

Marian KULBIK

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

ROLA I ZNACZENIE ZBIORNIKA SIECIOWEGO W KSZTAŁTOWANIU HYDRAULIKI I JAKOŚCI WODY W SYSTEMIE WODOCIĄGOWYM

STORAGE TANK FUNCTIONS AND IMPORTANCE IN GENERATING HYDRAULIC PARAMETERS AND WATER QUALITY IN WATER DISTRIBUTION SYSTEM

Operation of storage tank should provide a cyclic exchange of water to avoid too long residence times. A necessary condition for proper operation of reservoir is compatibility of project design with an actual state. Operation practice indicates the number of irregularities in this regard. Because of the location of the storage tank too low or too high, either due to errors made in determining of the storage facilities parameters, the hydraulic instability is observed in the water supply system together with enforced disturbance in the functioning objects. These operating conditions have a direct impact on the process of the secondary contamination of water in distribution system. Water storage tank is related with all elements of the water supply system and therefore evaluation of its operation enforces the need to assess its performance based on the findings of a comprehensive hydraulic analysis using a computer model of flows. The recommended criterion for water quality is associate water residence time in the storage facility in relation to the standard value water quality. The permissible value of detention time should be established individually for each water system based on the results of systematic monitoring of water quality. Current knowledge in this area has view character only. The author sees the need for experimental studies which enable to determine the relationship between residence time of water in the water supply system and water quality.

1. Wprowadzenie

Zagadnienia kształtowania hydrauliki i jakości wody w systemach wodociągowych były i są nadal niedoceniane w polskiej literaturze w zakresie projektowania, budowy i eksploatacji zbiorników technologicznych (stacyjnych) i sieciowych (wyrównawczych). W konsekwencji w okresie powojennym można zaobserwować ograniczone dążenie do zrównoważonej rozbudowy eksploatowanych systemów wodociągowych. Budowę projektowanych zbiorników bardzo łatwo wypierały „pilniejsze” zadania inwestycyjne.

W większości wybudowanych zbiorników w Polsce na etapie ich projektowania zakładano, że pojemność użytkowa powinna zapewnić wyrównanie zmienności poboru wody w układzie oraz jej zapas na potrzeby przeciwpożarowe. W praktyce oznaczało to, że objętość użytkowa zbiorników wyrównawczych zazwyczaj nie przekraczała 20% $Q_{d\dot{s}r}$ (średniego dobowego zapotrzebowania na wodę). Zalecenie o konieczności stosowania zbiorników wyrównawczych o pojemności do około 50% $Q_{d\dot{s}r}$ zawarto dopiero w tymczasowych wytycznych¹ z 1982 r. Jednak wpływ niniejszego dokumentu na zmianę sytuacji w polskich systemach wodociągowych był znikomy ze względu na jego lokalną dostępność i tymczasowy charakter.

Konsekwencją braku lub eksploatacji zbiorników wyrównawczych o nieodpowiedniej pojemności użytkowej w stosunku do potrzeb były zakłócenia w dostawie wody w systemach wodociągowych, czemu próbowano przeciwdziałać kosztowną rozbudową ujęć do wydajności potrzebnej w godzinie maksymalnego rozbioru [11]. W poszukiwaniu oszczędności rezygnowano powszechnie z budowy zbiornika stacyjnego na ujęciach (np. Gdyński System Wodociągowy - GSW), a niekiedy także ze zbiorników sieciowych (Centralny Wodociąg Żuławski - CWŻ). W przykładowo wymienionych systemach wodociągowych sytuacja pod tym względem uległa istotnej poprawie w ostatniej dekadzie. Po kompleksowej modernizacji ujęć wody wraz ze stacjami uzdatniania w GSW funkcjonują one obecnie jako dwustopniowe niezależne układy hydrauliczne. Korzystne rozwiązanie uzyskano po zastosowaniu klasycznego schematu technologicznego na ujęciu przez wprowadzenie zbiornika stacyjnego za stacją uzdatniania, z którego czerpie wodę pompownia drugiego stopnia i tłoczy do sieci miejskiej. CWŻ jako system wodociągowy z siecią o długości 1120 km był eksploatowany przez 40 lat bez zaprojektowanego lecz niewybudowanego zbiornika sieciowego o pojemności 7 tys. m³. W ostatnich latach podjęto prace koncepcyjne zmierzające do modernizacji systemu, w tym budowy trzech zbiorników wody czystej o pojemności 1 tys. m³ każdy. Planowane ukończenie inwestycji przewiduje się w 2012 roku.

Wybrane przykłady z praktyki inżynierskiej autora wskazują na niedocenianie przez decydentów roli i znaczenia zbiorników w hydraulicznych zakłóceniach funkcjonowania systemów wodociągowych, które mają bezpośredni wpływ na przebieg procesu wtórnego zanieczyszczenia transportowanej wody. W celu przybliżenia przyczyn i skutków występujących nieprawidłowości w funkcjonowaniu zbiorników omówiono w pracy najważniejsze zadania, które należy rozwiązać na etapie ich projektowania. Zastosowane podejście wynika z przekonania autora, że koniecznym warunkiem prawidłowej eksploatacji zbiornika jest zgodność założeń projektowych ze stanem faktycznym. Wszelkie błędy popełnione w ustalaniu parametrów projektowych zbiornika utrudniają późniejszą jego eksploatację.

Równocześnie zwrócono uwagę na potrzebę oceny funkcjonowania zbiornika sieciowego w oparciu o wyniki kompleksowej analizy hydraulicznej za pomocą komputerowego modelu przepływów. Jako kryterium oceny zalecono obliczony czas przebywania wody w zbiorniku w odniesieniu do jego wartości dopuszczalnej ze względu na zachowanie normatywnej jakości wody. Ustalenie dopuszczalnego poziomu niniejszego parametru ma charakter indywidualny dla każdego systemu wodociągowego. Z tego względu zaleca się systematyczny monitoring jakości wody w eksploatowanych zbiornikach, aby poszerzyć aktualną wiedzę o czynnikach, które determinują dopuszczalny czas przebywania (zatrzymania²) wody w danym układzie wodociągowym.

¹ Tymczasowe zalecane zasady określania rezerw wody w zbiornikach wodociągów komunalnych. Warszawa, Min. Adm. Gosp. Ter. i Ochr. Środ. Dep. Wod. i Kan., Inst. Kszt. Środ., 1982.

² czas zatrzymania (przetrzymania, przebywania) wody w dowolnym układzie wodociągowym w ustalonych warunkach hydraulicznych można interpretować jako czasokres potrzebny na dopłynięcie wody ze źródła zewnętrznego (ujęcia) do danego węzła, w tym zbiornika albo odcinka sieci.

2. Projektowe i eksploatacyjne warunki racjonalnego funkcjonowania zbiornika sieciowego

Racjonalne funkcjonowanie zbiornika sieciowego (wyrównawczego) w systemie wodociagowym wymaga spełnienia równocześnie szeregu warunków na etapie projektowania i podczas eksploatacji. Rozwiązania projektowe w znacznie większym stopniu wpływają na prawidłowe działanie zbiornika sieciowego, aniżeli późniejsze poczynania eksploatatora (operatora). Zazwyczaj zmierzają one do łagodzenia skutków zaistniałej sytuacji, aby zbiornik mógł pełnić funkcje przewidywane w projekcie, pomimo niezgodności założeń z rzeczywistością.

Na etapie projektowania zbiornika sieciowego trzeba rozwiązać następujące problemy:

- ustalić prawidłową relację pomiędzy jego objętością a poborem wody w układzie,
- przewidzieć konsekwencje wyboru lokalizacji w obszarze zasilania,
- uwzględnić współdziałanie z siecią wodociagową ze względu na jego położenie wysokościowe,
- wybrać techniczny sposób jego zasilania (górnym, dolnym),
- sprawdzić hydraulikę przepływu wody w jego komorach.

W praktyce projektowej często ogranicza się wymienione zadania jedynie do oszacowania pojemności użytkowej zbiornika wyrównawczego oraz rozwiązania zagadnień budowlano-konstrukcyjnych, pomijając pozostałe problemy hydrauliczne. W rezultacie uproszczenia projektowych powstały zbiorniki wyrównawcze, które nie mogły być prawidłowo eksploatowane oraz pełnić właściwie swej roli [10].

W prawidłowej eksploatacji zbiorników wodociagowych należy dążyć do maksymalnego wykorzystania ich pojemności, co wiąże się z pełną cykliczną wymianą wody bez możliwości tworzenia się stref stagnacji³ i cyrkulacji wewnętrznej⁴ w komorach. Wszelkie odstępstwa od tej zasady skutkują pogorszeniem się jakości wody wskutek nadmiernego wydłużenia czasu jej przebywania w zbiorniku.

2.1. Pojemność zbiornika sieciowego

2.1.1. Wskazania normatywne a metodyka wymiarowania zbiornika

Zgodnie z normą PN-EN 1508:2002⁵ cyt. *”pojemność zbiornika sieciowego i okres, na który woda jest gromadzona w zbiorniku, zależy od tego, jakie funkcje ma spełniać zbiornik sieciowy i od warunków pracy w systemie dystrybucji wody.”*

Pojemność zbiornika sieciowego zalecana według niniejszej normy powinna stanowić sumę przeciętnego zużycia wody (100% $Q_{d\bar{s}r}$ - średniego dobowego) oraz rezervy bezpieczeństwa, którą ustala się na podstawie oceny ryzyka i prawdopodobnego czasu trwania niesprawności obiektów i przewodów przesyłowych znajdujących się przed zbiornikiem. Wielkość ta powinna być ponadto zwiększona o potrzeby wodne do gaszenia pożaru.

³ strefa stagnacji oznacza przestrzeń komory, w której czas przebywania wody jest kilkakrotnie większy od pozostałej części,

⁴ strefa cyrkulacji wewnętrznej w komorze oznacza lokalną przestrzeń, w której odbywa się ruch wody z minimalną jej wymianą z otoczeniem.

⁵ Zaopatrzenie w wodę. Wymagania dotyczące systemów i ich części składowych przeznaczonych do gromadzenia wody.

W odniesieniu do normatywnych zaleceń warto przypomnieć, że pojemność użytkowa (V_{zb}) zbiornika sieciowego z racji pełnionych funkcji powinna zapewnić:

- zapas wody (retencja) na wyrównywanie różnic pomiędzy stałym dopływem ze źródła do układu a zmiennym poborem wody (V_{wyr}),
- rezerwę eksploatacyjną (asekuracyjną) na czas potrzebny do usunięcia awarii (V_{as}),
- objętość na potrzeby ppoż. (V_{ppoz}), która zgodnie z rozporządzeniem⁶ wynosi od 100 do 600 m³ zależnie od wielkości jednostki osadniczej odpowiednio dla: 5 i 100 tys. mieszkańców.

Równanie bilansowe po uwzględnieniu trzech składowych ma postać:

$$V_{zb} = V_{wyr} + V_{as} + V_{ppoz}$$

Zapas wody na wyrównanie nierównomierności poboru wody V_{wyr} można obliczyć metodą analityczną lub graficzną poprzez bilansowanie w układzie dopływu (zasilania) i poboru wody (histogramu) w ciągu założonego czasokresu, np. tygodnia lub doby. Przykładowo wielkość ta stanowi do 20% maksymalnego dobowego zapotrzebowania Q_{dmax} , przy założeniu stałego dopływu z ujęcia do układu wodociągowego w ciągu doby o poborze wody z nierównomiernością godzinową $N_h=1,5$ [11].

Najwięcej kontrowersji budzi tworzenie rezerwy bezpieczeństwa (zapasu asekuracyjnego) V_{as} w zbiorniku sieciowym, która wymusza losowy charakter pracy każdego systemu wodociągowego. Ogólnie rzecz ujmując, wielkość zapasu rezerwowego jest uzależniona od warunków eksploatacji, tj.:

- relacji pomiędzy potencjalną a rzeczywistą wydajnością źródeł (czy istnieje możliwość zwiększenia lub nie wydajności ujęć w warunkach awarii albo zastąpienie jednego ujęcia przez inne),
- przeciętnego czasu potrzebnego na usunięcie awarii (mobilność służb eksploatacyjnych) oraz częstości zdarzeń zależnych od parametrów hydraulicznych, a także stanu technicznego sieci i obiektów.

Z uwagi na losowy charakter pracy układu wodociągowego ustalenie wartości V_{as} jest możliwe na drodze probabilistycznej (*rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna, teoria procesów losowych*), przy uwzględnieniu częstości występowania awarii i czasu ich trwania. Szacuje się, że objętość asekuracyjna powinna wynosić do 30% Q_{dmax} .

W wielu krajach uważa się, że istnienie rezerwy asekuracyjnej w zbiorniku sieciowym jest korzystne, gdyż ogranicza negatywne skutki awarii. Z tego względu obserwuje się stałą tendencję do powiększania objętości asekuracyjnej V_{as} .

2.1.2. Zalecenia normatywne a praktyka projektowa

W treści normatywnej definicji „*pojemność zbiornika sieciowego*” zawarta jest istotna różnica w stosunku do sposobu wymiarowania zbiornika wyrównawczego w Polsce (tab. 1), zarówno przed, jak i po wprowadzeniu tymczasowych zaleceń z 1982 r.

Na podstawie wyników badań ankietowych przeprowadzonych w 1999 r. [4] można sądzić, że spełnienie zapisu normatywnego o wymiarowaniu zbiornika sieciowego na średnie dobowe zużycie wody przyczyniłoby się do dwukrotnego wzrostu jego pojemności użytkowej w stosunku do stanu rzeczywistego. Średnia objętość zbiorników stacyjnych i sieciowych w 124 przedsiębiorstwach wodociągowych w Polsce wynosiła 57% $Q_{dśr}$ i 39,7% Q_{dmax} .

⁶ (Rozp. Min. Spraw Wewnętrz. i Administr. Dz. U. Nr 121, poz. 1139. 2003)

Ankieta wskazuje ponadto, że największą objętość zbiorników w relacji do $Q_{d\bar{s}r}$ i Q_{dmax} posiadają 32 przedsiębiorstwa, zarządzające wodociągami obsługującymi od 10 do 20 tys. mieszkańców. W tym wypadku pojemność zbiorników stanowi 94% $Q_{d\bar{s}r}$ i 58,7% Q_{dmax} .

Tab. 1. Porównanie zaleceń normatywnych z praktyką projektową w Polsce

Tab. 1. Comparison of standard recommendations to the practice of design in Poland

Składowe bilansu	Norma PN-EN 1508	Praktyka projektowa
V_{wyr}	$Q_{d\bar{s}r}$ – średnie dobowe zużycie wody	do 20% Q_{dmax} dla $N_h=1,5$
V_{as}	ocena ryzyka i prawdopodobieństwa czasu trwania niesprawności obiektów i przewodów przesyłowych do zbiornika	<u>kraje uprzemysłowione</u> do 30% Q_{dmax} , <u>w Polsce</u> nie uwzględniano się w obliczeniach.
$V_{ppoż}$	100 do 600 m ³ odpowiednio: dla 5 i 100 tys. mieszkańców - według rozporządzenia	zgodnie z rozporządzeniem

W ujęciu statystycznym relacja pojemności użytkowej eksploatowanych zbiorników w stosunku do średniego i maksymalnego zapotrzebowania wody uległa wzrostowi w ostatniej dekadzie XX wieku wskutek zmniejszenia się jej zużycia o około 50%.

Z reguły proporcje pomiędzy składowymi równania bilansowego istotnie różnią się dla zbiorników sieciowych w tym samym systemie wodociągowym. Zazwyczaj już na etapie projektowania nieprecyzyjnie ustala się pojemność użytkową zbiornika w relacji do pełnionych funkcji. Jako wręcz akademicki przykład uproszczonego podejścia projektantów była budowa w okresie 1971-1983 pięciu zbiorników w Gdyni [11], każdy o pojemności 5 tys. m³ bez uwzględnienia w obliczeniach ich lokalizacji w układzie i pełnionej funkcji. Z obliczeń bilansu wody według stanu w 1994 r. wynika, że relacja zapasu wody w pięciu zbiornikach w stosunku do średniej produkcji $Q_{d\bar{s}r}$ zmieniała się od 25 do 57% w poszczególnych układach (strefach) wodociągowych GSW [9].

2.1.3. Ograniczenia w realizacji zaleceń normatywnych

W realizacji zaleceń normy PN-EN 1508 należy pamiętać o specyfice współdziałania zbiorników sieciowych z przewymiarowaną siecią wodociągową często nadmiernie zanieczyszczoną osadami. W opinii autora każdorazowo powinno się uwzględniać stopień przewymiarowania danego układu wodociągowego wyrażony przez dwa współzależne parametry: prędkość wody i czas jej przebywania w sieci [9]. Uwarunkowania te przyczyniają się do znacznego wzrostu wypadkowego czasu przebywania wody w układach dystrybucji, zanim trafi ona do odbiorców. Jako dowód empiryczny przedstawiono w monografii [9] wyniki obliczeń czasu przebywania wody w sieci i zbiornikach na podstawie komputerowej symulacji przepływu wody w czterech układach wodociągowych. Przeciętny czas zatrzymania wody w analizowanych układach wyniósł ponad 26⁷ godzin podczas 96-godzinnej okresu symulacji.

⁷ obliczony 26 godzinny czas przebywania wody w zbiorniku nie stanowi rzeczywistej wartości tego parametru, ponieważ wynik obliczeń zależy od długości czasu symulacji, zatem wraz z jego wydłużeniem należy oczekiwać dalszego wzrostu do wartości maksymalnej, która odpowiadałaby rzeczywistemu czasowi przebywania wody w zbiorniku.

W Polsce nasila się znaczenie zabezpieczenia odpowiedniej *częstości wymiany wody* w zbiorniku, aby nie wystąpił proces wtórnego jej zanieczyszczenia, a nawet zagniwania. Z tego powodu sformułowano następujące ogólne zalecenia odnośnie maksymalnego czasokresu gromadzenia wody w zbiorniku:

- 5 dni, w porze letniej, przy temperaturze większej niż 18°C,
- 10 dni, w porze zimowej, podczas ujemnych temperatur powietrza.

Zalecenia te są jednak nieprecyzyjne, jeśli ma się świadomość, że przebieg procesu wtórnego zanieczyszczenia wody jest uwarunkowany wieloczynnikowo, a wpływ temperatury jest tylko jednym z nich. Równie istotne są pozostałe czynniki, takie jak: brak stabilności chemicznej i biologicznej wody, stan sanitarny sieci wodociągowej, itd. Niestety identyfikacja ilościowa czynników mających wpływ na jakość transportowanej wody jest trudna, gdyż zależą one od prędkości wody i czasu jej przebywania oraz częstości i skuteczności płukania sieci wodociągowej [8].

2.2. Wpływ lokalizacji zbiornika sieciowego w obszarze zasilania na parametry eksploatacyjne sieci i obiektów

Zbiornik sieciowy można zlokalizować w dowolnym miejscu obszaru zasilania, jednak najczęściej decyduje o tym ukształtowanie terenu. Wybór miejsca wynika chociażby z faktu, że budowa zbiornika terenowego jest od 4-6 razy tańsza aniżeli wieżowego. Równocześnie trzeba uwzględnić pozytywne i negatywne oddziaływanie lokalizacji zbiornika sieciowego na warunki funkcjonowania pozostałych elementów systemu. W standardowej analizie hydraulicznej rozważa się położenie zbiornika jako początkowe, końcowe i pośrednie w stosunku do odbiorców wody w obszarze zasilania. W każdym z trzech rozwiązań można znaleźć przewagę zalet lub wad w zależności od rangi przyjętego kryterium oceny. Poniżej przedstawiono argumenty, które należy rozważyć przed podjęciem decyzji o lokalizacji zbiornika, w tym szczególnie uwarunkowania wpływające na możliwość zachowania normatywnej jakości ujmowanej i transportowanej wody.

Lokalizacja zbiornika sieciowego na początku obszaru zasilania upraszcza schemat technologiczny ujęcia, jeśli przejmuje on także funkcję zbiornika stacyjnego. W rezultacie nieciągłości strumienia wody w zbiorniku sieciowym powstaną dwa niezależne układy hydrauliczne przed i za zbiornikiem. W efekcie zapewni on stabilizację działania urządzeń na ujęciu i w stacji uzdatniania wody. Zaletą rozwiązania jest możliwość eksploatacji ujęcia i stacji uzdatniania ze stałą wydajnością bez oddziaływania zakłóceń spowodowanych losowym poborem wody przez odbiorców w układzie zasilania. Stabilizacja działania ujęcia korzystnie wpływa na zachowanie niezmiennej jakości ujmowanej wody, co przyczynia się do prawidłowego funkcjonowania stacji uzdatniania.

W obszarze zasilania początkowego zbiornika sieciowego można oczekiwać ponadto umiarkowanego wahań ciśnienia w sieci wskutek chwilowej zmienności poboru wody w ciągu doby. Warunkiem jest jednak prawidłowe zwymiarowanie sieci wodociągowej z uwzględnieniem optymalnego spadku hydraulicznego w doborze średnic w zakresie od 5 do 10 promili. Wartości te zapewniają optymalną prędkość przepływu wody w przewodach o dowolnej średnicy.

Równocześnie lokalizacja zbiornika na początku układu zasilania nie sprzyja zachowaniu normatywnej jakości wody w sieci wodociągowej ze względu na minimalny pobór wody w godzinach nocnych, szczególnie w małych i średnich układach. Stagnacja wody w porze nocnej istotnie zwiększa czas jej przebywania w przewodach i zbiorniku, zanim rano trafi do odbiorców.

W wypadku zbiornika końcowego nocny tranzyt wody z oddalonego ujęcia korzystnie wpływa na minimalizację czasu zatrzymania wody, ponieważ wymusza jej przepływ w magistralach i przewodach rozprowadzających, a niekiedy nawet sieci rozdzielczej. Po zmianie kierunku przepływu w godzinach tranzytu istnieje ponadto możliwość uruchomienia osadów z części sieci pierścieniowej w sąsiedztwie tzw. punktów zerowych, którą zasila zbiornik w godzinach największego poboru wody. Oczywiście dłuższa droga przepływu wody w godzinach jej tranzytu pomiędzy ujęciem i zbiornikiem końcowym przyczynia się do konieczności podwyższenia linii ciśnienia w sieci w stosunku do pozostałego okresu doby. Niekorzystnym skutkiem jest zwiększone zużycie energii przez pompy, a także potencjalnie większa zmienność ciśnienia w obszarze zasilania, w porównaniu do jego rozkładu ze zbiornikiem początkowym. Wymienione wady rozwiązania ze zbiornikiem końcowym są skutecznie neutralizowane w istniejących przewymiarowanych sieciach wodociągowych wskutek minimalnych oporów przepływu (płaski przebieg linii ciśnienia).

Zastosowanie koncepcji ze zbiornikiem pośrednim stanowi połączenie obu rozwiązań, zatem zawiera uwarunkowania eksploatacyjne zarówno pozytywne, jak i niekorzystne.

2.3. Wpływ wysokościowego położenia zbiornika na funkcjonowanie pozostałych elementów układu wodociągowego

W układach wodociągowych dla ośmiu miast [9] stwierdza się na podstawie analizy hydraulicznej, że wysokościowe położenie zbiornika sieciowego zazwyczaj nie zapewnia poziomu wymaganego ciśnienia gospodarczego w całym obszarze zasilania. Najczęściej spotyka się posadowienie zbiornika sieciowego zbyt nisko, a niekiedy za wysoko w odniesieniu do wysokości zabudowy. Rozważania przedstawione poniżej pokazują współzależność hydrauliczną w funkcjonowaniu ujęcia, zbiornika, pompowni i sieci wodociągowej. Niewłaściwe wysokościowe położenie zbiornika sieciowego ma bezpośredni wpływ na konieczność dostosowania jego sposobu eksploatacji do funkcjonowania pozostałych elementów systemu wodociągowego.

Lokalizacja zbiornika na *zbyt niskiej wysokości* w stosunku do potrzeb w obszarze zasilania powoduje ograniczenie możliwości pełnego wykorzystania jego objętości użytkowej. W takim przypadku operator utrzymuje mało zmienny (możliwie najwyższy) poziom wody w zbiorniku, aby w ten niekorzystny sposób zapewnić wymagane ciśnienie gospodarcze w obszarze zasilania. Stosowanie takiego sposobu eksploatacji zbiornika uniemożliwia prawidłową cykliczną wymianę wody w zbiorniku, co przyczynia się istotnie do zwiększenia czasu jej przebywania (patrz: 2.3.1.). Z kolei im dłuższy jest czas przebywania wody w zbiorniku oraz przewymiarowanej sieci zanieczyszczonej osadami, tym szybciej zmniejsza się zawartość rozpuszczonego tlenu i postępuje proces degradacji jej jakości. W takim wypadku podstawowe zadanie zbiornika sieciowego, polegające na wyrównaniu nierównomierności rozbioru wody, realizuje się pośrednio poprzez eksploatację ujęcia ze zmienną wydajnością⁸. Brak stabilizacji w działaniu ujęcia wpływa niekorzystnie na jakość ujmowanej wody, co z kolei zaburza prawidłowe funkcjonowanie stacji uzdatniania [10].

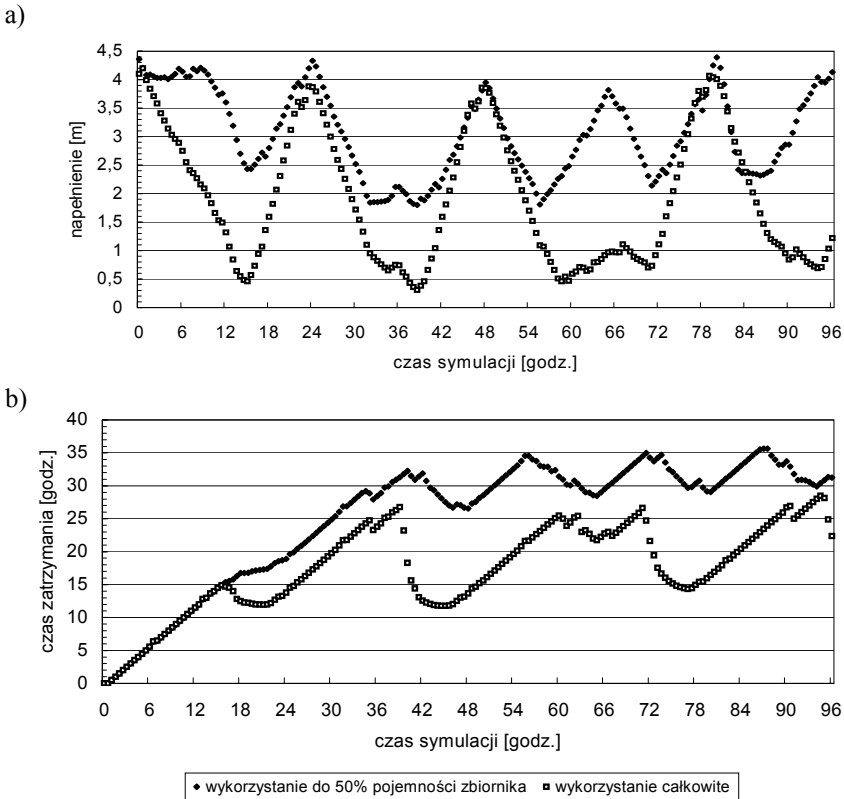
⁸ okresowo-przemienny sposób eksploatacji studzien na ujęciu wód podziemnych polega na realizacji przez operatora specyficznego harmonogramu ich włączeń i wyłączeń w zależności od chwilowej zmienności poboru wody w układzie wodociągowym, wbrew projektowej zasadzie eksploatacji ujęcia ze stałą wydajnością.

Jeśli zbiornik zlokalizowano *za wysoko* w stosunku do potrzeb, wówczas występuje nadmierne ciśnienie w sieci w odniesieniu do wymaganego poziomu gospodarczego, przy zawyżonej i nieefektywnej wysokości podnoszenia pomp na ujęciu.

W takim wypadku operator przez tylko częściowe napełnienie zbiornika wyrównawczego dostosowuje ciśnienie do wymagań w obszarze zasilania. W konsekwencji staje się konieczne ograniczanie zdolności produkcyjnej ujęcia, gdyż w godzinach nocnych nie ma możliwości tranzytu wody do zbiornika. W efekcie wydajność ujęcia jest zmienna w poszczególnych godzinach doby, a jego wartość najmniejsza odpowiada minimalnemu rozbiorowi wody (patrz: 2.3.2.).

2.3.1. Wpływ napełnienia zbiornika wyrównawczego na czas przetrzymania wody

Wpływ napełnienia zbiornika wyrównawczego na czas przetrzymania w nim wody zilustrowano na podstawie wyników symulacji komputerowej (rys. 1) na przykładzie czynnego układu wodociągowego z siecią o długości około 80 km.



Rys. 1. Relacja pomiędzy napełnieniem zbiornika wyrównawczego a czasem przetrzymania wody

Fig. 1. The relationship between filling the storage tank and water residence time

W tym celu wykonano 96-godziną komputerową symulację przepływu wody w istniejącym układzie wodociągowym dla dwóch następujących przypadków: 50 i 100% wykorzystania jego pojemności użytkowej. Przyjęcie całkowitego wykorzystania pojemności zbiornika (100%) zapewnia zalecaną dobową cykliczną wymianę wody w zbiorniku w zakresie od poziomu maksymalnego do minimalnego. Wyniki obliczeń czasu przetrzymania wody w zbiorniku zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Czas przetrzymania wody w zbiorniku wyrównawczym zależnie od stopnia wykorzystania jego pojemności użytkowej

Tab. 2. The residence time of water in the storage tank, depending on the degree of utilization of storage capacity

Pojemność użytkowa zbiornika [%]	Średnie napełnienie zbiornika [m]	Czas przetrzymania wody w zbiorniku [h]		Czas ^{*)} przetrzymania wody w rurociągu na wypływie ze zbiornika [h]	Odchylenie standardowe wartości średniej [h]
		średni	maksymalny		
50	3,06	25,2	35,2	11,0	5,6
100	1,90	17,5	28,5	8,3	2,9

*) średnia arytmetyczna z sumy czasów chwilowych podczas 96 godzinnej symulacji z krokiem 30 min.

Symulacja dowodzi, że w wypadku 100% wykorzystania pojemności zbiornika wyrównawczego można o 30% zmniejszyć średni czas przebywania w nim wody. W konsekwencji pozwoli to również ograniczyć o jedną czwartą średni czas przebywania wody w rurociągu odpływowym ze zbiornika. Przykład ten pokazuje, że poprzez prawidłową eksploatację zbiornika wyrównawczego, z zachowaniem cyklicznej wymiany całej jego objętości, można zdecydowanie zmniejszyć czas przetrzymania wody w zbiorniku oraz rurociągu odpływowym. Krótszy czas przetrzymania wody w zbiorniku sprzyja zachowaniu normalnej jakości wody w przewymiarowanej sieci wodociągowej, pomimo niekorzystnych warunków hydraulicznych.

2.3.2. Wpływ wysokościowego położenia zbiornika na funkcjonowanie ujęć wody

Jako przykład wybrano jednostrefowy układ wodociągowy zasilany w wodę z dwóch ujęć wód podziemnych: pierwszego (U1) poprzez przepływowy zbiornik sieciowy oraz drugiego (U2) współdziałającego bezpośrednio z siecią z udziałem pomp głębinowych.

W oparciu o wyniki przeprowadzonej analizy hydraulicznej stwierdzono, iż wydajność eksploatacyjna drugiego ujęcia (U2) stanowi zaledwie 40% jego potencjalnej zdolności produkcyjnej, wynikającej z zatwierdzonych zasobów oraz zainstalowanych urządzeń na obiekcie i w stacji uzdatniania. Jednocześnie na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych ustalono, że warunki pracy ujęcia (U2) i jego rola w układzie wodociągowym uległy niekorzystnej zmianie po włączeniu do eksploatacji w 1995 r. zbiornika sieciowego. Ponadto potwierdzono obliczeniami symulacyjnymi, że posadowienie nowego zbiornika z napyłem górnym na rzędnej 60 m n.p.m. spowodowało stabilizację ciśnienia w całej sieci na poziomie o 0,1 MPa wyższym od wymagań w warunkach szczytowego zapotrzebowania na wodę.

Powyższa diagnoza pokazuje, że położenie zbiornika wyrównawczego za wysoko o kilka metrów w stosunku do istniejących potrzeb stanowiło bezpośrednią przyczynę występujących problemów eksploatacyjnych w układzie. Z tego powodu nastąpiło zmniejszenie zdolności eksploatacyjnej ujęcia (U2) wskutek braku możliwości tranzytu wody do zbiornika wyrównawczego. Kosztowną inwestycję zrealizowano bez obliczeniowego sprawdzenia podczas prac projektowych możliwości wzajemnego współdziałania zbiornika z istniejącymi ujęciami i z siecią.

W zaistniałej sytuacji wymiana pomp głębinowych na ujęciu (U2) była niewskazana, ponieważ spowodowałaby przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia (150% wymaganego gospodarczego⁹) w całej sieci. Aby móc przywrócić hydrauliczne warunki, które umożliwią pełne wykorzystanie zdolności produkcyjnej ujęcia (U2), stało się koniecznością dokonanie podziału układu na dwie strefy ciśnienia. W tym celu utworzono strefę niskiego ciśnienia zasilaną tylko z ujęcia (U2). Równocześnie dla stworzenia warunków jego eksploatacji ze stałą wydajnością zaproponowano przebudowę istniejącej sieci w taki sposób, aby umożliwić tranzyt nadmiaru wody do zbiornika wyrównawczego oddalonego o 5,6 km od ujęcia (U2). Do realizacji tranzytu wody konieczne było zaprojektowanie dodatkowej pompowni międzystrefowej.

Lokalizacja zbiornika wyrównawczego za wysoko w stosunku do potrzeb jest przykładem inwestycji, która spowodowała łańcuchową reakcję w koniecznych działaniach naprawczych. [10]. Mechanizm ten zwany przez autora „błędym kołem inwestycyjnym” polega na generowaniu nowych problemów podczas modernizacji istniejącego wodociągu, które są możliwe do rozwiązania jedynie poprzez kolejne inwestycje. Taka niefrasobliwość w działaniach inwestycyjnych powoduje marnotrawienie znacznych środków finansowych, których zazwyczaj brakuje w przedsiębiorstwach na unowocześnienie eksploatowanego systemu wodociągowego.

Częstokroć niekorzystne zmiany strukturalne w systemie wodociągowym ze względu na współdziałanie jego elementów ograniczają w przyszłości obszar poszukiwań prawidłowego rozwiązania w opracowaniu koncepcji „wieloletniego planu rozwoju i modernizacji urządzeń wodociągowych”¹⁰.

2.4. Wpływ sposobu zasilania zbiornika na oddziaływanie hydrauliczne i kształtowanie jakości wody

Dopływ wody do zbiornika sieciowego może znajdować się zarówno powyżej, jak i poniżej lustra wody (górnym, dolnym). Wybór jednego z dwóch rozwiązań należy rozważyć z uwzględnieniem dwóch powodów:

- chemicznego składu wody,
- hydraulicznego oddziaływania zbiornika w układzie wodociągowym.

Napływ górny do zbiornika jest korzystny ze względu na naturalne napowietrzanie wody i uwalnianie dwutlenku węgla. Jednak w dużych zbiornikach - ze względu na znaczną powierzchnię kontaktu tafli wody z powietrzem - może następować nadmierne uwalnianie się dwutlenku węgla, co prowadzi do wytrącania się osadów węglanowych (kamienia) na jego dnie i ścianach.

⁹ PN-93/B-1706. Instalacje wodociągowe. Wymagania w projektowaniu.

¹⁰ Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków (Dz.U. Nr 72, poz. 747 z późniejszymi zmianami).

W wypadku dopływu dolnego udaje się zapewnić skuteczne mieszanie wody w małych zbiornikach pod warunkiem ukierunkowania strumienia wlotowego z jednoczesnym zapewnieniem prędkości ($v=1,0$ m/s). W celu poprawy hydrauliki większych zbiorników stosuje się ich podział na komory z jednoczesnym ukierunkowaniem przepływu przez różnego rodzaju przegrody [6]. Niekiedy jednak wskutek *bezruchu lustra wody* na jej powierzchni może wytworzyć się *niewielki kożuch*. Aby tego uniknąć, w dużych zbiornikach można dodatkowo zastosować *zraszanie*.

Wysokościowe usytuowanie wlotu wody do zbiornika sieciowego wpływa także na jego hydrauliczne oddziaływanie w układzie wodociągowym. Jeśli wylot przewodu doprowadzającego wodę do zbiornika przepływowego jest umieszczony powyżej wysokości jego maksymalnego napełnienia (dopływ górny), to natężenie dopływu Q_d jest stałe, niezależnie od zmian poziomu wody w zbiorniku. Natomiast, jeśli zbiornik z dopływem górnym stanowi jedyne źródło wewnętrznego zasilania układu, wówczas wypływ wody Q_w ze zbiornika będzie zawsze równy jej zużyciu q ($Q_w=q$) w obszarze zasilania, niezależnie od jego zmienności napełnienia.

Z kolei, gdy układ wodociągowy zasilany jest przez więcej niż jedno źródło, to natężenie wypływu Q_w ze zbiornika zależy zarówno od *poboru wody* q z sieci, jak i *wysokości jego napełnienia* (stanu wody w danym zbiorniku) w stosunku do poziomu wody w pozostałych zbiornikach. Natężenie wypływu Q_w jest największe ze zbiornika o najwyższym poziomie zwierciadła wody. Zgodnie z zasadą naczyń połączonych występują wówczas uciążliwe, tzw. przepływy międzyzbiornikowe w dążeniu do wyrównania poziomów wody we wszystkich zbiornikach, które dodatkowo obciążają sieć wodociągową. Zjawisko to sugeruje niedostateczną przepustowość istniejącej sieci, co niekiedy staje się niesłusznym argumentem do jej rozbudowy [12].

W wypadku istniejących zbiorników sieciowych, ze względu na ilościową zmianę warunków zasilania i poboru wody w ostatnim dwudziestolecu, wydaje się konieczne rozpoznanie rzeczywistej struktury przepływu w ich komorach, szczególnie jeśli obserwuje się symptomy pogarszającej się jakości wody. Na podstawie pomiarów można wprowadzić modyfikację rozwiązań stanu istniejącego, np. dokonać zmiany sposobu lub/i umiejscowienia dopływu i odpływu wody albo zastosować dodatkowe przegrody w celu ukierunkowania przepływu [6].

3. Kryterium oceny funkcjonowania zbiornika sieciowego

W ocenie funkcjonowania zbiornika sieciowego ważnym parametrem jest dopuszczalny czas zatrzymania, który sprzyja zachowaniu normatywnej jakości wody, zwłaszcza w przewymiarowanych sieciach wodociągowych. Wielkość ta, podobnie jak zjawisko wtórnego zanieczyszczenia wody, jest uwarunkowane wieloczynnikowo [2]. Na pierwszym miejscu wymienia się czynniki, które mają wpływ na stabilność chemiczną i biologiczną wody uzdatnionej, czyli skłonność (lub jej brak) do zmian własności fizyczno-chemicznych i biologicznych. Lista najważniejszych substancji, których stężenie należy kontrolować ze względu na ich wpływ na rozwój mikroorganizmów i ubytek tlenu rozpuszczonego, obejmuje azot amonowy i azotynowy, węgiel organiczny (BWO), żelazo (II), mangan (II), wodór gazowy rozpuszczony, dwusiarczki, siarkowodór. Drugą grupę stanowią czynniki związane z materiałami stosowanymi do budowy sieci i zbiorników [15]. Z kolei do trzeciej grupy należy zaliczyć czynniki kształtujące hydrauliczne warunki przepływu wody, określone przez: prędkość i jej zmienność w przewodach, rzeczywisty czas przebywania wody

w sieci i zbiornikach, a nawet dynamikę zmian ciśnienia w węzłach sieci [9]. Dla prawidłowo działającego układu wodociągowego można przyjąć, że czynniki grupy I i II są mało zmienne, zatem dopuszczalny czas przebywania wody w sieci i obiektach, ze względu na jakość wody, zależy głównie od czynników grupy III [8].

Różnorodność i lokalny charakter wymienionych czynników powoduje, że zazwyczaj nie jest możliwe określenie wpływu jednego z czynników (np. czasu przebywania wody w zbiorniku) na proces wtórnego jej zanieczyszczenia w układzie dystrybucji, z pominięciem roli i znaczenia pozostałych składników. Zapewne jest to powód braku doniesień w literaturze o wartościach dopuszczalnego czasu zatrzymania wody w systemie wodociągowym i jego elementach składowych, zanim trafi ona ze źródła do odbiorcy. Najczęściej stwierdza się bez podania weryfikacji empirycznej, że parametr ten odgrywa istotną rolę w procesie rozwoju biofilmu [14] i odkładania osadów korozyjnych w sieci wodociągowej [13]. Część autorów [6, 7] zwraca szczególną uwagę na konieczność cyklicznej wymiany wody w zbiornikach, ponieważ nadmierny czas jej przebywania sprzyja rozwojowi życia biologicznego.

Poglądowe informacje zawarte w literaturze przedmiotu wskazują, że wartości dopuszczalnego czasu zatrzymania w odniesieniu do zbiorników zaleca się przyjmować w szerokim zakresie od 1 do 7 dób. Równocześnie podkreśla się zależność tego parametru od jakości wody i jej temperatury. Z obserwacji autora wynika, że dopuszczalny czas zatrzymania wody należałoby określać indywidualnie dla każdego układu wodociągowego, w tym zbiorników, na podstawie wyników monitorowania jakości wody. Jednocześnie należy podkreślić, że wartość tego parametru jest istotnie zróżnicowana w zmiennych warunkach eksploatacji danego układu wodociągowego.

Niestety eksploatatorzy nie prowadzą monitoringu przy współpracy ze środowiskiem naukowym w celu wyznaczenia kinetyki zmian wartości tego parametru, który stanowiłby obiektywne kryterium oceny funkcjonowania istniejących zbiorników. Brak wiedzy o dopuszczalnym czasie przebywania wody w zbiornikach danego systemu wodociągowego uniemożliwia trafną interpretację wartości tego parametru, ustaloną na podstawie wyników symulacji komputerowej [9, 12].

W celu uzupełnienia brakujących informacji autor widzi potrzebę przeprowadzenia eksperymentalnych badań wpływu czasu przebywania wody w zbiornikach na jakość wody w danym systemie wodociągowym.

4. Podsumowanie

W polskiej literaturze technicznej poświęca się niewiele uwagi (prawie w ogóle) problematyce projektowania i budowy, a szczególnie eksploatacji zbiorników wodociągowych. Podręczniki akademickie zawierają jedynie ogólną wiedzę, często z okresu międzywojennego [3], o klasyfikacji zbiorników według różnych kryteriów, metodach określania ich wielkości, o konstrukcji i elementach ich wyposażenia, o zasadach budowy, a także przykładowy opis wykonanych obiektów. W nielicznych podręcznikach [1] znajdują się podstawowe informacje o prawidłowej eksploatacji zbiorników, które ograniczają się do ogólnych zaleceń odnośnie:

- optymalnego wykorzystania ich pojemności,
- utrzymania normatywnej jakości wody,
- kontroli stanu technicznego,
- sposobów płukania i dezynfekcji.

Nadal szereg układów, a nawet systemów wodociągowych w Polsce, funkcjonuje bez zbiorników sieciowych, a budowę zbiorników stacyjnych uważa się niesłusznie za zbyt kosztowną rozbudowę ich struktury. Jako alternatywę stosuje się obiekty do podwyższania ciśnienia, takie jak: tradycyjne hydrofornie oraz współczesne zestawy hydroforowe (wielopompowe), a także pompownie z pompami wyposażonymi w przemienniki częstotliwości.

Zbiorniki wodociągowe są niedoceniane przez eksploatatorów (inwestorów), chociaż stanowią równie ważny element systemu dystrybucji wody w kształtowaniu hydrauliki, która ma bezpośredni wpływ na jej jakość. W tym aspekcie podstawowym warunkiem prawidłowego działania zbiornika jest zapewnienie w nim cyklicznej wymiany wody w mniejszym czasie od dopuszczalnej wartości tego parametru.

W praktyce eksploatacyjnej często występuje nadmierny czas zatrzymania (przebywania) wody w zbiornikach sieciowych z następujących powodów:

- niedostosowania ich pojemności do funkcji, jaką pełnią w układzie,
- posadowienie ich za nisko, co wymusza utrzymywanie maksymalnego poziomu wody w komorach zbiornika, aby ograniczyć niedobory ciśnienia w sieci,
- usytuowanie ich za wysoko, co skutkuje możliwością tylko częściowego wykorzystania ich pojemności.

Niezgodność założeń projektowych z rzeczywistością zmusza operatora do utrzymywania quasi-stałego poziomu wody w komorach zbiornika, co wywołuje reakcję łańcuchową w układzie wodociągowym przez:

- eksploatację pompowni II stopnia z chwilową wydajnością dostosowaną do poboru wody przez odbiorców (układ ze zbiornikiem stacyjnym),
- realizację harmonogramu włączeń i wyłączeń pomp w poszczególnych studniach w taki sposób, aby dostosować ich wydajność do chwilowych zmian poboru wody (układ bezpośredni bez zbiornika stacyjnego i pompowni II stopnia).

W obu sytuacjach staje się konieczny okresowo-przemienny sposób eksploatacji studzien na ujęciu wód podziemnych, który powoduje:

- skokowe zwiększanie czasu zatrzymania wody w okresowo nieczynnych rurociągach tłocznych na ujęciu,
- nadmierne wymywanie związków żelaza i manganu z warstwy wodonośnej wskutek gwałtownych wahań poziomu zwierciadła dynamicznego w studniach [7],
- zakłócenia w działaniu stacji uzdatniania wskutek zmiennego składu chemicznego ujmowanej wody.

W diagnostyce eksploatacyjnej ważnym zadaniem jest uwzględnienie współdziałania zbiornika sieciowego z pozostałymi elementami systemu wodociągowego. Z powodu złożonych relacji przyczynowo-skutkowych funkcjonowanie zbiornika sieciowego trzeba rozpatrywać w kompleksowej analizie hydraulicznej za pomocą komputerowego modelu przepływów. Parametrem wiodącym w obliczeniach jest wypadkowy czas przebywania wody w układzie dystrybucji wody na drodze od źródła do odbiorcy poprzez ujęcie, pompownię, strukturę przewodów i zbiornik sieciowy. W ocenie wartości tego parametru ze względu na zagrożenie pogorszenia się jakości wody, potrzebna jest znajomość jego dopuszczalnego poziomu w danym systemie wodociągowym. Do tego celu nie wystarczy rutynowy monitoring jakości wody. Każdorazowo konieczna jest analiza kinetyki zmian jakości wody na podstawie wyników badań laboratoryjnych systematycznie pobieranych próbek, w tym szczególnie ze zbiornika.

Bibliografia

- [1] Bauer A., Dietze G., Muller W. i inni. Poradnik eksploatatora systemów zaopatrzenia w wodę. Wyd. Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2005, s. 366.
- [2] Besner M. C., Gauthier V., Barbeau B. et al. Understanding distribution system water quality. *Journal AWWA*, 2001, vol. 93, no. 7, pp. 101-114.
- [3] Ciechanowski Z., Matakiewicz M., Pomianowski K. Zasady budowy wodociągów. Lwów 1914. Reprint. Wyd. Seidel-Przywecki Sp. Z o.o., Warszawa 2008, s. 330.
- [4] Dymaczewski Z., Sozański M. M. Wodociągi i kanalizacja w Polsce. Tradycja i współczesność. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Poznań-Bydgoszcz 2002, s. 1163.
- [5] Gauthier V., Besner M. C., Barbeau B. et al. Storage tank management to improve drinking water quality: Case study. *Journal Water Resources Planning & Management*, 2000, vol. 126, no. 4, pp. 221-228.
- [6] Grayman W. M., Rossman L. A., Deininger R. A. et al. Mixing and aging of water in distribution system storage facilities. *Journal AWWA*, 2004, vol. 96, no. 9, pp. 70-80.
- [7] Knocke W. R., Shorney H. L., Bellamy J. D. Examining the reactions between soluble iron, DOC, and alternative oxidants during conventional treatment. *Journal AWWA* 1994, vol. 86, no. 1, pp. 117-127.
- [8] Kulbik M. Wpływ warunków hydraulicznych w sieci wodociągowej na wtórne zanieczyszczenie wody. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód – zagadnienia współczesne. Praca zbiorowa pod redakcją M. M. Sozańskiego. Tom II, PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań, Polska 2010, s. 35-51.
- [9] Kulbik M. Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2004, (49), s. 211.
- [10] Kulbik M. Wybrane problemy eksploatacyjne w systemach wodociągowych w Polsce. *INSTAL* 2002, vol. 218, nr 5, s. 30-35.
- [11] Kulbik M. Półwiecze ewolucji wodociągów w Gdyni. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5, 1996, s. 311-327.
- [12] Kulbik M. Doświadczenia z budowy i wdrażania modelu komputerowego Gdynińskiego Systemu Wodociągowego. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1995, nr 7, 1995, s. 230-233.
- [13] Nawrocki J., Świetlik J. Analiza zjawiska korozji w sieciach wodociągowych. *Ochrona Środowiska*, 2011, vol. 33, nr 4, s. 27-40.
- [14] Świdzka-Bróż M. Skutki obecności biofilmu w systemach dystrybucji wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. *Ochrona Środowiska*, 2012, vol. 34, nr 1, s.9-14.
- [15] Wichrowska B. Zanieczyszczenie wody do picia w przewodach wodociągowych w zależności od ich rodzaju. *Informacja INSTAL*, 1994, nr 4, s.7-11.