

Ireneusz Nowogoński[†], Ewa Ogiolda[‡], Marlena Kubiszyn[§]

MODELOWANIE WARUNKÓW PRACY POMPOWNI W SYSTEMACH GRAWITACYJNO-TŁOCZNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie symulacji warunków pracy pompowni w systemach grawitacyjno-tłocznych. Przykład praktyczny uwzględnia analizę w warunkach dynamicznych systemu wyposażonego w 10 pompowni o różnych funkcjach. Zastosowano zarówno lokalne przydomowe punkty tłoczne, lokalne punkty tłoczne umożliwiające wypływanie sieci, jak i pompownie tranzytowe między miejscowościami. Przedstawiony model pozwolił na optymalizację pojemności czynnej pompowni, doboru pomp z uwzględnieniem częstotliwości włączeń oraz czasu przetrzymania ścieków.

Słowa kluczowe: modelowanie, pompownie kanalizacyjne, symulacja.

WSTĘP

Modele hydrodynamiczne stały się znaczącym narzędziem w analizie problemów inżynierskich [Orłowski 1986, Dąbrowski 2013]. Modelowanie systemów odprowadzania ścieków sanitarnych i wód opadowych pełni również coraz większą rolę w gospodarce wodą i ściekami. Modelowanie dynamiczne często dotyczy interakcji między podsieciami o charakterze grawitacyjnym a układami tłocznymi [Tian i inni 2017] obejmującym lokalne pompownie przydomowe, pompownie sieciowe pozwalające na wypływanie sieci grawitacyjnej oraz pompow-

[†] Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski

[‡] Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski

[§] Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski, absolwentka

niami o charakterze tranzytowym. Typowe rozwiązania (np. Epa SWMM) wykorzystują metodę numeryczną pozwalającą na rozwiązanie równań de Saint Venante'a [Bogdan i inni 2014]. Możliwe jest opracowanie modelu tak, aby uzyskać warunki przepływu ciśnieniowego. Prawdopodobnie przygotowany model pozwala na symulację współpracy obiektu reprezentującego charakterystykę pompy z rurociągami odwzorowującymi pracujące pod ciśnieniem odcinki rurociągu tłoczego.

METODYKA ANALIZY

Z obliczeniowego punktu widzenia do rozwiązania podsystemów ciśnieniowego i grawitacyjnego stosowane są różne metody numeryczne. Stosowane narzędzia muszą siłą rzeczy pozwalać na analizę diametralnie różnych zagadnień. Model sieci grawitacyjnej zwykle oparty jest na jednowymiarowych równaniach de Saint-Venante'a w postaci [Jin i Walski 2008]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f + S_i \right) + L = 0$$

w których:

t – czas;

x – odległość wzdłuż trasy przepływu cieczy;

y – napełnienie kanału;

A – powierzchnia czynna w przekroju przepływu;

A_0 – powierzchnia swobodna w przekroju przepływu;

q – dopływ boczny;

g – przyspieszenie ziemskie;

S_0 – spadek dna kanału;

S_f – spadek ciśnienia wynikający ze strat tarcia;

S_i – spadek wynikający z wyniku lokalnego efektu rozszerzania-kurczenia

(straty według metody dużych wirów);

L – moment pędu dopływu bocznego.

Mimo, że równania pierwotnie opracowano dla wolnozmiennych przepływów w kanałach otwartych, można je również stosować do przepływów grawitacyjnych i ciśnieniowych w zamkniętych kanałach w sieciach kanalizacyjnych.

Model SWMM traktuje pompy jako odcinki, które mają zdefiniowaną zależność między natężeniem przepływu Q a wysokością H lub jakimś jej substytutem. Zależność ta jest definiowana przez wprowadzoną przez użytkownika krzywą

pompy. Chociaż nie jest to wymagane, węzeł wejściowy pompy zwykle jest węzłem magazynowym (Storage Unit), który reprezentuje moką studnię stacji pomp. Wydajność pompy nie może wykroczyć poza wprowadzone wartości minimalną i maksymalną. Wartość przepływu znajdująca się na krzywej pompy jest mnożona przez parametr prędkości obrotowej w aktualnie pracującej pompie. Parametr prędkości obrotowej może być korygowany podczas symulacji za pomocą reguł sterowania. Możliwe jest również wykorzystywanie go do sterowania pracą pompy na podstawie poziomu ścieków w studziencie (np. parametr równy 1, gdy poziom w komorze roboczej jest powyżej głębokości rozruchu i równy 0, gdy poniżej głębokości wyłączenia). Oszacowana wydajność pompy jest sprawdzana, aby upewnić się, że poziom wody w węźle wejściowym nie spadnie poniżej 0 w bieżącym kroku czasowym. Jeśli węzeł jest węzłem magazynowym, wówczas wydajność pompy nie może przekroczyć wartości Q_{\max} , [Rossmann 2017]:

$$Q_{\max} = Q_{in} + V_N / \Delta t$$

gdzie:

Q_{in} – ostatnio obliczony całkowity dopływ do węzła;

V_N – objętość w węźle na początku kroku czasowego;

Δt – bieżący przedział czasu.

Jeśli węzeł wejściowy nie jest węzłem magazynowym i analiza realizowana jest metodą fali dynamicznej, to powyższe równanie jest używane z aktualną wydajnością pompy, w celu oszacowania, jaka będzie rzędna ciśnienia w węźle wlotowym na końcu bieżącego kroku czasowego. Jeśli wspomniana rzędna znajduje się poniżej rzędnej dna w węźle, wówczas wydajność pompowania jest ustawiana na równą z bieżącym napływem do węzła.

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Miejscowości objęte opracowaniem, znajdują się w północno-wschodniej części gminy Niegosławice: Zimna Brzeźnica, Wilczyce, Nowa Jabłona i Nowy Dwór, zajmując łącznie obszar ok. 20% gminy. Elementy zagospodarowania przestrzennego, jakie można wyróżnić na tym obszarze, to mieszkalnictwo jednorodzinne i usługi, w tym dwa sklepy i piekarnia. Nie występuje tu przemysł ani mieszkalnictwo wielorodzinne, jedynym rodzajem działalności jest produkcja piekarsko-ciastkarska i sklepy spożywczo-przemysłowe. Obecnie z tych terenów ścieki sanitarne odprowadzane są do indywidualnych zbiorników bezodpływowych lub przydomowych oczyszczalni. Opracowana koncepcja obejmuje podłączenie domów jednorodzinnych i sklepów, zbieranie i przekazywanie ścieków do istniejącej sieci w Przeclawiu, a następnie poprzez sieć kanalizacyjną doprowadzenie do oczyszczalni ścieków w Niegosławicach.

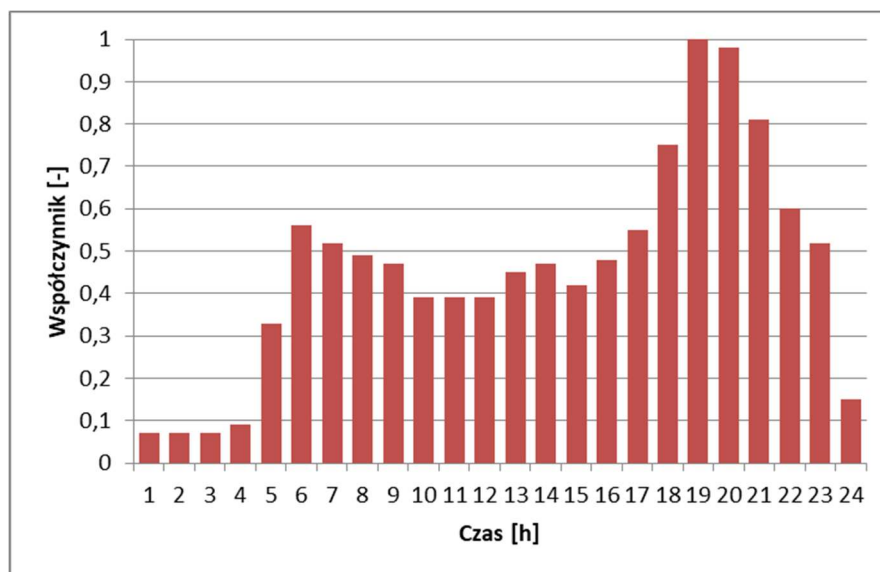
Koncepcja projektowa opracowana została w oparciu o klasyczne metody obliczeniowe oraz wytyczne doboru średnic, spadków i materiału kanałów. W efekcie konieczne okazało się wykorzystanie 10 pompowni i lokalnych punktów tłocznych z uwagi na niekorzystny układ wysokościowy północnej części gminy.

Tab. 1. Liczba mieszkańców w miejscowościach gminy

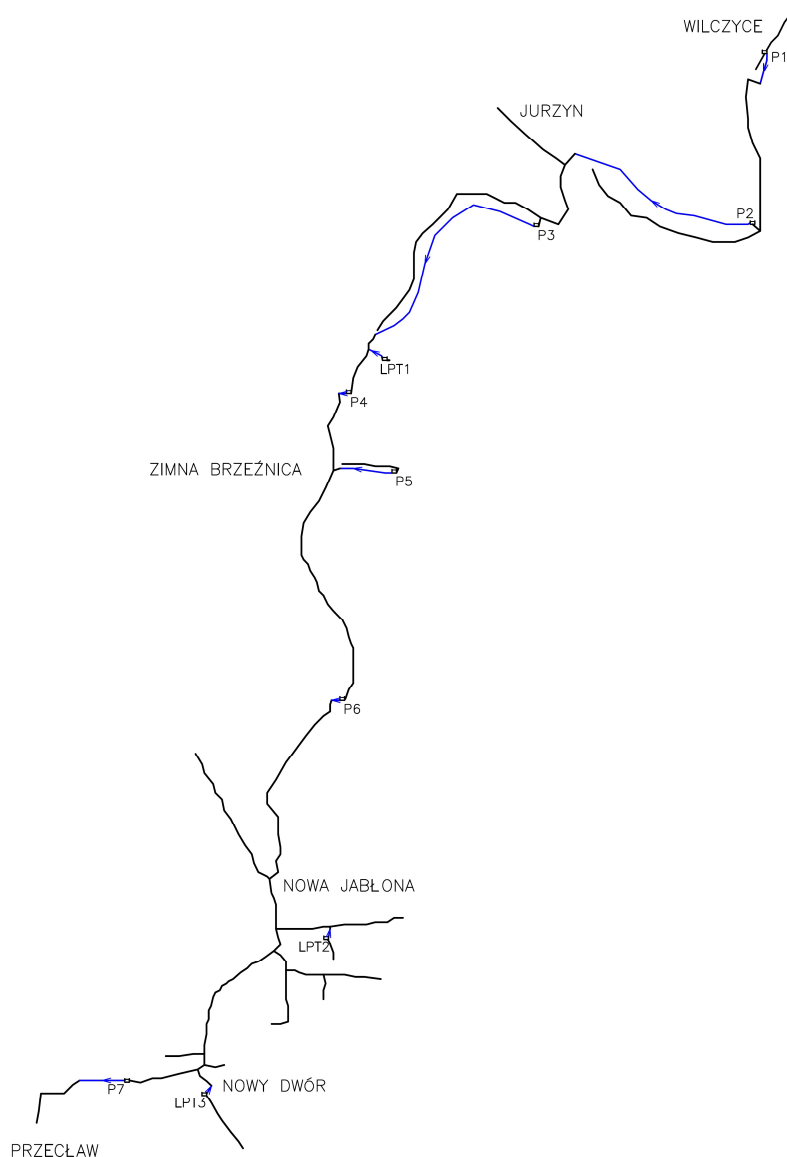
Tab. 1. The number of inhabitants in the villages of the community

| Lp. | Miejscowość | Mieszkańcy | | |
|------|-----------------|------------|---------|----------|
| | | stali | czasowi | aktualni |
| 1 | Nowa Jabłona | 289 | 6 | 295 |
| 2 | Nowy Dwór | 62 | 6 | 68 |
| 3 | Wilczyce | 40 | 0 | 40 |
| 4 | Zimna Brzeźnica | 333 | 20 | 353 |
| Suma | | | | 756 |

Ilość mieszkańców w analizowanych miejscowościach zestawiono w tabeli 1. Na podstawie ilości mieszkańców opracowano bilans zapotrzebowania na wodę i ilości odprowadzanych ścieków. Uzyskane wartości skonfrontowano ze sprzedażą wody. Godzinową zmienność ilości odprowadzanych ścieków założono na podstawie teoretycznej analizy wskaźników literaturowych dla mieszkalnictwa jednorodzinnego i usług.



Rys. 1. Przeliczniki ilości odprowadzanych ścieków
Fig. 1. Time patterns of sewage inflows



Rys. 2. Schemat obliczeniowy systemu grawitacyjno-tłocznego
Fig. 2. Computational diagram of the gravity-pressure system

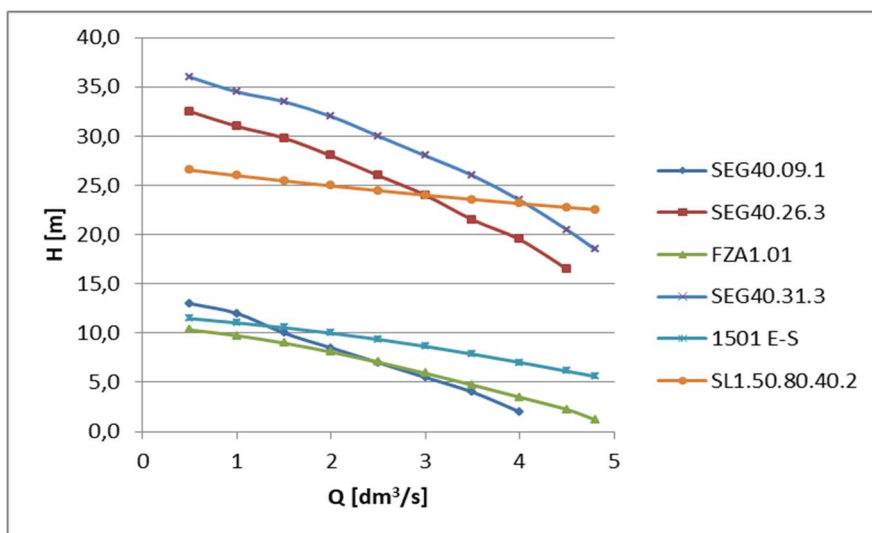
Założony histogram zmienności odpływu ścieków (rysunek 1) wprowadzono do modelu w węzłach w których występują rozbiory. Założenia projektowe zastosowanych pompowni zestawiono w tabeli 2. W oparciu o opracowaną koncepcję przygotowano model sieci kanalizacyjnej z uwzględnieniem pompowni (zbiorniki odwzorowujące komory robocze pompowni i charakterystyki pomp)

i rurociągów tłocznych (przy długich rurociągach tłocznych należy uwzględnić wysokość podtopienia węzła do wysokości uwzględniającej wysokość ciśnienia).

Tab. 2. Zestawienie parametrów wejściowych pompowni – wariant wstępny

Tab. 2. Summary of pump station input parameters - preliminary version

| Pompa | Średnica studni | Oznaczenie charakterystyki | Napełnienie wyłączenia | Napełnienie włączenia |
|------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| Pompownie sieciowe | | | | |
| P1 | 1000 | SEG40.09.1 | 300 | 500 |
| P2 | 1200 | SEG40.09.1 | 300 | 500 |
| P3 | 1500 | SEG40.26.3 | 300 | 800 |
| P4 | 1200 | FZA1.01 | 300 | 800 |
| P5 | 1000 | FZA1.01 | 300 | 500 |
| P6 | 1200 | SEG40.09.1 | 300 | 800 |
| P7 | 1500 | SEG40.31.3 | 300 | 800 |
| Lokalne punkty tłoczne | | | | |
| LPT1 | 1000 | SEG40.09.1 | 300 | 500 |
| LPT2 | 1000 | FZA1.01 | 300 | 500 |
| LPT3 | 1000 | FZA1.01 | 300 | 500 |



Rys. 3. Charakterystyki pomp zastosowanych w systemie

Fig. 3. Pump characteristics used in the system

Model uwzględnia 282 węzły obliczeniowe oraz 282 odcinki obliczeniowe (w tym 35 symulowanych jako przewody ciśnieniowe), 10 zbiorników, 10 pomp

oraz jeden wylot w miejscu włączenia do istniejącej kanalizacji. Schemat obliczeniowy przedstawiono na rysunku 2. Obliczenia realizowano przy użyciu modelu fali dynamicznej.

Tab. 3. Zestawienie parametrów wejściowych pompowni – wariant finalny

Tab. 3. Summary of pump station input parameters - final version

| Pompa | Średnica studni | Oznaczenie charakterystyki | Napełnienie wyłączenia | Napełnienie włączenia |
|------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| Pompownie sieciowe | | | | |
| P1 | 620 | 1501 E-S | 300 | 400 |
| P2 | 1000 | SEG40.09.1 | 300 | 450 |
| P3 | 1200 | SEG40.26.3 | 300 | 500 |
| P4 | 1200 | FZA1.01 | 300 | 600 |
| P5 | 1000 | FZA1.01 | 300 | 450 |
| P6 | 1200 | SEG40.09.1 | 300 | 800 |
| P7 | 1500 | SL1.50.80.40.2 | 300 | 800 |
| Lokalne punkty tłoczne | | | | |
| LPT1 | 620 | 1501 E-S | 300 | 400 |
| LPT2 | 620 | 1501 E-S | 300 | 400 |
| LPT3 | 620 | 1501 E-S | 300 | 400 |

Stopień komplikacji modelu wymagał zagęszczenia kroku analizy do 5 sekund dla uzyskania akceptowalnej dokładności obliczeń. Raportowanie wyników ustawiono na 15 sekund.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Analiza wyników symulacji przy założeniu teoretycznego rozkładu godzinowego dopływu ścieków pozwoliła na stwierdzenie, że:

- w pompowni P7 pompa ma zbyt małą wydajność - czas pojedynczego uruchomienia może przekroczyć 5 godzin;
- czas przetrzymania ścieków w komorach pompowni LPT1, LPT2 i LPT3 przekracza 8 godzin – ryzyko zagniwania ścieków.

Przeprowadzona optymalizacja miała na celu zniwelowanie wskazanych problemów. Korekta obejmowała:

- optymalizację pojemności roboczej pompowni – w przypadku lokalnych punktów tłocznych obsługujących pojedyncze posesje dobrano kompletne pompownie jednopompowe;
- modyfikacje poziomów włączenia pompy;
- zmniejszenie średnicy zbiorników pompowni;
- dobór alternatywnych pomp roboczych.

Zmodyfikowane parametry pompowni zestawiono w tabeli 3. Parametry robocze pompowni po wprowadzeniu modyfikacji zestawiono w tabeli 5.

Tab. 4. Zestawienie parametrów roboczych pompowni – wariant wstępny

Tab. 4. Summary of operating parameters of the pumping station - preliminary version

| Pompa | Ilość włą- czeń | Czas pracy | | Czas przestoju | | Czas przetrzy- mania w rurow- ciągu |
|------------------------|--------------------|------------|-----|----------------|------|---|
| | | max | min | max | min | |
| Pompownie sieciowe | | | | | | |
| P1 | 9 | 2 | 2 | 411 | 75 | 1 |
| P2 | 9 | 10 | 10 | 403 | 67 | 45 |
| P3 | 9 | 27 | 21 | 304 | 61 | 54 |
| P4 | 17 | 6 | 4 | 290 | 9 | 1 |
| P5 | 5 | 6 | 6 | 400 | 162 | 13 |
| P6 | 37 | 7 | 4 | 157 | 7 | 1 |
| P7 | 34 | 307 | 4 | 87 | 12 | 109 |
| Lokalne punkty tłoczne | | | | | | |
| LPT1 | 5 | 4 | 4 | 509 | 150 | 10 |
| LPT2 | 2 | 2 | 2 | 1165 | 1123 | 1 |
| LPT3 | 2 | 2 | 2 | 699 | 673 | 1 |

Tab. 5. Zestawienie parametrów roboczych pompowni – wariant finalny

Tab. 5. Summary of operating parameters of the pumping station - final version

| Pompa | Ilość włą- czeń | Czas pracy | | Czas przestoju | | Czas przetrzy- mania w rurow- ciągu |
|------------------------|--------------------|------------|-----|----------------|-----|---|
| | | max | min | max | min | |
| Pompownie sieciowe | | | | | | |
| P1 | 18 | 1 | 1 | 226 | 38 | 1 |
| P2 | 14 | 7 | 6 | 332 | 44 | 45 |
| P3 | 31 | 10 | 6 | 154 | 16 | 58 |
| P4 | 31 | 4 | 3 | 184 | 15 | 1 |
| P5 | 6 | 5 | 5 | 387 | 116 | 14 |
| P6 | 40 | 5 | 4 | 151 | 15 | 1 |
| P7 | 64 | 30 | 1 | 66 | 8 | 116 |
| Lokalne punkty tłoczne | | | | | | |
| LPT1 | 10 | 4 | 3 | 359 | 64 | 6 |
| LPT2 | 3 | 1 | 1 | 686 | 471 | 1 |
| LPT3 | 4 | 1 | 1 | 555 | 171 | 1 |

W przypadku czasu przetrzymania ścieków w komorze pompowni efekt nie jest całkowicie zadowalający, ale dość typowy dla terenów wiejskich. W obiekcie LPT2 czas przetrzymania ścieków jest większy od 10 godzin a LPT3 wynosi około 9,5 godziny.

Tab. 6. Weryfikacja wydajności pomp przy użyciu programu Epanet

Tab. 6. Verification of pump performance using Epanet

| Pompa | Maksymalna wydajność pompy [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] | | Błąd [%] |
|-------|--|----------|----------|
| | Epanet | Epa SWMM | |
| P1 | 2,90 | 2,87 | 1,03 |
| P2 | 0,47 | 0,50 | 6,38 |
| P3 | 0,75 | 0,74 | 1,87 |
| P4 | 2,79 | 2,49 | 10,61 |
| P5 | 0,81 | 0,73 | 9,51 |
| P6 | 2,95 | 2,73 | 7,56 |
| P7 | 2,37 | 2,32 | 1,94 |
| LPT1 | 0,75 | 0,81 | 8,00 |
| LPT2 | 4,03 | 3,61 | 10,40 |
| LPT3 | 3,44 | 2,90 | 15,70 |

Z drugiej strony, zlokalizowane blisko siebie pompownie P1, P2 i P3 połączone szeregowo z dość krótkimi odcinkami, pracujące jako grawitacyjne mogą spowodować problemy z korozją w studni rozprężnej rurociągu tłocznego P3 i studzienkach następujących po niej. Zsumowany czas przetrzymania w pompowniach i ich rurociągach tłocznych sięga prawie 14 godzin. Uzyskane wyniki skonfrontowano z obliczeniami zrealizowanymi przy użyciu programu Epanet. Modele porównawcze ograniczone zostały do odcinków od komory pompowni do studni rozprężnej. Weryfikacja wskazuje na możliwość popełnienia dość znaczącego błędu oszacowania wydajności przepompowni, co może spowodować błędne określenie czasu pracy pompy w czasie pojedynczego cyklu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Modelowanie hydrodynamiczne sieci kanalizacyjnych rzeczywistych systemów odprowadzania ścieków często musi obejmować pompownie i rurociągi tłoczne. Bardzo ważne jest, aby hydrodynamiczny model numeryczny odzwierciedlał w prawidłowy sposób schematy połączenia części grawitacyjnej i ciśnieniowej. W ramach opracowania przedstawiono przykład rozwiązania problemu.

Opracowany model numeryczny pozwolił na weryfikację projektu zrealizowanego w sposób tradycyjny oraz optymalizację dobranych pomp, średnic rurociągów tłocznych oraz ustawienie poziomów włączenia i wyłączenia pompy roboczej. Weryfikacja uzyskanych wyników wskazuje na dość duże prawdopodobieństwo wystąpienia błędu oszacowania czasu pracy pompy, co przekłada się na czas przetrzymania ścieków w pompowni. Zastosowanie opisanego sposobu realizacji symulacji układu grawitacyjno-tłocznego wymaga weryfikacji w oparciu o program Epanet. W efekcie, wyniki dotyczące niektórych obiektów muszą być odrzucone jako mało wiarygodne.

LITERATURA

1. BOGDAN, L.; PETRICZEK, G.; STUDZIŃSKI, J.; 2014. Computer Dynamic Modelling of Communal Sewage Networks. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, Vol. 8, No. 4, 51-58.
2. DĄBROWSKI W.; 2013. Projektowanie pompowni ścieków – wybrane zagadnienia. *Rynek Instalacyjny*, 11/2013, 63-67.
3. JIN M.; WALSKI T.; 2008. Dynamic modeling technique of interaction between pressure and gravity sewer systems. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
4. ORŁOWSKI R.; 1986. Komputerowa symulacja pracy pompowni kanalizacyjnej. *Ochrona środowiska*, 488/1-2, 65-66.
5. ROSSMANN L.A.; 2017. Storm Water Management Model. Reference Manual. Volume II – Hydraulics. US Environmental Protection Agency, Washington DC, 40-62.
6. TIAN J.; CHENG J.; GONG Y.; 2017. Optimization of municipal pressure pumping station layout and sewage pipe network design. *Engineering Optimization*, Vol. 50, 1-11.

MODELING OF PUMP OPERATION CONDITIONS IN GRAVITY-PRESSURE COMBINED SYSTEMS

S u m m a r y

The paper presents the problem of working conditions in gravitational-pressure systems simulation. The practical example takes into account the dynamical analysis of a system equipped with 10 pump stations with different functions. Both local press stations, local stations for shallowing network and transit pumping stations between the towns were used. The model allowed to optimize the active volume of the pump station tanks, the selection of pumps, including the frequency of power on and the time of holding the sewage.

Key words: modeling, sewage pumping stations, simulation.