1 na 30
4	Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami, itp.	1 na 10	1 na 50

¹ Dla projektowej częstości deszczu obliczeniowego (C) nie mogą wystąpić żadne przeciążenia systemów kanalizacyjnych.

Tabela 2. Przykładowe kryteria projektowe deszczu obliczeniowego do wymiarowania kanałów bez przeciążeń wg PN-EN 752:2017 [8]

Lp.	Lokalizacja terenu	Częstość C ¹ deszczu obliczeniowego [1 raz na C lat]	Prawdopodobieństwo przekroczenia w roku [%]
1	Tereny wiejskie	1	100
2	Tereny mieszkaniowe	2	50
3	Centra miast, tereny usług i przemysłu	5	20
4	Kolej podziemna, przejścia podziemne	10	10

¹ Dla wybranej częstości projektowej deszczu obliczeniowego (C) nie może wystąpić działanie kanałów pod ciśnieniem – z przeciążeniem.

Nowa wersja normy PN-EN 752 z 2017 roku przewiduje możliwość przyjmowania większych częstości (C) projektowych deszczu obliczeniowego dla czterech dotychczasowych lokalizacji terenów zurbanizowanych (tab. 2), cytując [8]: „kryteria te mogą się znacznie różnić między krajami”. Jednocześnie powtarzane jest zastrzeżenie (tab. 1 i 2), że dla wybranej częstości projektowej deszczu obliczeniowego (C) nie może wystąpić działanie kanałów pod ciśnieniem – z przeciążeniem. Biorąc pod uwagę prognozowany wzrost intensywności opadów w przyszłości, celowe jest już obecnie przyjmowanie do wymiarowania kanałów większych częstości projektowych deszczu obliczeniowego, o czym będzie jeszcze mowa.

Istotną zmianą w PN-EN 752:2017 dotyczy zaleceń co do dopuszczalnej częstości wylewów z kanałów, prowadzących do podtopień terenów zurbanizowanych. Proponuje się mianowicie uzależnienie tej częstości od siedmiostopniowej skali wpływu zagrożenia na środowisko – dla siedmiu przykładowo zdefiniowanych lokalizacji terenów (tab. 3).

Tabela 3. Przykłady kryteriów projektowych dla zagrożeń wylewami z kanałów i podtopieniami terenów wg PN-EN 752:2017 [8]

Lp.	Wpływ zagrożenia	Przykładowe lokalizacje	Częstość C ¹ występowania wylewów [1 raz na C lat]	Prawdopodobieństwo przekroczenia w roku [%]
1	Bardzo mały	Drogi lub otwarte przestrzenie z dala od budynków	1	100
2	Mały	Tereny rolnicze (w zależności od wykorzystania, np. pastwiska, grunty orne)	2	50
3	Mały do średniego	Otwarte przestrzenie wykorzystane do celów publicznych	3	30
4	Średni	Drogi lub otwarte przestrzenie w pobliżu budynków	5	20
5	Średni do wysokiego	Zalania zamieszkałych budynków z wyłączeniem piwnic	10	10
6	Wysoki	Głębokie zalania zamieszkałych piwnic lub przejazdów pod ulicami	30	3
7	Bardzo wysoki	Infrastruktura krytyczna	50	2

¹ Częstości występowania wylewów (C) powinny być podwyższone (prawdopodobieństwa zredukowane) wszędzie tam, gdzie wody powodziowe szybko się przemieszczają. Przy przebudowie istniejących systemów, gdy osiągnięcie tych samych kryteriów projektowych dla nowych systemów będzie pociągać za sobą wysokie koszty, można rozpatrywać niższe wartości (C).

odnośnie do wylewów z kanalizacji i podtopień dotyczą „terenów wiejskich”, na których obowiązywała dotychczas arbitralnie zalecana dopuszczalna częstość wylewów raz na C = 10 lat (tab. 1). Obecnie zaleca się tam różnicowanie zagrożeń wylewami (tab. 3), począwszy od C = 1 rok dla dróg lokalnych z dala od budynków, C = 2 lata dla łąk czy

gruntów ornych, C = 3 lata dla przestrzeni wykorzystywanych do celów publicznych, C = 5 lat dla dróg w pobliżu budynków, a dopiero C = 10 lat dla budownictwa niepodpiwniczonego. Na „terenach mieszkaniowych” wg PN-EN 752:2008, gdzie dotychczas zalecano dopuszczalną częstość wylewów raz na C = 20 lat (tab. 1), należy obecnie wyróżniać (tab. 3) np. budownictwo podpiwniczone z suterrenami czy też przejazdy pod ulicami, dla których proponuje się dopuszczalną częstość zagrożeń na poziomie raz na C = 30 lat (analogicznie jak dla „centrów miast, terenów usług i przemysłu” wg zaleceń PN-EN 752:2008). Dla infrastruktury krytycznej – podziemnych obiektów komunikacyjnych (typu kolej podziemna, przejścia podziemne) należy przewidywać dopuszczalną częstość zagrożeń na poziomie raz na C = 50 lat – co jest zgodne w obu wersjach PN-EN 752:2008:2017. Jednocześnie zastrzega się, że podane w tabeli 3 wartości dopuszczalnych częstości zagrożeń wylewami, jako przykładowe, mogą być zarówno podwyższone „w przypadku szybko przemieszczających się wód powodziowych”, ale także obniżane „w przypadku przebudowy istniejących systemów, gdy osiągnięcie tych samych kryteriów projektowych dla nowych systemów pociąga za sobą zbyt wysokie koszty”. Ponieważ systemy kanalizacyjne projektuje się na perspektywę 50÷100 lat, ta druga możliwość (tj. obniżania dopuszczalnej częstości zagrożeń czyli zamiennie podwyższania prawdopodobieństwa przekroczenia) jest wysoce dyskusyjna, wobec prognozowanego wzrostu intensywności opadów w przyszłości.

W celu zarządzania ryzykiem wylewów z kanałów i podtopień terenów należy więc każdorazowo uwzględniać zarówno zalecaną (przykładowo) częstość wystąpienia, jak i przewidzieć – oszacować skutki zalań, tj. uszkodzenia mienia, a zwłaszcza wpływ na zdrowie i bezpieczeństwo ludzi. Proponowane wg PN-EN 752:2017 częstości projektowe zagrożeń mają więc charakter fakultatywny (uznaniowy), jako że norma nie jest obecnie aktem prawnym. Zgodnie z Ustawą z 12 września 2002 roku o normalizacji, normy (w tym międzynarodowe EN i ISO) należy traktować jako źródło przepisów pozaprawnych, na równi z publikowanymi wynikami prac badawczych (np. odnośnie do metod wymiarowania kanalizacji z uwzględnieniem wzrostu intensywności opadów w przyszłości). Obecny stan prawny nakłada na projektantów większą odpowiedzialność, w tym obowiązek bezpiecznego projektowania, tj. zgodnie ze sztuką budowlaną, wynikającą z najlepszej dostępnej wiedzy technicznej: BAT (*Best Available Techniques*), BMP (*Best Management Practices*) czy LID (*Law Impact Development*) [3]. Projektanci i eksploatacyjni systemów kanalizacyjnych ponoszą więc osobistą odpowiedzialność etyczną i prawną za ewentualne, negatywne skutki swoich decyzji.

Realne zagrożenia środowiskowe powodowane wylewami z systemów kanalizacyjnych można stwierdzić albo w trakcie ich eksploatacji, bądź wykazać przy pomocy modelowania hydrodynamicznego. W drugim przypadku, pomocne są zalecenia niemieckie, wg DWA-A118 z 2006 r. [9], wprowadzające pojęcie częstości nadpiętrzenia do poziomu terenu do obliczeń sprawdzających działanie kanalizacji (tab. 4).

Tabela 4. Dopuszczalne częstości nadpiętrzeń do obliczeń sprawdzających działanie kanalizacji wg DWA-A118:2006 [9]

Lp.	Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość nadpiętrzeń [1 raz na C lat]
1	Tereny wiejskie	2
2	Tereny mieszkaniowe	3
3	Centra miast, tereny usług i przemysłu	rzadziej niż 5
4	Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami, itp.	rzadziej niż 10 ¹⁾

¹⁾ Gdy nie są stosowane lokalne środki zabezpieczające wówczas „50”

Wówczas w pośredni sposób wyznaczyć można stan przecięcia, który jest najbliższy występującemu w dalszej kolejności wylaniu i podtopieniu terenu. Przy czym poważne zagrożenia wystąpią wówczas, gdy woda znacznie przekroczy poziom krawężników ulic i wtargnie na teren przyległych posesji, a tam do piwnic budynków, suterenu, garaży itp.

Biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy na temat trendów zmian klimatu do 2100 roku,

przy dzisiejszym wymiarowaniu nowych kanałów czy modelowaniu nadpiętrzeń w istniejących systemach powinniśmy uwzględniać prognozowany wzrost intensywności opadów w przyszłości. Przykładowo, w pracy [10] wykazano, że dzisiejsze intensywności opadów o powtarzalności statystycznej np. raz na pięć lat ($C = 5$) będą w przyszłości występowały około dwukrotnie częściej ($C = 2$). Na tej podstawie, do weryfikacji przyszłych nadpiętrzeń i wylewów z kanalizacji dla Nadrenii Północnej-Wesfalii zalecono zmiany częstości opadów projektowych w dotychczasowych standardach (DWA-A118:2006 i PN-EN 752:2008) – wg wytycznych Merkblatt Nr. 4.3/3:2009 (tab. 5) [11].

Tabela 5. Zmiany do DWA-A118:2006 i PN-EN 752:2008 częstości opadów do identyfikacji przyszłych przecięcia kanałów wg Merkblatt Nr. 4.3/3:2009 [11]

Lp.	Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość deszczu [1 raz na C lat]	
		– do weryfikacji nadpiętrzeń	– do weryfikacji wylewów
1	Tereny wiejskie	3 zamiast 2	50 zamiast 10
2	Tereny mieszkaniowe	5 zamiast 3	100 zamiast 20
3	Centra miast, tereny usług i przemysłu	10 zamiast 5	100 zamiast 30

Przyjmując analogiczną logikę wywodów, do wymiarowania nowych kanałów deszczowych (w perspektywie 50÷100 lat), zwłaszcza w przypadku głównych kolektorów czy braku możliwości modelowania ich przecięcia przyszłymi opadami, celowe jest już obecnie przyjmowanie większych częstości projektowych deszczu obliczeniowego, w stosunku do podawanych w standardach PN-EN 752:2008:2017 (tab. 1 i 2). Propozycje zmian do fakultatywnego stosowania sformułowano w tabeli 6, na podstawie prac [3, 11].

Tabela 6. Proponowane zmiany do PN-EN 752:2008:2017 częstości opadów do wymiarowania nowych kanałów, jako potencjalne środki dostosowawcze do skutków zmian klimatu

Lp.	Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość projektowa deszczu	
		– wg [3]	– wg [11]
1	Tereny wiejskie	2 zamiast 1	2 zamiast 1
2	Tereny mieszkaniowe	5 zamiast 2	3 zamiast 2
3	Centra miast, tereny usług i przemysłu	10 zamiast 5	10 zamiast 5
4	Infrastruktura krytyczna	50 zamiast 10	20 zamiast 10

Wielkościami zmiennymi przy projektowaniu i modelowaniu systemów kanalizacyjnych są dane o opadach, zadawane w postaci: opadów syntetycznych (modelowych) – blokowych lub wzorcowych (np. Eulera typu II), bądź historycznych zapisów intensywnych deszczu lub też generowanych losowo [3, 9, 12]. Powszechne wdrożenie modelowania w krajowej praktyce projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych napotyka na liczne bariery. Jedną z nich jest brak dostępu przez projektantów do wiarygodnych baz danych o lokalnych opadach. Podjęcie odpowiednich działań o charakterze metodycznym,

w tym opracowanie atlasu opadów maksymalnych w Polsce (PANDa) może zmienić tę sytuację [3, 4, 13]. Przykładowo, w Niemczech dostęp do takich informacji jest powszechny. Ich inżynierowie, na podstawie atlasu opadów KOSTRA mogą praktycznie dla każdej miejscowości konstruować lokalne, syntetyczne hietogramy intensywnych deszczy.

Pierwszym etapem do identyfikacji przecięcia kanałów, w tym w przyszłości, powinna być symulacja działania istniejącego (bądź nowoprojektowanego) systemu odwodnienia odnośnie do nadpiętrzeń. Po dokonaniu oceny wyników takich symulacji może być stwierdzona potrzeba adaptacji systemu, zgodnie z prognozowanym wzro-

stem strumieni spływu wód opadowych. Parametrami kryterialnymi do identyfikacji przecięcia kanałów mogą być np.: stopień zatopienia studzienek (SZS) i objętość wylawa wylewów (OWW) [14]. Wskaźnik SZS ujmuje stosunek liczby zalanych do powierzchni terenu studzienek (N_z) do ogólnej liczby studzienek (N) danego systemu lub powiązanych wzajemnie jego części:

$$SZS = \sum N_z / \sum N \quad (1)$$

Wskaźnik OWW (w m^3/ha) wynika z obliczonej objętości wylewów z kanałów V (m^3) względem uszczelnionej powierzchni F_u (ha) danej zlewni:

$$OWW = \sum V / \sum F_u \quad (2)$$

W pracy [14] dokonano oceny niezawodności działania trzech systemów kanalizacyjnych w Nadrenii Północnej-Wesfalii. Badane zlewnie znajdowały się wewnątrz obszarów miejskich. Jako obciążenie kanałów do symulacji nadpiętrzeń i wylewów przyjęto opady o częstości występowania $C = 5$ lat oraz opady ekstremalne o częstości $C = 100$ lat (wg tab. 5). Na tej podstawie ustalono wartości graniczne kryterialnych wskaźników ocen: $SZS > 0,33$ i $OWW > 13 m^3/ha$ – jako wskazujące na potrzebę adaptacji badanych systemów do zmian klimatu. Gdy zidentyfikowane zostaną lokalne przecięcia systemu celowe są dalsze analizy ryzyka. Można tego dokonać na podstawie ocen GIS i/lub in-situ, a w przypadku rozległych przecięcia niezbędna jest już dodatkowa symulacja w połączeniu z cyfrowym modelem terenu. Szczegółowa analiza wyników symulacji pozwala nie tylko na wytyczenie granic terenów zalewowych,

ale także na specyfikację wysokości podtopień czy szybkości przemieszczania się strumieni wody po powierzchni terenu [15, 16].

Zasady modelowania zjawiska opad-odpływ w zlewniach miejskich

Równania ruchu cieczy w kanałach

Głównym celem stosowania modeli hydrodynamicznych do opisu zjawiska opad-odpływ jest określenie maksymalnego strumienia lub objętości spływu wód opadowych/ścieków do celów praktycznych. Uzyskanie wiarygodnej dokładności obliczeń wymaga właściwej identyfikacji, a następnie kalibracji i walidacji parametrów modelu – na podstawie pomiarów w rzeczywistej zlewni. Błędy modelowania i niepewność pomiarów są istotnym problemem rzutującym na wiarygodność wyników symulacji. Głównym źródłem błędów jest najczęściej nierównomierność czasoprzestrzenna opadów, ale także poziom delimitacji zlewni, niejednorodność parametrów zlewni cząstkowych czy zjawiska losowe (np. niedrożność kanałów).

Do popularnych obecnie narzędzi do symulacji działania systemów odwodnień terenów należą programy: SWMM (Storm Water Management Model), Hykas, Hystem-Extran, Mike Urban, InRoads Storm&Sanitary czy SewerGEMS. Różnice pomiędzy nimi ujawniają się przede wszystkim w zakresie obliczeń i zaawansowania inżynierskiego modułów graficznych. W końcowym etapie obliczeń wyznaczany jest przepływ wód opadowych/ścieków w sieci kanałów. Do modelowania przepływów w kanałach stosuje się równania różniczkowe de Saint-Venanta, wynikające z zasady zachowania masy i pędu. Dla jedno-wymiarowego pola prędkości układ równań de Saint-Venanta ma postać [3, 17, 18]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{1}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial Q^2}{\partial x A} + A \frac{\partial y}{\partial x} + AJ - Ai - \frac{q}{g} (v_q - v) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

- A – powierzchnia czynnego przekroju kanału, m²,
- Q – strumień objętości przepływu, m³/s,
- t – czas, s,
- x – odległość mierzona wzdłuż kanału, m,
- q – dopływ/odpływ boczny na jednostkę długości, m²/s,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s²,
- y – wypełnienie kanału, m,
- J – spadek hydrauliczny (wywołany oporami tarcia), – ,
- i – spadek dna kanału, – ,
- v_q – składowa prędkości dopływu/odpływu boczego, m/s,

v – prędkość przepływu, m/s.

Do obliczeń przepływów w kanałach norma PN-EN 752 zaleca wzór Colebrooka-White'a (o uniwersalnym charakterze), jednakże dopuszcza stosowanie mniej dokładnego wzoru Manninga na prędkość średnią, o znanej postaci:

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (4)$$

gdzie:

- n (= n_e) – współczynnik (eksploatacyjnej) szorstkości kanału, s/m^{1/3},
- R_h – promień hydrauliczny, m.

Eksploatacyjna (zastępcza) wartość współczynnika n ujmuje straty liniowe na długości kanałów, a także straty „miejscowe” wywołane np. obecnością odłożonych osadów dennych itp. Przykładowe wartości współczynnika szorstkości do wzoru Manninga dla różnych materiałów kanałów podano w tabeli 7. Dotyczą one poprawnie wybudowanych i eksploatowanych sieci kanalizacyjnych. W przypadku częściowo zamulonych kanałów czy zalegania scementowanych osadów dennych, rzeczywiste wartości współczynnika n (czyli n_e) mogą odbiegać od górnych granicznych wartości dla danego materiału [19, 20].

Tabela 7. Przykładowe wartości współczynnika szorstkości kanałów do wzoru Manninga

Lp.	Materiał kanału	n, s/m ^{1/3}
1	Cegła (Brick)	0,013 ÷ 0,017
2	Beton (Concrete); Tworzywa sztuczne (Plastic)	0,011 ÷ 0,015
3	Kamionka (Vitrified clay)	0,011 ÷ 0,017

Równania spływu powierzchniowego wód opadowych

Zlewnia deszczowa prezentowana jest najczęściej przez prostokąt o zadanej powierzchni i szerokości hydraulicznej. W zlewni wyróżniane są powierzchnie: nieuszczelnione, na których występuje infiltracja oraz uszczelnione – z retencją i bez retencji powierzchniowej. Odpływ obliczany jest oddzielnie dla każdej powierzchni, a następnie sumowany. W opisie zlewni niezbędne jest określenie udziału uszczelnionej powierzchni oraz współczynników charakteryzujących straty hydrologiczne. Wartość tych współczynników ma wpływ na wielkość tzw. opadu efektywnego, a w rezultacie na strumień spływu wód opadowych, obliczany z układu równań [3, 17-22]:

$$\begin{cases} Q = W \frac{(h - h_p)^{5/3}}{n_p} i_p^{1/2} \\ \frac{dV}{dt} = F \frac{dh}{dt} = F i_e - Q \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

- Q – strumień objętości spływu wody opadowej ze zlewni, m³/s,

- W – hydrauliczna szerokość zlewni (podzlewni cząstkowej), m,
- h – wysokość opadu, m,
- h_p – wysokość retencji powierzchniowej, m,
- n_p – współczynnik szorstkości powierzchni zlewni, s/m^{1/3},
- i_p – średni spadek powierzchni zlewni, – ,
- V(t) – objętość wody opadowej w czasie (t), m³,
- F – powierzchnia zlewni (podzlewni cząstkowej), m²,
- i_e – efektywna (z uwzględnieniem strat) intensywność opadu, mm/h.

Szerokość hydrauliczna zlewni (W) bywa różnie definiowana, najczęściej jako pochodna jej powierzchni (F) [19-25]:

$$W = x F^{0,5} \quad (6)$$

gdzie:

- x – mnożnik liczbowy: x ∈ {0,5; 1,0; 1,1; 1,5; 1,6}.

Napełnienie „zbiornika powierzchniowego” odpowiada objętości wody (V), która znalazła się na terenie danej zlewni, pomniejszonej o straty na parowanie, infiltrację i wypełnienie nierówności terenu. Wysokość retencji powierzchniowej (h_p) jest uzależniona od rodzaju terenu, zwykle dla powierzchni uszczelnionych h_{pu} ∈ [1,3; 2,5] mm, a dla powierzchni nieuszczelnionych h_{pnu} ∈ [2,5; 7,5] mm [17, 24]. Współczynnik szorstkości powierzchni zlewni n_p ∈ [0,01; 0,8] s/m^{1/3} (do wzoru Manninga) należy przyjmować z uwzględnieniem udziału różnego jej rodzaju na drodze spływu wód opadowych, odrębnie dla uszczelnionych (n_{pu}) i nieuszczelnionych (n_{pnu}) powierzchni.

Do modelowania procesu infiltracji wody opadowej do gruntu stosowany jest najczęściej model Hortona, który zakłada, że infiltracja zmniejsza się w czasie w funkcji wykładniczej, od wartości maksymalnej występującej po długim czasie pogody bezdeszczowej, do wartości minimalnej występującej podczas długotrwałych opadów, wg wzoru:

$$I_{in}(t) = I_{ink} + (I_{in0} - I_{ink}) e^{-rt} \quad (7)$$

gdzie:

- I_{in}(t) – intensywność infiltracji w czasie (t), mm/h,
- I_{in0} – początkowa (maksymalna) intensywność infiltracji: I_{in0} ∈ [8; 254] mm/h,
- I_{ink} – końcowa (minimalna) intensywność infiltracji: I_{ink} ∈ [0,2; 12] mm/h,
- r – stała recesji gruntu: r ∈ [2; 7] h⁻¹.

Deklarowany jest także czas potrzebny na wyschnięcie w pełni nasyconej gleby T_s ∈ [2; 14] d. Parametry równania (7) przyjmowane są wstępnie na etapie identyfikacji, a następnie kalibracji modelu, odpowiednio do rodzaju gruntów występujących w profilach glebowych.

Kryteria oceny modeli hydrodynamicznych

Kalibrację i walidację modeli zjawiska opad-odpływ prowadzi się zwykle w oparciu o przyjęte kryteria dokładności, zwane też wskaźnikami jakości dopasowania. Kryteria te nie są jednak standaryzowane. Wyniki kalibracji i walidacji uznaje się za satysfakcjonujące, gdy spełniona jest pożądana dokładność modelu w zakresie strumieni (Q) bądź objętości ($V = Q \cdot t$) spływu wód opadowych/ścieków ogólnospławnych. Do oceny ilościowej i jakościowej modeli stosowane są klasyczne wskaźniki do porównywania wyników symulacji strumieni odpływu z wynikami pomiarów, jak np. [20]:

- specjalny współczynnik korelacji RS:

$$RS = \frac{\sum_{i=1}^n (2 \cdot Q_{p,i} \cdot Q_{s,i} - Q_{s,i}^2)}{\sum_{i=1}^n Q_{p,i}^2} \quad (8)$$

- względny błąd resztowy WBR:

$$WBR = \frac{\sqrt{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{s,i})^2 \right)}}{\sum Q_{p,i}} \quad (9)$$

- współczynnik efektywności modelu NSE (Nasha i Sutcliffe):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - \bar{Q}_p)^2} \quad (10)$$

- błąd wartości średnich SWQ:

$$SWQ = \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_p} \quad (11)$$

- błąd względny wartości maksymalnych (tzw. pików) ΔQ_{max} :

$$\Delta Q_{max} = \frac{Q_{max,p} - Q_{max,s}}{Q_{max,p}} \cdot 100\% \quad (12)$$

We wzorach (8)-(12) indeksy p i s oznaczają odpowiednio: pomiar i symulacja, gdzie n oznacza liczbę danych – uśrednionych przedziałowo wartości strumieni. W zależności od wartości danego wskaźnika model można zakwalifikować do określonej kategorii. Zakresy wartości wskaźników wraz z odpowiadającymi im kategoriami modeli zestawiono tabeli 8.

Metody identyfikacji, kalibracji i walidacji parametrów modeli

Parametry modeli hydrodynamicznych skanalizowanych zlewni deszczowych podzielić można na: empiryczne, fizyczne i quasi fizyczne [20, 25]. Parametry empi-

Tabela 8. Kryteria kategoryzacji do oceny jakości modeli

Lp.	Kategoria modelu	Wartości wskaźników				
		Literaturowe [19]:		Proponowane wg [20]:		
		RS [-]	WBR [%]	NSE [-]	SWQ [-]	ΔQ_{max} [%]
1	Znakomity	1,00-0,99	0-3	1,00-0,97	0,95-1,05	0-5
2	Bardzo dobry	0,99-0,95	3-6	0,97-0,94	0,90-1,10	5-10
3	Dobry	0,95-0,90	6-10	0,94-0,90	0,85-1,15	10-15
4	Przeciętny	0,90-0,85	10-25	0,90-0,75	0,75-1,25	15-25
5	Niezadawalający	< 0,85	> 25	< 0,75	<0,75 lub >1,25	> 25

ryczne służą do opisu opadu efektywnego, infiltracji, a także oporów ruchu na powierzchni zlewni i wewnątrz kanałów. Wartości liczbowe tych parametrów ustalić można jedynie w procesie kalibracji i walidacji modelu konkretnej zlewni, na podstawie obliczeń symulacyjnych dla zebranych danych z monitoringu opadów i przepływów w kanałach oraz badań geologicznych gruntów. Parametry fizyczne służą do opisu zjawisk przepływowych w kanałach (wg równania de Saint-Venanta), a parametry quasi fizyczne służą do conceptualnego opisu spływu wód po powierzchni zlewni. Parametry te ustalane są zwykle (na wstępie) w procesie identyfikacji zlewni i kanałów, na podstawie zebranych danych inwentaryzacyjnych, przy wykorzystaniu map sytuacyjno-wysokościowych uzbudowania i zagospodarowania terenu, modeli numerycznych terenu czy zdjęć lotniczych (ortofotomap).

Do budowy modelu wykorzystać należy dostępne dane literaturowe i na tej podstawie przyjąć zakresy możliwych zmian parametrów modelu – wg tabeli 9.

Przy wyborze zlewni pilotowej (referencyjnej) do badań terenowych należy kierować się m.in. kryteriami, że zlewnia powinna być reprezentatywna dla zabudowy miejskiej, a badany system kanalizacyjny powinien być położony jak najbliżej sieci deszczomierzy i być opomiarowany odnośnie strumieni (Q). Powierzchnia zlewni cząstkowych powinna być ograniczona do maksymalnie kilku hekta-

rów, przy uwzględnianiu kanałów o średnicy $\geq 0,3$ m (jako typowej dla kanałów zbiorczych z przyłączy rynnowych budynków czy wpustów ulicznych). Spadek powierzchni w danej podzlewni (i_p) należy interpretować jako zastępczy – średni ważony, obliczany z uwzględnieniem niwelet ulic, placów czy terenu na kierunku spływu powierzchniowego. Wybór wzoru do określania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych (W) powinien wynikać z oceny jakościowej modelu, wg wybranych miar statystycznych do porównywania wyników pomiarów i obliczeń (Q , V). Do weryfikacji wzorów na W nadają się zwłaszcza dwie metody analityczne: analiza skupień (Warda) bądź metoda tzw. wykresów pudełkowych [20].

Kalibracja modeli może być przeprowadzona wg różnych założeń. Stosować można jednakowe wartości parametrów dla całej zlewni lub różne dla poszczególnych podzlewni cząstkowych, co pozwala na uzyskanie dokładniejszych rezultatów symulacji. Wpływ parametrów gruntu na wynik symulacji jest zwykle ograniczony i dotyczy jedynie opadów bardzo intensywnych, przy których występuje spływ wody także z terenów nieuszczelnionych. Do kalibracji modeli nadają się zwłaszcza długotrwałe, intensywne opady (frontalne i niżowe), cechujące się na ogół małą zmiennością czasoprzestrzenną, lecz wieloma tzw. pikami zmian wysokości opadów w czasie i w efekcie wieloma pikami strumieni Q – na hydrogramach

Tabela 9. Literaturowe wartości parametrów modeli hydrodynamicznych systemów kanalizacyjnych

Parametr – opis	Powierzchnia zlewni	Szerokość hydrauliczna zlewni cząstkowej	Współczynnik szorstkości – kanały	Współczynnik szorstkości – pow. uszczelnione	Współczynnik szorstkości – pow. nieuszczelnione	Wysokość retencji – pow. uszczelnione	Wysokość retencji – pow. nieuszczelnione	Początkowa intensywność infiltracji (Horton)	Końcowa intensywność infiltracji (Horton)	Stożek recesji infiltracji (Horton)	Czas wysychania gruntu (Horton)
Symbol	F	W	n	n_{pu}	n_{pnu}	h_{pu}	h_{pnu}	l_{in0}	l_{ink}	r	T_s
Jednostka	ha	m	$s/m^{1/3}$	$s/m^{1/3}$	$s/m^{1/3}$	mm	mm	mm/h	mm/h	l/h	d
Zakresy danych literaturowych [17-25], w tym:	-	różne wzory	0,013-0,020	0,011-0,050	0,1-0,8	1,3-2,5	2,5-7,5	8-254	0,2-12	2-7	2-14
Nowakowska (Wrocław)	104	1,6√F	0,020	0,020	0,30	2,0	5,0	90	10	4	7
Zawilski (Łódź)	360	1,5√F	0,015	0,013	0,10	1,5	5,0	90	5	4	7
Szeląg (Kielce)	62	1,1√F	0,015	0,015	0,15	1,5	6,0	90	15	3	3
Mrowiec (Częstochowa)	69	√F	0,013	0,015	0,2-0,4	1,5	6-7	75	15	b.d.	b.d.
Skotnicki (Poznań)	670	√F	0,018	0,015	0,2	1,5	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Dziedziela (Łódź)	11,9	0,5√F	0,020	0,020	0,10	2,5	5,0	90	5	4	7
b.d. – brak danych											

odpływu. Pożądane częstotliwości opadów do kalibracji modeli: $C > 0,5$ rok. Walidacja modeli powinna być przeprowadzona na opadach niewykorzystywanych uprzednio do kalibracji. Do walidacji nadają się zwłaszcza krótkotrwałe, intensywne opady (konwekcyjne), cechujące się na ogół dużą zmiennością czasoprzestrzenną, lecz powodujące kulminację strumieni i objętości odpływu w kanałach (Q_{max} , V_{max}). Pożądane częstotliwości opadów do walidacji modeli: $C > 1$ rok. Jako kryteria oceny ilościowej, tj. dokładności tworzonych modeli, na etapie ich kalibracji i walidacji proponuje się: zgodność bilansu objętości spływu (V) oraz zgodność wartości strumieni maksymalnych (Q_{max}). Pożądana dokładności modeli: do $\pm 10\%$ – dla wyników pomiarów i symulacji [20].

Niepewność związana z oszacowaniem kalibrowanych i walidowanych parametrów modeli ma zwykle mniejszy wpływ na symulowane strumienie odpływu, w porównaniu do niepewności związanej z oceną przestrzennie-czasowego przemieszczenia się opadów. W procesie kalibracji/walidacji modeli należy opierać się na pomiarach opadów możliwie jak najbliższej średnicy ciężkości badanej zlewni. Wykazano to m.in. w pracach [20, 26] dla pilotowych zlewni miejskich o powierzchniach ok. 1 km^2 . W innych przypadkach niezbędny jest dynamiczny rozdział opadów nad zlewnią. Wówczas, na podstawie pomiarów w sieci najbliższych deszczomierzy, należy dokonać projekcji histogramów dla średnicy ciężkości badanej zlewni. Do tego celu nadaje się oprogramowanie Surfer® 13, z zastosowaniem metody odwrotnych odległości (IDP – *Inverse Distance to a Power*), jako wagowej procedury interpolacyjnej. W procedurze tej wartość analizowanej zmiennej w dowolnym węźle siatki j , czyli Z_j , obliczane są z zależności:

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{i,j}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,j}^\beta}} \quad (13)$$

gdzie:

- z_i – wartość zmiennej w punkcie pomiarowym i ,
- $d_{i,j}$ – odległość węzła j od punktu i ,
- β – wykładnik potęgowy: $\beta \in [1; 3]$.

Każdemu deszczomierzowi przypisywana jest waga, która jest odwrotnie proporcjonalna do odległości pomiędzy nim a analizowanym punktem. Najczęściej do analiz niestacjonarności opadów przyjmowano wartość wykładnika $\beta = 2$ [20, 27].

Podsumowanie

Problematyka odprowadzania wód opadowych z terenów zurbanizowanych nabierała w ostatnich latach szczególnego znaczenia. Postępująca urbanizacja kraju, jak i obserwowane zmiany klimatu, mają negatywny wpływ na sprawność funkcjonowania systemów

odwodnień terenów. Wdrożenie badań niezawodności w krajowej praktyce projektowania i eksploatacji systemów kanalizacyjnych napotyka jednak na liczne bariery. Wynika to głównie z braku wiarygodnych baz danych o opadach, a także braku krajowych standardów modelowania systemów odwodnieniowych. Podejmowane działania o charakterze metodycznym, w tym opracowanie atlasu opadów maksymalnych w Polsce, powinny zmienić tę sytuację w krótkim czasie.

Podsumowując należy podkreślić, że przy dzisiejszym wymiarowaniu nowobudowanych, czy modernizacji istniejących systemów kanalizacyjnych, konieczne staje się uwzględnianie prognozowanego wzrostu intensywności opadów w przyszłości. Należy więc stosować bezpieczne metody wymiarowania sieci i obiektów kanalizacyjnych, a następnie badać ich niezawodność działania w modelowaniu hydrodynamicznym. Identyfikacja potencjalnych przeciążeń systemów uzasadni konieczność podjęcia już dzisiaj odpowiednich działań zaradczych.

Pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej finansowanej ze środków MNiSW.

LITERATURA

- [1] Gorgoń J., Starzewska-Sikorska A., Staszewski T. i inni: Ocena wrażliwości terenów miejskich na możliwe zagrożenia wynikające ze zmian klimatu. Instytut Ekologii Terenów Przemysłowych, Katowice 2014.
- [2] http://klimat.imgw.pl/wp-content/uploads/2013/01/4_b.pdf (Dostęp 04.2018 r.).
- [3] Kotowski A.: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Sieci kanalizacyjne (Tom I); Obiekty specjalne (Tom II). Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2015.
- [4] Licznar P., Siekanowicz-Grochowina K., Oktawiec M., Kotowski A.: Empiryczna weryfikacja formuły Błaszczyka. Ochrona Środowiska 2018, vol. 40, nr 2.
- [5] Kotowski A., Nowakowska M.: Standards for the dimensioning and assessment of reliable operations of area drainage systems under conditions of climate change. Technical transactions. Environmental engineering 2018, no. 1, s. 125-139.
- [6] Kaźmierczak B., Kotowski A.: The influence of precipitation intensity growth on the urban drainage systems designing. Theoretical and Applied Climatology 2014, vol. 118, nr 1, s. 285-296.
- [7] PN-EN 752:2008: Drain and sewer systems outside buildings. Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne. PKN, Warszawa 2008.
- [8] PN-EN 752:2017: Drain and sewer systems outside buildings – Sewer system management. Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne – Zarządzanie systemem kanalizacyjnym. PKN, Warszawa 2017.
- [9] DWA-A118:2006: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA, Hennef 2006.
- [10] Stauer P., Leckenbusch G., Pinnekamp J.: Die Ermittlung der relevanten Niederschlagscharakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2010, Jg. 57, H. 12.

- [11] Merkblatt Nr. 4.3/3:2009: Bemessung von Misch- und Regenwasserkanälen. Teil 1: Klimawandel und möglicher Anpassungsbedarf. Bayerischen Landesamtes für Umwelt (Referat 66), Juli 2009.
- [12] Licznar P.: Generatory syntetycznych szeregów opadowych do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu 2009.
- [13] Licznar P.: Analiza opadów atmosferycznych na potrzeby projektowania systemów odwodnienia. Wyd. Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2018.
- [14] Siekmann M., Pinnekamp J.: Indicator based strategy to adapt urban drainage systems in regard to the consequences caused by climate change. 12th Int. Conf. on Urban Drainage. Porto Alegre, 11-16 September 2011.
- [15] Schmitt T.G.: Risikomanagement statt Sicherheitsversprechen. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2011, nr 1, s. 40-49.
- [16] Zawilski M.: Niestandardowe wykorzystanie GIS w modernizacji systemów kanalizacyjnych. GWiTS 2009, nr 6, s. 34-36.
- [17] Kaźmierczak B.: Badania symulacyjne działania przelewów burzowych i separatorów ścieków deszczowych w warunkach ruchu nieustalonego do wspomagania projektowania sieci odwodnieniowych. Praca doktorska (promotor A. Kotowski). Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej 2011.
- [18] Kaźmierczak B., Kotowski A.: Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej 2012.
- [19] Nowakowska M.: Identyfikacja parametrów hydrologicznych i hydraulicznych zlewni miejskiej w modelowaniu hydrodynamicznym SWMM. Praca doktorska (promotor A. Kotowski). Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, 2017.
- [20] Nowakowska M., Kotowski A.: Metodyka i zasady modelowania odwodnień terenów zurbanizowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2017.
- [21] Nowakowska M., Kaźmierczak B., Wartalska K., Kotowski A.: Budowa modelu hydrodynamicznego skanalizowanej zlewni deszczowej we Wrocławiu. GWiTS 2017, nr 4, s. 189-195.
- [22] Nowakowska M., Kaźmierczak B., Kotowski A., Wartalska K.: Identyfikacja, kalibracja i walidacja hydrodynamicznego modelu systemu odwadniającego tereny miejskie na przykładzie Wrocławia. Ochrona Środowiska 2017, vol. 39, nr 2, s. 51-60.
- [23] Mazurkiewicz K.: Wyznaczenie charakterystyki opadu obliczeniowego dla potrzeb modelowania odpływu ze zlewni miejskiej. Praca doktorska (promotor M. Sowiński). Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2016.
- [24] Dziedziela B.: Badania emisji zanieczyszczeń z kanalizacji deszczowej na terenach zurbanizowanych na przykładzie Łodzi. Praca doktorska (promotor M. Zawilski). Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, 2016/2017.
- [25] Leśniewski M.: Modelowanie sieci kanalizacyjnych za pomocą programu SWMM. GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociagowymi i kanalizacyjnymi. PZITS, Warszawa 2005, s. 185-197.
- [26] Cooper M.R., Fernando D.A.: The effect of the raingauge distribution on stormwater models. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009.
- [27] Zawilski M., Brzezińska A.: Areal rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system. Urban Water Journal 2013, vol. 10, s. 1-11.