

Analiza zmian stężenia chloru wolnego oraz czasu zatrzymania wody w wybranej rzeczywistej sieci wodociągowej

Analysis of free chlorine concentration changes and of water retention time in a selected real water supply network

EWA HOŁOTA

DOI 10.36119/15.2020.9.7

Przewymiarowane sieci wodociągowe, poprzez występujące w nich niskie prędkości przepływu wody, szczególnie narażone są na pogorszenie jakości wody przeznaczonej do spożycia. W pracy przedstawiono budowę i kalibrację modelu hydraulicznego wybranej rzeczywistej sieci wodociągowej i modelu jakości wody. Wykorzystując badania symulacyjne, dokonano analizy warunków pracy panujących w tej sieci oraz przedstawiono ich wpływ na jakość wody w kontekście zmian stężenia chloru wolnego.

Słowa kluczowe: sieć wodociągowa, modelowanie, jakość wody

Oversized water supply networks, due to their low water flow velocities, are particularly exposed to the deterioration of quality of water intended for consumption. The paper presents the construction and calibration of a hydraulic model of a selected real water supply network and of a water quality model. By using simulations the network working conditions were analyzed and their influence on water quality concerning free chlorine concentration changes was presented.

Keywords: water network, modeling, water quality

Wstęp

Konieczność projektowania sieci wodociągowych o dużych średnicach przewodów, nieadekwatnych do zmniejszającego się poboru wody przez odbiorców, wynika z obowiązku zapewnienia odpowiedniego natężenia przepływu i ciśnienia na wypadek pożaru oraz z potrzeby zachowania rezerwy przepustowości na wypadek rozbudowy jednostki osadniczej [1]. Przewymiarowanie sieci wodociągowej wiąże się ze zmniejszeniem prędkości przepływu i stagnacją wody, szczególnie na końcowych odcinkach sieci. Zjawiska te skutkują m. in. wydłużonym czasem retencji wody i osadzaniem się osadów w przewodach, co ma istotny wpływ na pogorszenie jakości wody w sieci, w szczególności ze względu na zanik dezynfektanta [2-5]. Wymaga to od przedsiębiorstw wodociągowych wdrażania efektywnego i skutecznego zarządzania siecią wodociągową, opartego o ciągły monitoring. Umożliwia on szybkie reagowanie na zmieniające się warunki pracy sieci, i co za tym idzie, zwiększa

bezpieczeństwo dostaw wody od ujęcia do odbiorcy końcowego oraz minimalizuje koszty funkcjonowania całej infrastruktury wodociągowej [6, 7]. Ciągły i rozbudowany monitoring jest kosztowny, dlatego wdrażane są komputerowe modele numeryczne odwzorowujące pracę sieci, które stanowią narzędzia ułatwiające proces zarządzania siecią wodociągową. Dzięki tym modelom możliwe są symulacje pracy systemu wodociągowego w sytuacjach awaryjnych, spowodowanych m.in. wystąpieniem nieprzewidzianych uszkodzeń, czy też wystąpieniem zdarzenia katastroficznego, takiego jak powódź lub trzęsienie ziemi [8-10]. Jako pierwsze powstają modele warunków hydraulicznych pracy sieci. Ich rozwinięciem są modele jakości wody. Za pomocą obu modeli mogą być przeprowadzane analizy i symulacje czasu przebywania wody w systemie (wiek wody) oraz określonych wskaźników jakości wody np. zmian stężenia chloru wolnego w sieci. Pozwalają one również na identyfikację miejsc, w których istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia zbyt małego stężenia chloru, a tym samym większe nie-

bezpieczeństwo mikrobiologicznego skażenia wody [11, 12].

Celem artykułu jest przeprowadzenie analizy warunków hydraulicznych pracy wybranej, rzeczywistej sieci wodociągowej, czasu zatrzymania w niej wody oraz analizy zmian stężenia chloru wolnego. Jako główne narzędzie badawcze wykorzystano skalibrowane modele numeryczne warunków hydraulicznych i jakości wody.

Opis obiektu badań, metodyka

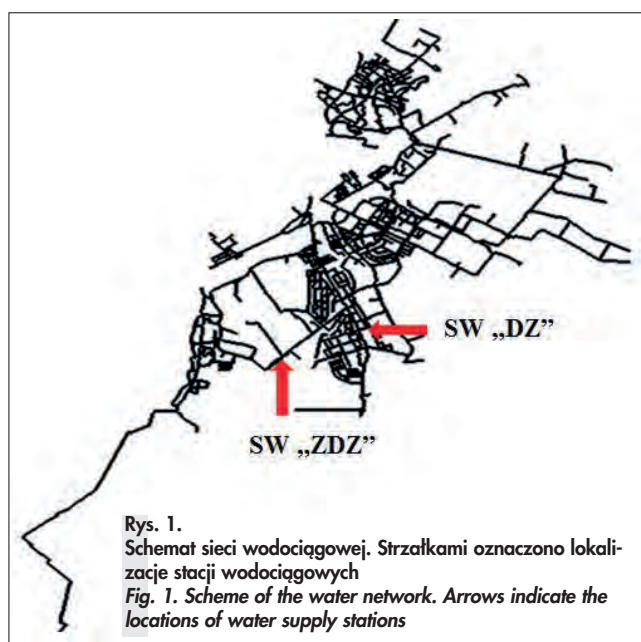
Badaniem została poddana wybrana, rzeczywista sieć wodociągowa. Zaopatruje ona w wodę około 86 000 mieszkańców. Długość przewodów tej sieci wynosi ok. 230 km, długość przyłączy to ponad 122 km. Przewody wodociągowe dostarczające wodę pracują w układzie mieszanym pierścieniowo-rozgałęzieniowym. Rurociągi wykonane są z żeliwa szarego (38%), PE-HD (32%), PVC (14%), azbestocementu (11%), żeliwa sferoidalnego (3%) i stali ocynkowanej (2%). Strukturę geometryczną sieci przedstawiono na rysunku 1.

Sieć jest zaopatrywana w wodę z dwóch stacji wodociagowych „DZ” i „ZDZ” wyposażonych we własne ujęcia wody podziemnej. Ujmowana woda na terenie stacji „DZ” gromadzona jest w zbiornikach o łącznej pojemności czynnej 7720 m³, a następnie poprzez zespół pomp II-go stopnia tłoczona do sieci ze średniodobową wydajnością wynoszącą 9570 m³/d, przy ciśnieniu $p = 0,52 \pm 0,55$ MPa. Stacja „ZDZ” posiada zbiorniki o łącznej pojemności 20 000 m³. Gromadzona w nich woda poprzez zespół pomp II-go stopnia tłoczona jest do sieci ze średniodobową wydajnością wynoszącą ok. 6093 m³/d, przy ciśnieniu $p = 0,21 \pm 0,24$ MPa. Woda w badanej sieci wodociągowej poddawana jest ciągłej dezynfekcji za pomocą

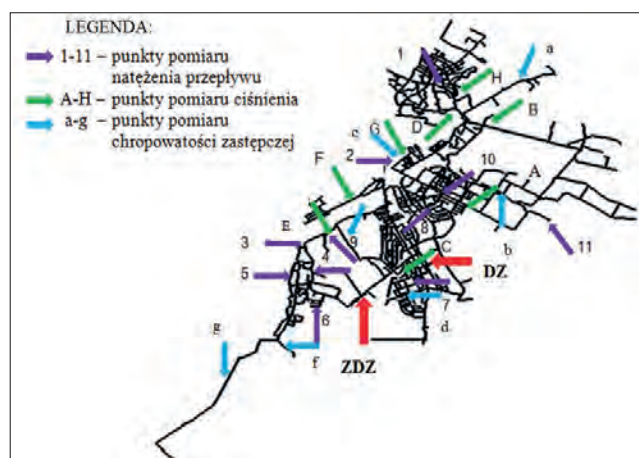
modułu *Darwin Calibrator*. Przeprowadzono ją dla przedziału czasowego równego 24 godziny z 1h krokiem czasowym. Skalibrowany model powinien spełniać wymagania zawarte w wytycznych American Water Works Association (AWWA): $\pm 3,4$ m H₂O pomierzonej wielkości ciśnienia dla 100% odczytów lub $\pm 2,0$ m H₂O dla 70% odczytów, a w przypadku pomiarów natężenia przepływu różnica może wynosić $\pm 10\%$ albo $\pm 2\%$ w stosunku do wielkości pomierzonej [13].

Kalibracja została poprzedzona przeprowadzeniem kampanii pomiarowej mającej na celu poznanie rzeczywistych wartości natężenia przepływu i ciśnienia panujących w wybranych punktach badanej sieci oraz w celu wyznaczenia chropo-

ustalono wzorce zmian stężenia chloru na wyjściu ze stacji „ZDZ” i „DZ”. Zostały one wykonane na podstawie pomiarów stężenia chloru na wyjściu z pompowni II^o uzyskanych od przedsiębiorstwa wodociągowego. Następnym krokiem było określenie wartości liczbowej współczynnika zmian stężenia chloru k_b w masie wody, pochodzącej ze stacji wodociągowej „DZ”. Badania prowadzono przy wykorzystaniu skonstruowanego laboratoryjnego stanowiska pomiarowego, zgodnie z opublikowanym artykułem [15]. Analizę uzyskanych wyników pomiarów ograniczono do modelu pierwszorzędowego zaniku chloru. Na podstawie zależności opisującej zmiany stężenia chloru w funkcji czasu wyznaczono współczynnik zmian stężenia



Rys. 1. Schemat sieci wodociągowej. Strzałkami oznaczono lokalizacje stacji wodociagowych
Fig. 1. Scheme of the water network. Arrows indicate the locations of water supply stations



Rys. 2. Lokalizacja stanowisk pomiarowych – natężenie przepływu (strzałki fioletowe), ciśnienie (strzałki zielone), chropowatość zastępcza (strzałki błękitne). Czerwonymi strzałkami oznaczono stacje wodociagowe
Fig. 2. Location of measuring points – flow rate (violet arrows), pressure (green arrows), pipe roughness (blue arrows). Red arrows indicate water supply stations

chloru gazowego. Stężenie chloru na wyjściu z obu stacji waha się w granicach $0,15 \pm 0,25$ g/m³.

Budowa i kalibracja modelu hydraulicznego

Do budowy modelu konieczne było podjęcie szeregu działań mających na celu zebranie odpowiednich danych wejściowych, takich jak: długość, materiał, średnica przewodu, czy też rzędna lub wydatek węzłowy. Model badanej sieci wodociągowej został zbudowany w programie WaterGEMS V8i firmy Bentley. W skład modelu wchodziły dwa zbiorniki źródłowe (rezerwuary), które odwzorowywały stacje wodociagowe „DZ” i „ZDZ”, 1092 węzły, 1332 przewody.

Kalibracja modelu hydraulicznego została przeprowadzona za pomocą algorytmów genetycznych, wykorzystując

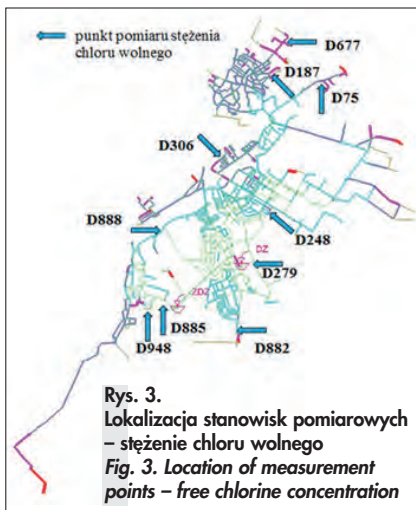
wartości zastępczej przewodów. Pomiar ciśnienia zostały wykonane w ośmiu lokalizacjach, pomiary natężenia przepływu w jedenastu miejscach, zaś pomiary chropowatości zastępczej w ośmiu punktach na sieci wodociągowej (rys. 2). Sposób przeprowadzenia pomiarów terenowych mających na celu ustalenie chropowatości zastępczej przewodu został opisany w [14].

Budowa i kalibracja modelu jakości wody

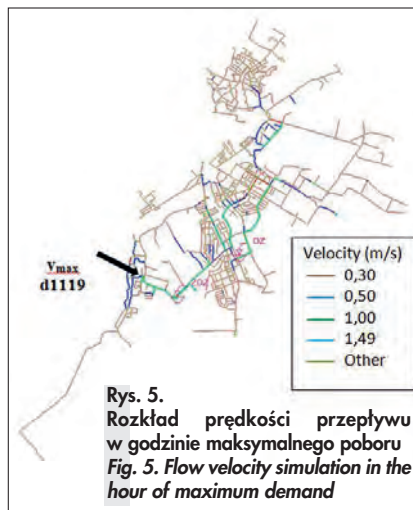
Model jakości wody został zbudowany na bazie poprawnie skalibrowanego modelu hydraulicznego. Jako wskaźnik charakteryzujący jakość wody przyjęto chlor wolny. Za podstawę obliczeń przyjęto pierwszorzędowy model zaniku chloru, w którym określono współczynniki zaniku chloru w masie wody k_b oraz przy ściance przewodu k_w . W pierwszej kolejności

chloru w masie wody k_b , który wyniósł $0,002$ h⁻¹. Drugi współczynnik określający zmiany stężenia chloru przy ściance przewodu k_w wyznaczono metodą prób i błędów podczas procesu kalibracji modelu.

Kalibrację wykonano dla przedziału czasowego równego 120 godzin z 10 minutowym krokiem czasowym. Została ona poprzedzona stosownymi pomiarami terenowymi mającymi na celu ustalenie zmian stężenia chloru wolnego w wybranych punktach sieci wodociągowej. W tym celu wytypowano 10 lokalizacji punktów pomiaru stężenia chloru wolnego w sieci wodociągowej (rys. 3). Lokalizację stanowisk pomiarowych wybrano przy pomocy modelu hydraulicznego sieci, określając wiek wody w zakresie od 1h do 200h. Sposób przeprowadzenia badań terenowych wraz z budową przenośnego urządzenia pomiarowego został przedstawiony w artykule [16].



Rys. 3. Lokalizacja stanowisk pomiarowych – stężenie chloru wolnego
Fig. 3. Location of measurement points – free chlorine concentration



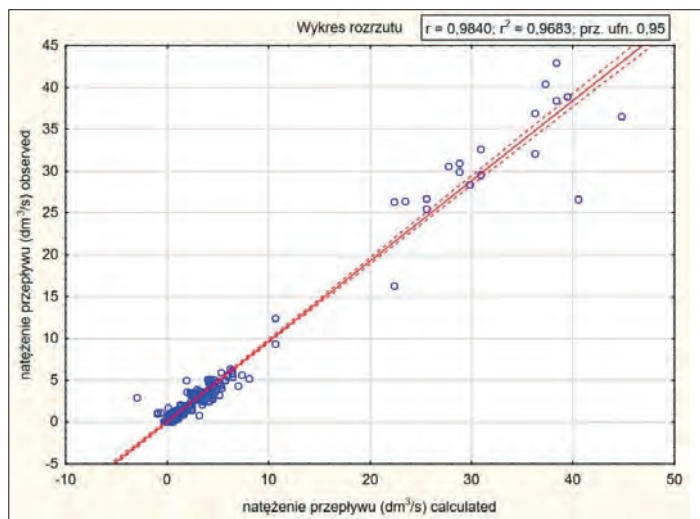
Rys. 5. Rozkład prędkości przepływu w godzinie maksymalnego poboru
Fig. 5. Flow velocity simulation in the hour of maximum demand

Rezultaty badań

Analiza warunków hydraulicznych pracy sieci wodociągowej

Kalibracja modelu hydraulicznego badanej sieci wodociągowej spełniła wymagania stawiane przez AWWA dla modeli wykorzystywanych do budowy modelu jakości wody. Współczynnik korelacji r dla wartości natężenia przepływu obliczony w programie Statistica 13 dla 262 par pomiarowych wyniósł 0,984, natomiast współczynnik determinacji $r^2 = 0,9683$, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu (rys. 4).

Minimalne prędkości przepływu wynoszące poniżej 0,001 m/s, niezależnie od godziny trwania symulacji, występują na końcówkach sieci. Zbyt małe prędkości przepływu związane są z występowaniem zbyt dużych średnic przewodów oraz z koniecznością utrzymania odpowiedniej wydajności sieci na wypadek rozbudowy jednostki osadniczej i odpowiednio wysokiego ciśnienia na wypadek pożaru. Badany wodociąg projektowany był w czasach, gdy występowały rozbiory wody nieporównanie większe niż obecnie. Podczas przeprowadzania symulacji zauważono, że nie w każ-

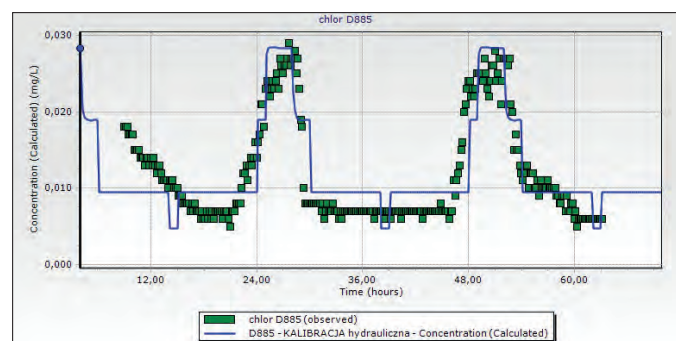


Rys. 4. Podsumowanie statystyczne obliczeń kalibracyjnych natężenia przepływu w badanych rurociągach
Fig. 4. Statistical summary of flow rate calibration calculations in the tested pipes

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki symulacji prędkości przepływu wody w godzinie maksymalnego poboru wody (godz. 8:00). Strzałką oznaczono przewód, w którym występuje największa prędkość przepływu wody w sieci wodociągowej (d1119).

Analizując symulowane prędkości przepływu wody w badanym wodociągu zauważono istotny problem, jakim jest przewymiarowana sieć wodociągowa.

Rys. 6. Porównanie przebiegu zmian stężenia chloru obliczonego i zmierzonego w węźle D885
Fig. 6. Comparison of chlorine concentration changes calculated and observed at node D885



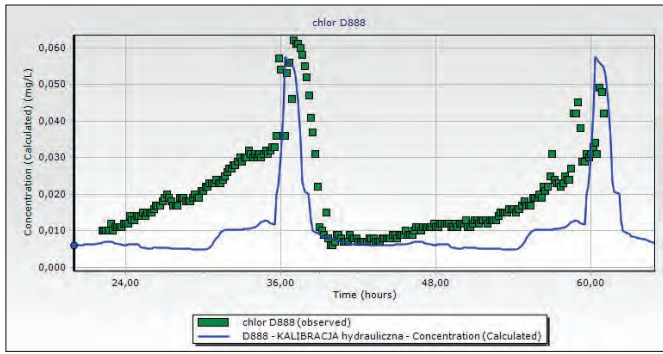
dym przewodzie przynajmniej raz na dobę osiągnięta jest prędkość przepływu wody na poziomie 0,5 m/s [17]. Warunek ten spełniony jest tu sporadycznie. Tylko w początkowych odcinkach sieci, w głównych przewodach sieci wodociągowej, prędkości przepływu osiągają wystarczającą wartość, która zapewnia samooczyszczanie sieci. W wielu odcinkach sieci, szczególnie na końcówkach przewodów, występuje stagnacja wody, która dodatkowo powoduje tworzenie się osadów i powstawanie biofilmu.

Analiza jakości wody w sieci wodociągowej

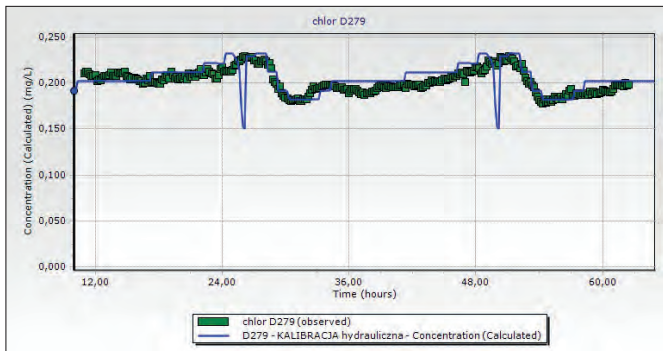
Na podstawie poprawnie skalibrowanego modelu hydraulicznego zbudowano model jakości wody. Kalibracja tego modelu została przeprowadzona metodą prób i błędów poprzez dostosowanie wartości współczynnika k_w . Najlepsze dopasowanie badanych parametrów uzyskano dla $k_w = 0,12 \text{ h}^{-1}$. Wyniki kalibracji zostały obliczone dla 2267 par pomiarowych w programie Statistica 13. Wartość współczynnika korelacji r wyniosła 0,9396, współczynnik determinacji r^2 wyniósł 0,8828, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu.

Na rysunkach 6÷8 przedstawiono porównanie wyników pomiarów stężenia chloru w przykładowych punktach pomiarowych z wynikami symulacji komputerowej. Uzyskane rezultaty wskazują na wysoką zgodność między wartościami pomierzonymi i symulowanymi, o czym świadczą uzyskane współczynniki korelacji i determinacji. Lokalizacja punktów pomiarowych została przedstawiona na rysunku 3. Tak jak się spodziewano, najlepsze dopasowanie mierzonych i symulowanych wartości uzyskano w punktach znajdujących się najbliżej stacji wodociągowej.

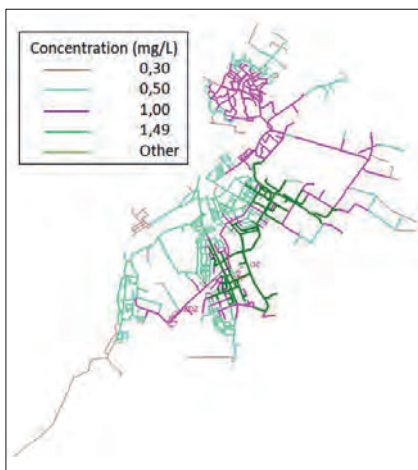
Na rysunku 9 przedstawiono zmiany stężenia chloru wolnego w godzinie maksymalnego poboru wody w ostatniej (piątej) dobie trwania symulacji. Widać wyraźnie, że na końcowych odcinkach sieci występuje niedobór chloru wolnego.



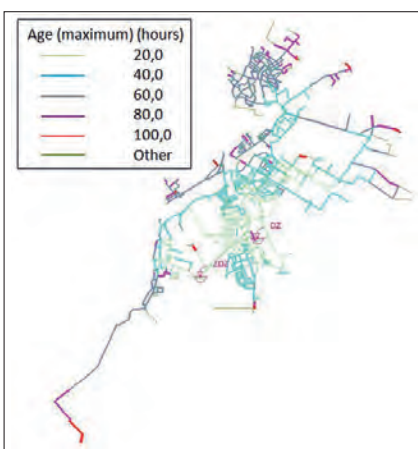
Rys. 7.
Porównanie przebiegu zmian stężenia chloru obliczonego i zmierzonego w węzle D888
Fig. 7. Comparison of chlorine concentration changes calculated and observed at node D888



Rys. 8.
Porównanie przebiegu zmian stężenia chloru obliczonego i zmierzonego w węzle D279
Fig. 8. Comparison of chlorine concentration changes calculated and observed at node D279



Rys. 9.
Zmiany stężenia chloru wolnego w godzinie maksymalnego poboru wody
Fig. 9. Free chlorine concentration changes in the hour of maximum water demand



Rys. 10.
Wyniki badań symulacyjnych wieku wody
Fig. 10. Result of water age simulation

Miejsca te są szczególnie narażone na wtórne zanieczyszczenie.

Poniżej przedstawiono symulację wieku wody w godzinie maksymalnego poboru, w piątą dobę trwania symulacji (rys. 10). Małe prędkości przepływu wody w sieci powodują, że w miarę oddalania się od stacji wodociągowej występuje wydłużony czas przebywania wody w systemie. Widać to w szczególności na końcówkach sieci. Na tych odcinkach wiek wody wynosi ponad 100 godzin.

Wnioski

Przeprowadzone badania umożliwiły wyciągnięcie następujących wniosków:

- Model hydrauliczny badanej sieci wodociągowej umożliwił wykonanie symulacji rozkładu prędkości przepływającej wody, która wykazała, że w większości przewodów wodociągowych panują zbyt niskie prędkości przepływu spowodowane przewymiarowaniem sieci.
- Model jakości wody umożliwił wykonanie symulacji zaniku chloru wolnego w badanej sieci, która wykazała, że końcowe odcinki sieci są szczególnie narażone na wtórne zanieczyszczenie wody, ponieważ występują w nich niedobory chloru wolnego.
- Analiza wieku wody wykazała, że w badanej sieci, w szczególności na jej końcowych odcinkach, występuje wydłużony czas przebywania wody w systemie, dochodzący nawet do ponad 100h.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych (Dz.U.2009.124.1030)
- [2] Kulbik M. (1999): Jakość wody w sieci wodociągowej w warunkach wymuszenia ukierunkowanego przepływu. INSTAL nr 11, s. 9-14
- [3] Kowal A. L. (2003): Przyczyny i zapobieganie zmianom jakości wody w systemach wodociągowych, Ochrona Środowiska, 25(4), s. 3-6
- [4] Kulbik M. (2010): Wpływ warunków hydraulicznych w sieci wodociągowej na wtórne zanieczyszczenie wody. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód-zagadnienia współczesne. Tom II, PZLiTS, Poznań, s. 35-51
- [5] Tataro M. (2001): Wtórne zanieczyszczenia wody wodociągowej podczas jej dystrybucji w aspekcie pogorszenia fizykochemicznej jakości wody, Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 6, s. 201-205
- [6] Dohndalik P., Jędrzejewski A. (2004): Efektywna eksploatacja wodociągów. Wyd. LEMtech Konsulting sp. z o.o., Kraków
- [7] Bałut A., Byłka J. (2013): Modele komputerowe jako narzędzia wspomagania w procesie zarządzania układami rozprowadzającymi wodę w systemach wodociągowych. INSTAL nr 12, s. 91-96
- [8] Shawcross, J. F. (1985): Modeling complex water distribution systems. Computer applications in water resources. ASCE, New York, p. 438-442
- [9] Wang Y., Siu-Kui A. (2009): Spatial distribution of water supply reliability and critical links of water supply to crucial water consumers under an earthquake, Reliability Engineering and System Safety 94(2), p. 534-541
- [10] Studziński A., Kobylarz J. (2014): Jakościowa analiza ryzyka awarii przewodów wodociągowych wodociągu grupowego, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture JCEEA, t. XXXI, z. 61 (1/14), s. 311-321
- [11] Monteiro L. et al. (2014): Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. Procedia Engineering 70, p. 1192-1200
- [12] Maier S. H., Powell R. S., Woodward C. A. (2000): Calibration and comparison of chlorine decay models for a test water distribution system. Water Research 34(8), p. 2301-2309
- [13] AWWA Engineering Computer Applications Committee: Calibration Guidelines for water distribution system modeling. Reprinted from Proceedings of the 1999 AWWA Information Management and Technology Conference, New Orleans, Louisiana (1999)
- [14] Hołota E., Kowalska B., Kowalski D. (2013): Badanie współczynników chropowatości zastępczej wybranych rurociągów rzeczywistej sieci wodociągowej. INSTAL nr 9, s.61-64
- [15] Hołota E., Kowalska B., Dyś K., Kowalski D. (2016): Badania symulacyjne zmian stężenia chloru w wybranym fragmencie rzeczywistej sieci wodociągowej. INSTAL nr 6, s. 51-54
- [16] Hołota E., Kowalska B., Kowalski D. (2018): Wykorzystanie programu WaterGEMS firmy Bentley do symulacji zmian stężenia chloru w rzeczywistej sieci wodociągowej. INSTAL nr 12, s. 55-58
- [17] Knapik K., Bajer J. (2011): Wodociągi, Wyd. PK, Kraków