

92/2009

Raport Badawczy
Research Report

RB/46/2009

**Algorytmy modelowania
miejskiej sieci kanalizacyjnej**

L. Bogdan, G. Petriczek

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:
doc. dr hab. inż. Jan Studziński

Warszawa 2009

**ALGORYTMY MODELOWANIA MIEJSKIEJ SIECI
KANALIZACYJNEJ**

LUCYNA BOGDAN, GRAŻYNA PETRICZEK

Warszawa, 2009

1. WSTĘP

W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z modelowaniem sieci kanalizacyjnej. Przedstawiono algorytm modelowania zarówno odcinków sieci jak i całej sieci. Zadaniem algorytmu jest (dla zadanej sieci oraz ustalonych natężeń dopływów ścieków): określenie wysokości napełnień ściekami, ustalenie prędkości przepływu. Wyprowadzono równania opisujące napełnienie kanału, promienie hydrauliczne oraz zmiany prędkości przepływów.

Rozpatrywany algorytm obliczeń hydraulicznych dotyczy sytuacji sieci sanitarnej lub ogólnospławnej, rozgałęzionej, podzielonej węzłami na segmenty. Węzłami są punkty, w których następuje: połączenie kilku segmentów lub gałęzi sieci, zmiana parametrów sieci lub dopływów ścieków do sieci (studzienka, wpusty deszczowe, studzienka połączeniowa). W węzłach połączeniowych spełnione są równania bilansu przepływów oraz warunek zgodności poziomów zwierciadła ścieków.

Przyjęto, że segmenty charakteryzują się stałymi parametrami hydraulicznymi takimi jak: kształt, wymiar kanału, spadek dna oraz szorstkość. Dopływ ścieków odbywa się punktowo w węzłach sieci. Ze względu na przyjęte założenia wszystkie zależności dotyczą stanu ustalonego.

Przyjęto też, że w większości segmentów sieć jest grawitacyjna, z wyjątkiem przypadków istnienia pompowni z przewodami tłocznymi (odcinki kanałów działające po ciśnieniu).

2. CHARAKTERYSTYKA SIECI KANALIZACYJNYCH

Ze względu na projektowanie i eksploatację można wyróżnić następujące podstawowe rodzaje ścieków:

ścieki bytowo - gospodarcze - powstające w wyniku korzystania przez ludność z wody na codzienne potrzeby,

ścieki przemysłowe, powstające w wyniku działalności produkcyjnej w zakładach przemysłowych, wydobywczych, przetwórczych, itp.

ścieki opadowe, czyli wody deszczowe lub wody z topniejącego śniegu, spływające z powierzchni nieprzepuszczalnych, np. ulic, chodników, placów, dachów, itp.,

wody drenażowe, odprowadzane do kanalizacji deszczowej z ciągów drenarskich układanych wokół budynków w celu obniżenia poziomu wód gruntowych i zabezpieczenia przed wpływem nadmiernej wilgotności gruntu,

wody przypadkowe i wody gruntowe infiltrujące do sieci.

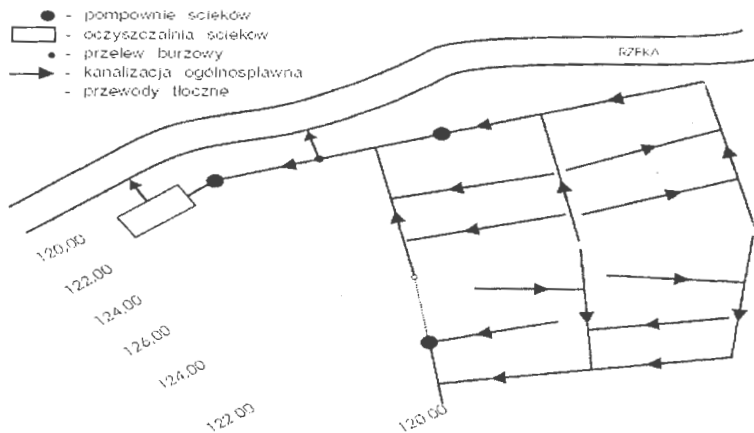
W zależności od sposobu odprowadzania ścieków można wyróżnić następujące systemy kanalizacji:

- a) system ogólnospławny,
- b) system rozdzielczy,
- c) system półrozdzielczy.

W systemie kanalizacji ogólnospławnej (Rys.1) wszystkie rodzaje ścieków (ścieki bytowo- gospodarcze, przemysłowe oraz ścieki opadowe) są odprowadzane wspólnymi kanałami.

Dodatkowo na sieci budowane są przelewy burzowe, czyli tzw. burzowce, którymi odprowadzany jest nadmiar wód deszczowych zmieszanych ze ściekami bytowo - gospodarczymi bezpośrednio do odbiornika. Przelewy burzowe projektowane są w taki sposób, aby zapewnić odpowiednie rozcieńczenie ścieków bytowo - gospodarczych przed zrzućeniem ich do odbiornika. Ze względu na znaczne zanieczyszczenie środowiska i wzrost

wymagań dotyczących ochrony wód przed zanieczyszczeniami, w chwili obecnej system kanalizacji ogólnospławnej nie jest projektowany. Można go spotkać jedynie w większych miastach, gdzie kanalizacja była wykonana stosunkowo wcześniej.



Rysunek 1. Schemat systemu kanalizacji ogólnospławnej

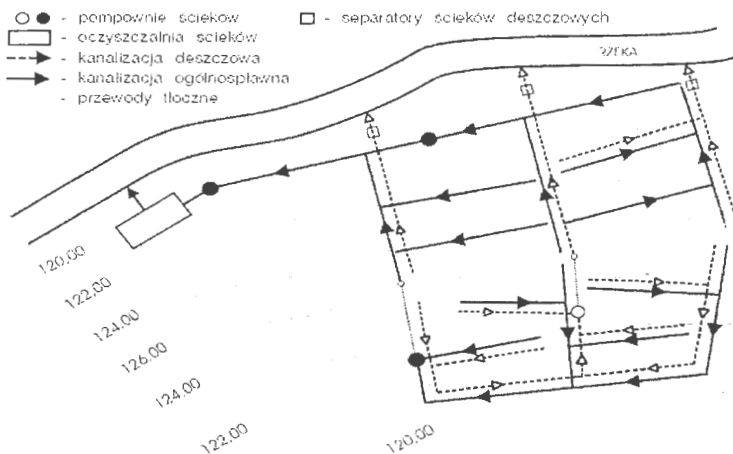
Obecnie powszechnie stosowany jest system kanalizacji rozdzielczej (Rysunek 2), w którym występują dwie odrębne sieci kanalizacyjne:

- a) sieć ściekowa, przeznaczona do odprowadzania ścieków bytowo – gospodarczych i przemysłowych (nazywana także siecią sanitarną),
- b) sieć deszczowa, przeznaczona do odprowadzania ścieków opadowych.

W kanalizacji ściekowej kanały wymiaruje się na maksymalny sekundowy odpływ ścieków bytowo – gospodarczych i przemysłowych, czyli teoretycznie na napełnienie kanałów $h/D=0,50$ (50%). Drugie 50% przekroju kanału stanowi rezerwa przepustowości, która ma pomieścić wody infiltracyjne i przypadkowe oraz umożliwić przewietrzanie kanałów.

Przekroje kanalizacji deszczowej wymiaruje się na przepływ deszczu miarodajnego. Przy projektowaniu tej sieci, ze względów ekonomicznych nie mogą być brane pod uwagę rzadko pojawiające się deszcze nawalne. Kanały deszczowe projektuje się na 100% napełnienie.

W kanalizacji rozdzielczej stosowane są najczęściej kanały o przekrojach kołowych. Jedynie końcowe, wylotowe kolektory do oczyszczalni mogą mieć inny przekrój. Obowiązujący wymóg podczyszczania ścieków deszczowych, powoduje konieczność budowy na końcach sieci deszczowej, separatorów usuwających nadmiar zanieczyszczeń przed odprowadzeniem ich do odbiornika.



Rysunek 2. Schemat systemu kanalizacji rozdzielczej

Kanalizacja półrozdzielcza (Rysunek 3) jest również systemem kanalizacyjnym, w którym występują dwie sieci: sanitarna i opadowa.

W układzie tym sieć ściekowa jest dodatkowo przystosowana do przejścia części spływów deszczowych o określonym natężeniu.

Pierwszy spływ najbardziej zanieczyszczonych ścieków deszczowych kierowany jest do kanalizacji ściekowej i odprowadzany do oczyszczalni ścieków. Zadanie to realizowane jest przy użyciu dwóch rodzajów urządzeń, które pomimo zbieżności nazwy z separatorami występującymi w kanalizacji rozdzielczej, mają inną budowę i zasadę działania. Należą do nich: separator kaskadowy, separator z progiem spiętrzającym.

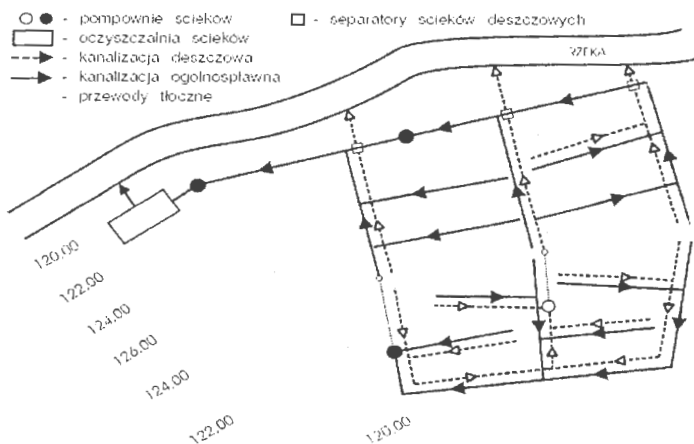
Urządzenia te powinny być usytuowane w pobliżu odbiornika ścieków deszczowych, tak by przez separator przepływały ścieki deszczowe z jak największego odwadnianego obszaru.

Prowadzenie kanałów musi jednak uwzględniać wzajemne ich usytuowanie i wymagane różnice wysokości. W przypadku separatora kaskadowego we wstępnej fazie deszczu, ścieki o małym natężeniu przepływu i największym zanieczyszczeniu, trafiają do kanału sanitarnego. Następnie po zwiększeniu się przepływu, przelewają się nad progiem do kanału deszczowego. System zbierania ścieków składa się z wielu elementów, które powinny być ze sobą połączone w sposób zapewniający grawitacyjny przepływ ścieków.

Kanalizacja sanitarna składa się z następujących elementów:

instalacje kanalizacyjne wewnętrzne w budynkach, przewody kanalizacyjne zewnętrzne na terenie nieruchomości (działki budowlanej), sieć kanalizacyjna, układana najczęściej w ciągach komunikacyjnych pod jezdnią, pompownie ścieków bytowo – gospodarczych i przemysłowych, oczyszczalnia ścieków, jako końcowy element usuwania ścieków.

W kanalizacji deszczowej można wyróżnić następujące elementy: wpusty deszczowe dachowe, podwórzowe i uliczne, instalacje kanalizacyjne w budynkach, odprowadzające wody deszczowe z dachów i szczelnych terenów przyległych do budynków, sieć kanalizacyjna, układana w ciągach komunikacyjnych pod jezdnią, jednak przy założeniu najkrótszej drogi do odbiornika ścieków, pompownie ścieków deszczowych, separatory ścieków deszczowych.



Rysunek 3. Schemat systemu kanalizacji półrozdzielczej

3. ALGORYTM OBLICZANIA SIECI KANALIZACYJNEJ

Przedstawiony w pracy algorytm obliczania sieci kanalizacyjnej przeprowadzony jest na podstawie następujących podstawowych danych:

- typ sieci – ogólnospławna, sanitarna
- struktura sieci kanalizacyjnej – liczba odcinków, typy kanałów: grawitacyjne i ciśnieniowe,
- liczba i rodzaj węzłów,
- maksymalny sekundowy przepływ ścieków na danym odcinku sieci,
- spadek dna kanału.
- wymiary kanału

Zadaniem algorytmu jest (dla zadanej sieci oraz ustalonych natężeń dopływów ścieków):

- określenie napełnień ściekami,
- ustalenie prędkości przepływu.

Zmienne warunki przepływu i różnorodność zjawisk występujących podczas przepływu ścieków, wymuszają konieczność przyjęcia pewnych założeń upraszczających. Należą do nich:

- niezmienny przepływ na odcinku obliczeniowym,
- stały spadek na wybranym odcinku sieci,
- stała chropowatość,
- niezmienna średnica.

Przedstawiony poniżej algorytm obliczeń hydraulicznych dotyczy sytuacji sieci sanitarnej lub ogólnospławnej przedstawionej na Rys.1, rozgałęzionej, podzielonej węzłami na segmenty. Węzłami są punkty, w których następuje połączenie kilku segmentów lub gałęzi sieci, zmiana parametrów sieci lub dopływ ścieków do sieci (studzienka, wpusty deszczowe, studzienka połączeniowa). W węzłach połączeniowych spełnione są równania bilansu przepływów oraz warunek zgodności poziomów zwierciadła ścieków.

Przyjęto, że segmenty charakteryzują się stałymi parametrami hydraulicznymi takimi jak: kształt, wymiar kanału, spadek dna oraz szorstkość. Dopływ ścieków odbywa się punktowo w węzłach sieci. Ze względu na przyjęte założenia wszystkie zależności dotyczą stanu ustalonego.

Przyjęto, że w większości segmentów sieć jest grawitacyjna, z wyjątkiem przypadków istnienia pompowni z przewodami tłocznymi (odcinki kanałów działające po ciśnieniu).

Przy znanych wymiarach kanałów tzn. spadkach dna kanału i średnicach obliczenia hydrauliczne sieci kanalizacyjnej dotyczą prędkości przepływów v_i w poszczególnych segmentach oraz wysokości napełnień tych segmentów H_i .

Poniżej przedstawimy podstawowe składowe algorytmu symulacyjnego obliczeń dla kanałów o przekroju kołowym.

Krok 1. Należy wczytać dane dotyczące struktury sieci tzn.: liczbę węzłów NW, liczbę odcinków NO, zbiór węzłów $W = \{j\}$ zbiór odcinków $U = \{i\}$, zbiór średnic kanałów $\{d_i\}$, długości odcinków L_i , spadki dna dla poszczególnych odcinków L_i $i=1, \dots, NO$, chropowatość k_i i-tego odcinka, oraz wartości początkowe: natężenia przepływów Q_i w poszczególnych segmentach $i=1, \dots, NO$, kinematyczny współczynnik lepkości ścieków n , przyspieszenie ziemskie g , maksymalne i minimalne średnie prędkości.

Krok 2. Obliczyć natężenia dopływów ścieków do poszczególnych węzłów sieci.

Do danego odcinka sieci dopływają zarówno ścieki bytowo – gospodarcze i przemysłowe jak i deszczowe. W zależności od rodzaju ścieków natężenie dopływających ścieków wyraża się różnymi zależnościami.

Dla ścieków bytowo – gospodarczych i przemysłowych rozważa się maksymalny godzinowy dopływ ścieków Q do danego odcinka i może być wyrażony następującą zależnością:

$$Q_{h \max} = \frac{N_{h \max} \cdot M \cdot q_{sr}}{24} \quad (1)$$

gdzie: M – liczba mieszkańców przypadająca na dany odcinek sieci
 q_{sr} – średni jednostkowy odpływ ścieków zależny od wielkości jednostki osadniczej
 $N_{h \max}$ – współczynnik nierównomierności dobowej

Dla ścieków opadowych dopływ może być wyrażony:

$$Q = q_d \cdot \Psi \cdot F \cdot \varphi \quad (2)$$

gdzie

Q - spływ ścieków deszczowych ze skanalizowanego terenu, [dm^3/s],

F - powierzchnia zlewni, powierzchnia terenu skanalizowanego tzn. powierzchnia z której ścieki spływają do określonego odcinka kanału, [ha],

Ψ - współczynnik spływu powierzchniowego, wyrażający stosunek ilości ścieków deszczowych, które spłynęły do kanalizacji, do ilości ścieków deszczowych, które spadły na dany teren,

φ - współczynnik opóźnienia

q_d - natężenie deszczu

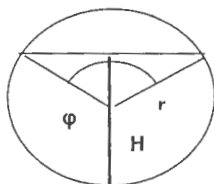
Krok 3. Dla ustalonych wartości natężeń przepływów Q_i w poszczególnych segmentach $i=1, \dots, NO$ wyznaczyć dla tych segmentów następujące wartości: napełnień H_i , promieni hydraulicznych R_h , średnich prędkości przepływów v_i .

Podane w tym kroku obliczenia dotyczą odcinków kanalizacji grawitacyjnej.

1. Jak wynika ze wzorów Manninga zarówno prędkość przepływu v jak i natężenie przepływów Q zależą od promienia hydraulicznego R_h , który z kolei zależy od wysokości napełnienia H .

Przy obliczaniu spływów w sieciach kanalizacyjnych zazwyczaj mamy do czynienia z sytuacją, w której dla zadanych przepływów Q należy wyznaczyć wysokość napełnienia kanału H .

Przyjmując oznaczenia jak na Rys.4



Rys.4 Zależności między wielkościami w kanale o przekroju kołowym

gdzie: H – wysokość napełnienia

r – promień kanału kołowego

d – średnica kanału

φ – kąt środkowy

otrzymujemy następujące zależności:

$$\varphi = 2 \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) \quad (3)$$

Ze wzoru Manninga na wielkość natężenia przepływu, uwzględniając geometrię przewodu otrzymuje się następującą zależność:

$$\begin{aligned} & J^{\frac{3}{2}} \cdot d^8 \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot 2 \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) + \frac{1}{2} \sin \left(2 \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) \right) \right)^5 \cdot \\ & \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot 2 \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) \right)^{-2} - 4^5 \cdot Q^3 \cdot n^3 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Rozwiązując to równanie można otrzymać wysokość napełnienia H jako funkcję natężenia przepływu Q . Otrzymujemy równanie w postaci $f(H)=0$.

Ze względu na postać zależności (4) do obliczania napełnienia kanału stosuje się iteracyjną metodę Newtona.

Przyjmując wartość początkową napełnienia $np.H_0 = 0,7d$ otrzymujemy następujący schemat iteracyjny do obliczenia wysokości napełnienia H : (dla k -tej iteracji)

$$H_{k+1} = H_k - \frac{f(H_k)}{f'(H_k)} \quad (5a)$$

gdzie: poszczególne czynniki mają postać:

$$\varphi_k = 2 \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{H_k d - H_k^2}}{H_k - \frac{d}{2}} \right) \quad (5b)$$

$$f(H_k) = J^{\frac{3}{2}} \cdot d^8 \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot \varphi_k + \frac{1}{2} \sin(\varphi_k) \right)^5 \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot \varphi_k \right)^{-2} - 4^5 \cdot Q^3 \cdot n^3 \quad (5c)$$

$$f'(H_k) = J^{\frac{3}{2}} \cdot d^2 \cdot \frac{d^2}{\left(3H_k^2 - 3H_k d + d^2 \right) \sqrt{H_k d - H_k^2}} \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot \varphi_k + \frac{1}{2} \sin(\varphi_k) \right)^4 \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot \varphi_k \right)^{-2} \cdot$$

$$\bullet \left(5d^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180} - \cos(\varphi_k) \right) - \frac{2\pi}{180} \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot \varphi_k \right)^{-1} \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{360} \cdot \varphi_k + \frac{1}{2} \sin(\varphi_k) \right) \right)$$

Warunkiem zbieżności tej metody jest spełnienie zależności:

$$\left| \frac{f(H_k) \cdot f''(H_k)}{(f'(H_k))^2} \right| \leq K < 1 \quad (5d)$$

Kryterium stopu dla iteracji ma postać:

$$|H_{k+1} - H_k| \leq \alpha \quad \alpha < 1 - \text{przyjęty parametr zbieżności} \quad (5e)$$

Iteracje obliczania wysokości napełnienia H wykonywane są dopóty dopóki nie zostanie spełnione kryterium zbieżności (5e).

2. Dla obliczonego napełnienia H obliczamy promień hydrauliczny R_h według wzoru:

$$R_h = \frac{A}{U} = \frac{\pi d - \frac{\pi d}{180} \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) + \frac{d}{2} \cdot \sin \left(2 \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) \right)}{4 \cdot \left(\pi - \frac{\pi}{180} \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) \right)} \quad (6)$$

gdzie: A – pole powierzchni przekroju czynnego
U – obwód zwilżony

3. Obliczanie prędkości v według wzoru:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

gdzie:

n – współczynnik Manninga
J – spadek dna kanału

Ze względu na brak wartości współczynnika Manninga dla kanałów wykonanych z różnego rodzaju tworzyw sztucznych należy przeliczać wartość tego współczynnika w zależności od współczynnika chropowatości bezwzględnej k zgodnie z zależnością:

$$K = 4\sqrt{g} \cdot \left(\frac{32}{d}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot \log\left(\frac{3,7 \cdot d}{k}\right) \quad (8)$$

Obliczenia są realizowane kolejno dla każdego odcinka sieci, zaczynając od położonego najdalej od wylotu sieci, a kończąc na obliczaniu odcinka najbliższego oczyszczalni ścieków

Krok 4. W każdym węźle sieci oblicza się równania bilansu przepływów $\sum_{j \neq i} Q_j = 0$ oraz warunek zgodności poziomów zwierciadła ścieków.

Krok 5. Dla kanałów tłocznych przy zadanym przepływie Q oblicza się straty ciśnienia z zależności:

$$h_s = \frac{\lambda}{\pi^2 d_i^5 \cdot g} \cdot 8L_i \cdot Q_i^2 + \frac{8}{\pi^2 d_i^4 \cdot g} \cdot \xi_i \cdot Q_i^2 \quad (9)$$

gdzie:

λ_i - współczynnik strat liniowych dla i-tego odcinka obliczany przy pomocy wzoru Colebrooka-White'a lub Waldena

L_i - długość rozpatrywanego odcinka

ξ_i - współczynnik strat lokalnych w przewodzie

Z uwagi na uwikłaną zależność współczynnika λ we wzorze Colebrooka-White'a do obliczenia przybliżonej wartości współczynnika λ stosuje się wzór Waldena postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{6,1}{Re^{0,915}} + 0,268 \cdot \varepsilon\right) \quad (10)$$

gdzie :

ε - chropowatość względna $\varepsilon = \frac{k}{d}$

$$\text{Re} - \text{liczba Reynoldsa } \text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

ν - kinetyczny współczynnik lepkości

Krok 6. Zmieniając dopływy ścieków do kanałów ponownie przelicza się całą sieć. Przy założeniu, że przepływy wzdłuż segmentów sieci są stałe można przeprowadzać symulację sieci dla zadanych odcinków czasu np. godzinowym lub dobowym i w ten sposób uwzględnić zmiany w czasie natężeń dopływów ścieków

Należy zauważyć, że w przedstawionym algorytmie analizowane zmienne tzn. wysokość napełnienia, promień hydrauliczny i prędkość przepływu zależą od natężeń dopływów ścieków. Przy ściekach pochodzących z opadów istotne jest uwzględnienie zmian natężenia dopływów i powtarzanie obliczeń zgodnie z częstotliwością tych zmian.

Przedstawiony algorytm może stanowić część całkowitego modelu obliczania sieci kanalizacyjnych.

W przyszłości należałoby uwzględnić także sieć kanalizacji typu półrozdzielczego i rozdzielczego uwzględniających sieć deszczową oraz takie elementy sieci jak separatory, pompy oraz zbiorniki retencyjne.

4. MODELOWANIE ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH

Wprowadzenie wód deszczowych do kanalizacji obciąża kanały bardzo dużymi przepływami, które występują stosunkowo rzadko i trwają krótko. Wymiarowanie kanałów i urządzeń na te ekstremalne przepływy powoduje konieczność ponoszenia wysokich nakładów inwestycyjnych. Gospodarkę ściekami deszczowymi można jednak znacznie usprawnić przez zastosowanie różnego typu zbiorników do ich retencjonowania.

Zbiorniki retencyjne budowane są w celu zatrzymania i zgromadzenia części ścieków w okresie opadów i stopniowego odprowadzania retencjonowanych ścieków do sieci, oczyszczalni bądź odbiornika. Zbiorniki mogą pełnić dodatkowo rolę osadników do oczyszczania ścieków deszczowych. Zbiorniki deszczowe mogą być stosowane do następujących celów: odciążenie istniejącej sieci kanalizacyjnej, przyłączenie nowych zlewni do istniejącej sieci, ochrona wód odbiornika, odciążenie oczyszczalni ścieków przed pompownią wód deszczowych.

Podział zbiorników retencyjnych:

zbiorniki odciążające – hydrauliczne odciążenie sieci kanalizacyjnej bądź odbiornika.

Zbiorniki nie zmniejszają ładunku zanieczyszczeń w ściekach.

zbiorniki akumulacyjne – służą do zgromadzenia pierwszej fali zanieczyszczonych ścieków deszczowych. Zgromadzone ścieki odprowadzane są ze zbiornika do oczyszczalni. Nie oczyszczają ścieków, lecz jedynie odciążają odbiornik.

zbiorniki oczyszczające – pełnią rolę zbiorników retencyjnych do regulacji odpływu ścieków do oczyszczalni oraz jednocześnie osadników.

zbiorniki zespolone – składają się z dwóch części – jedna pełni rolę zbiornika akumulującego, druga oczyszczającego.

4.1. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE INFILTRACJĘ WODY OPADOWEJ

Ilość wód opadowych wsiąkających w glebę i grunty podścielające zależy ściśle od właściwości wodno-fizycznych gruntów warstw przypowierzchniowych. Część wód infiltrujących zostaje zretencjonowana przez ośrodek skalny, przez który przenika, część

natomiast dostaje się do wód podziemnych, wzbogacając ich zasoby. Tę część wód, która osiąga poziom zwierciadło wód podziemnych nazywamy infiltracją efektywną. Przenikanie wody w głąb zachodzi dopóty, dopóki nie natrafi na warstwę nieprzepuszczalną.

Ilość wody infiltrującej przez profil glebowy uwarunkowana jest szeregiem czynników, takich jak: ilość wody dostarczanej na powierzchnię gruntu, stan nawilgotnienia, zdolność infiltracyjna wierzchniej warstwy gruntu, ogólna przepuszczalność głębszych poziomów glebowych, ilość wody, jaką warstwy gruntu mogą zatrzymać w warunkach pojemności polowej, sposób użytkowania ziemi, typ pokrywy roślinnej, spadek powierzchni terenu i zamrażane grunty.

Na zmienność w czasie wskaźnika infiltracji danego punktu pomiarowego wpływają przede wszystkim takie czynniki, jak zmiany uwilgotnienia gruntów.

Jeśli gleba jest sucha, wsiąkająca w grunt woda jest zużywana na zwilżanie gleby, pęcznienie koloidów, czyli na uzupełnienie wilgoci glebowej do stanu wilgotności odpowiadającej połowej pojemności wodnej. Po osiągnięciu tego stanu rozpoczyna się proces infiltracji, czyli proces przesiąkania wody wolnej pionowo w dół do strefy saturacji. Infiltracja w górnej części swej drogi jest hamowana przez parowanie, a głównie przez transpirację, która sięga do głębokości najdłuższych korzeni.

Infiltracja zachodzi przede wszystkim w czasie deszczu i roztopów. Ilość wody infiltrującej zależy głównie od przepuszczalności utworów powierzchniowych i intensywności opadów. Przepuszczalność utworów powierzchniowych to zdolność przewodzenia wody wolnej (bardzo dobrą przepuszczalność mają żwiry i piaski gruboziarniste). Opady ciekłe zaś infiltrują, gdy przepuszczalność gruntu jest większa od intensywności deszczu, w przeciwnym wypadku opad formuje spływ powierzchniowy.

Na wielkość infiltracji wpływają także inne czynniki klimatyczne, m.in. temperatura i wilgotność powietrza. Wysoka temperatura i niska wilgotność przyspieszają parowanie, przez co ograniczają infiltrację.

Ilościowo opisuje się proces infiltracji posługując się pojęciem współczynnika zdolności przesiąkania, definiowanego jako maksymalny współczynnik, przy którym przesiąkanie jest możliwe – innymi słowy określającego zdolność wody do przesiąkania. Do opisu zdolności przesiąkania stosuje się równanie Richrdsa, które dla przepływu pionowego ma postać

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_s K_r \frac{\partial(z + p/\gamma)}{\partial z} \right] = \Phi \frac{\partial S}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (11)$$

gdzie

z – współrzędna pionowa

K_s –przewodność hydrauliczna nasycenia gleby (lub przepuszczalność)

K_r – przepuszczalność względna

p – ciśnienie wody w glebie

γ - ciężar właściwy wody

Φ - porowatość gleby

S – stopień nasycenia (od 0 – zupełnie suchy, do 1 – nasycony)

Powyższe równanie jest nieliniowe i wymaga zastosowania skomplikowanych metod rozwiązania. Równanie pokazuje, że zdolność przesiąkania zależy od właściwości gleby oraz od wilgotności gleby. W praktyce poleca się stosowanie prostszych modeli, a mianowicie modelu Greena i Ampla oraz modelu Hortona.

4.2 INTERCEPCJA

Proces zatrzymywania wody opadowej przez szatę roślinną lub inne obiekty takie jak dachy budynków czy drogi nazywamy intercepcją. Im więcej roślinności i im więcej pieter roślinności, tym więcej wody jest zatrzymywane. Zjawisko intercepcji zmniejsza dopływ wody do ziemi i zwiększa czas tego dopływu.

Za pomocą metod empirycznych opracowano zależności estymujące straty intercepcji. Horton (1919) podał następującą zależność:

$$L_i = a + bP_T^n \quad (12a)$$

gdzie

L_i – intercepcja w calach

P_T – całkowita głębokość opadu w calach

A, b, n - stałe empiryczne.

Zależność ta została poprawiona przez Arona (1992) i opublikowana jako

$$L_i = cP_T^m \quad (12b)$$

gdzie c i m SA parametrami dopasowującymi.

4.3 OBLICZANIE NATĘŻEŃ DOPŁYWÓW WÓD DESZCZOWYCH

Dopływy wód deszczowych do kanałów mogą być zadawane bezpośrednio wg określonych na podstawie badań terenowych funkcji $I(t)$ i $q(t)$ lub pośrednio poprzez funkcje opisujące deszcz i zlewnię.

Przepływ ścieków opadowych można obliczać według następującego wzoru:

$$Q_d = q_d \cdot \Psi \cdot F \cdot \varphi \quad (13)$$

w którym:

Q_d - spływ ścieków deszczowych ze skanalizowanego terenu, [dm^3/s],

F - powierzchnia zlewni, powierzchnia terenu skanalizowanego tzn. powierzchnia z której ścieki spływają do określonego odcinka kanału, [ha],

Ψ - współczynnik spływu powierzchniowego, wyrażający stosunek ilości ścieków deszczowych, które spłynęły do kanalizacji, do ilości ścieków deszczowych, które spadły na dany teren,

φ - współczynnik opóźnienia

q_d - natężenie deszczu w [$\text{dm}^3/\text{s ha}$], wyrażającą objętość deszczu w dm^3 , która spadła na powierzchnię 1 ha w czasie 1 s

Dysponując planem sieci kanalizacji deszczowej należy ustalić powierzchni zlewni z uwzględnieniem ukształtowania terenu, aby zostały zachowane naturalne kierunki spływu ścieków opadowych do kanałów. Następnie dla poszczególnych terenów należy dobrać wartość współczynnika spływu Ψ . Wartości współczynnika spływu należy przyjmować zależnie od gęstości zabudowy lub szczelności pokrycia powierzchni zlewni. Przedziały wartości dla poszczególnych rodzajów terenu podano w tabeli 2.

Rodzaj terenu	Współczynnik spływu Ψ
Dachy kryte papą lub blachą	0,90 ÷ 0,95
Teren utwardzony	0,90
Kostka	0,80 ÷ 0,85
Asfalt	0,80 ÷ 0,90
Kamień	0,75 ÷ 0,85
żwir, drogi żwirowe	0,15 ÷ 0,30
Zabudowa miejska gęsta	0,70 ÷ 0,80
Zabudowa zwarta	0,50 ÷ 0,70
Zabudowa luźna	0,30 ÷ 0,50
Zabudowa jednorodzinna, willowa	0,25 ÷ 0,30
Teren niezabudowany	0,1 ÷ 0,25
Parki, łąki, tereny rekreacyjne	0,00 ÷ 0,15
Tereny zielone	0,00 ÷ 0,1

Natężenie deszczu miarodajnego obliczane jest na podstawie parametrów, określanych na podstawie wieloletnich obserwacji meteorologicznych.

Parametrami charakteryzującymi deszczę, są:

czas trwania, t [min], wysokość opadu, H [mm], natężeniem, $I = H/t$, [mm/min], zasięg, F [ha], prawdopodobieństwem pojawiania się $P(\%)$ lub częstotliwością występowania $C = 100/P$, w latach.

Istnieje szereg zależności określających związek pomiędzy natężeniem, czasem trwania i prawdopodobieństwem występowania deszczu.

Wśród najczęściej stosowanych w projektowaniu kanałów jest metoda granicznych natężeń stosująca wzór Błaszczyka na natężenie spływu jednostkowego deszczu miarodajnego w postaci

$$q_d = \frac{6,63 \sqrt[3]{H^2 c}}{t_d^{0,67}} \quad (14a)$$

w którym H - średni opad roczny, [mm].

Przy $H = 600$ [mm] (dla całej Polski z wyjątkiem okolic podgórszych) wzór ten jest następujący:

$$q_d = \frac{470 \sqrt[3]{c}}{t_d^{0,6667}} \quad [\text{dm}^3/\text{h}] \quad (14b)$$

gdzie:

q_d - natężenie deszczu (dm^3/h)

c - częstotliwość występo

deszczu (lata)

t_d - czas trwania deszczu (min)

p - częstotliwość pojawienia się deszczu (%), $p=100/c$

Czas trwania deszczu miarodajnego t_d można obliczyć z następującego wzoru:

$$t_d = 1,2 \cdot \sum t_p + t_k = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{v_i} + t_k \quad (15a)$$

W zmodyfikowanej metodzie granicznych natężeń do wzoru () dodaje się człon uwzględniający dodatkowo retencję sieci i terenu zlewni powyżej obliczanego przekroju

$$t_w = \frac{\alpha}{60} \sum_{i=1}^N \frac{A_i L_i + V_i F_i}{Q_{di}} \quad (15b)$$

t_p - czas przepływu przez poszczególne odcinki kanału od górnego końca sieci do punktu dla którego wykonywane są obliczenia, [min],

L_i - długość i-tego odcinka kanału

v_i - średnia prędkość przepływu w i-tym odcinku

t_k - czas koncentracji terenowej

A_i - pole powierzchni przekroju poprzecznego kanału

F_i - pole powierzchni zlewni bezpośredniej i-tego odcinka łącznie z kanałami bocznymi dochodzącymi do tego odcinka

V_i - wskaźnik objętości kanałów bocznych i retencji terenowej na i-tym odcinku

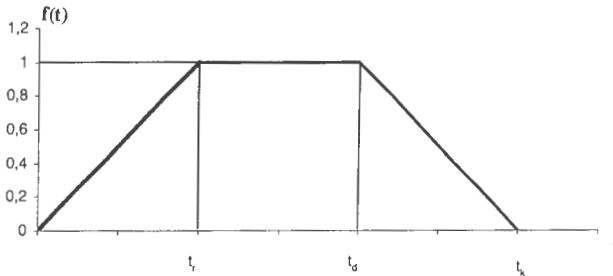
Całkowite natężenie przepływu oblicza się jako sumę natężeń przepływu ścieków bytowo-gospodarczych, przemysłowych i ścieków deszczowych. Do tego natężenia dodawany jest ewentualny odpływ z przelewów burzowych, umiejscowionych na odcinkach sieci powyżej rozpatrywanego odcinka sieci. Czas trwania deszczu miarodajnego obliczany jest z uwzględnieniem sieci powyżej odcinka.

Drugim sposobem wyznaczania natężenia deszczu miarodajnego jest metoda stałych natężeń, w której przyjmuje się czas trwania deszczu $t_d = 10$ min i częstotliwość $c=2$. Współczynnik opóźnienia φ , zależny od powierzchni zlewni oraz jej spadku i kształtu określony jest wzorem Burklego-Zieglera:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[4]{F}}$$

Współczynnik φ może przyjmować wartości od 2 do 8 (większe dla zlewni zwartych i o dużych spadkach).

Niecała ilość wody od razu spływa do kanału, lecz odbywa się to stopniowo z coraz bardziej odległych fragmentów zlewni. Zjawisko to uwzględnia czas retencji terenowej, który może być przyjmowany według tabel lub na podstawie takich czynników, jak kształt zlewni, położenie kanału, spadek terenu itp. Zjawisko to można również uwzględnić przez zastosowanie współczynnika $f(t)$ zależnego od czasu.



Rysunek 3. Wykres zależności współczynnika dopływu $f(t)$ od czasu t gdzie:

t_R - czas retencji terenowej

t_d - czas trwania deszczu

t_k - całkowity czas trwania spływu wód deszczowych do kanału

Dopływ do kanału $Q_d(t)$ określa zależność:

$$Q_d(t) = q_d \cdot \psi \cdot F \cdot f(t) \quad [\text{dm}^3/\text{s}] \quad (16)$$

gdzie F - pole pow. zlewni

Może on być stosowany w modelu jako dopływ punktowy w węźle sieci, ale bardziej korzystne jest zadawanie go jako dopływu na jednostkę długości kanału:

$$q(t) = \frac{Q_d(t)}{L} \quad (17)$$

Zadanie dopływów w postaci funkcji $Q_d(t)$ (trapezowej, Pearson'a III itp.) powoduje powstanie w kanałach fal. Zmienny czas przepływu przez różne odcinki wynikający z prędkości przesuwania się fali (różne spadki, chropowatości, kształty i wielkości przekrojów kanałów, napełnienia) powoduje różne nakładanie się fal przy połączeniach kanałów.

Dzięki symulacji można ujawnić najbardziej niekorzystne przypadki tzn. takie, gdzie spotykają się maksymalne przepływy. Przepętnienia mogą występować nie tylko w miejscach połączeń odcinków, ale również w dowolnym przekroju kanału.

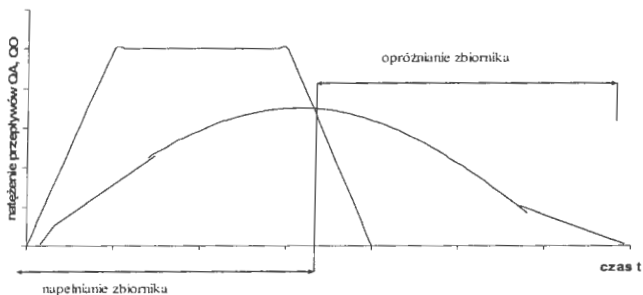
4.4 KLASYCZNE ZBIORNIKI RETENCYJNE

Jednokomorowy zbiornik retencyjny służy do retencjonowania ścieków. Dopływ ścieków do zbiornika odbywa się poprzez otwór dopływowy zlokalizowany najczęściej w górnej części ściany w początkowej części zbiornika. Zbiornik ten może pełnić rolę osadnika oczyszczającego ścieki poprzez proces sedymentacji zawieszin stałych lub uśrednianie składu ścieków.

Sposób określania wymaganej objętości zbiornika zależy od jego funkcji w systemie kanalizacji. W przypadku zbiorników do odciążenia hydraulicznego sieci kanalizacyjnej niezbędna objętość retencyjna determinowana jest stopniem redukcji przepływu ścieków oraz cechami sieci kanalizacyjnej.

Objętość zbiorników stosowanych do oczyszczania ścieków jest uzależniona od czasu przetrzymywania ścieków w zbiorniku i stopnia ich oczyszczania. Na objętość wpływ ma także stężenie zanieczyszczeń doprowadzanych do zbiornika oraz przebieg zmian tego stężenia w czasie.

Hydrogram odpływu ścieków ze zbiornika, przy założeniu trapezowego kształtu dopływu ścieków deszczowych (przy czasie trwania deszczów dłuższych od czasu dopływu tych ścieków) przedstawiono na Rysunku 1.



Rys.1. Hydrogramy dopływu QA i odpływu QO ze zbiornika retencyjnego

Model działania zbiornika opisuje ciąg kolejno występujących faz napełniania i opróżniania zbiornika.

Proces napełniania zbiornika

1. działanie zbiornika w okresach bezdeszczowych

$$0 \leq h \leq D$$

$$Q_A \geq 0, \quad Q_A = Q_O, \quad Q_{aw} = 0$$

gdzie:

h – poziom napełnienia zbiornika

D – wysokość wylotu

2. napełnianie komory retencyjnej przy kanale odpływowym działającym jako przewód o przepływie grawitacyjnym

$$0 \leq h \leq D$$

$$Q_A > 0, \quad Q_A > Q_O, \quad Q_{aw} = 0$$

3. napełnianie komory retencyjnej przy kanale odpływowym działającym jako przewód o przepływie ciśnieniowym

$$D < h \leq h_{max}$$

$$Q_A > 0, \quad Q_A > Q_O, \quad Q_{aw} = 0$$

4. pełna akumulacja ścieków w zbiorniku

$$h = h_{max}$$

$$Q_A = Q_O, \quad Q_{aw} = 0$$

5. zrzut ścieków przez przelew awaryjny

$$h_{max} < h \leq h_{aw}$$

$$Q_A \geq 0, \quad Q_A > Q_O, \quad Q_{aw} \geq 0$$

Proces opróżniania zbiornika

1. opróżnianie przy działaniu przelewu awaryjnego

$$h_{max} < h \leq h_{aw}$$

$$Q_A \geq 0, \quad Q_A \leq Q_O, \quad Q_{aw} \geq 0$$

2. opróżnianie zbiornika przy kanale odpływowym działającym jako przewód o przepływie ciśnieniowym

$$D < h \leq h_{max}$$

$$Q_A > 0, \quad Q_A \leq Q_O, \quad Q_{aw} = 0$$

3. opróżnianie zbiornika przy kanale odpływowym działającym jako przewód o przepływie grawitacyjnym

$$0 \leq h \leq D$$

$$Q_A > 0, \quad Q_A \leq Q_O, \quad Q_{aw} = 0$$

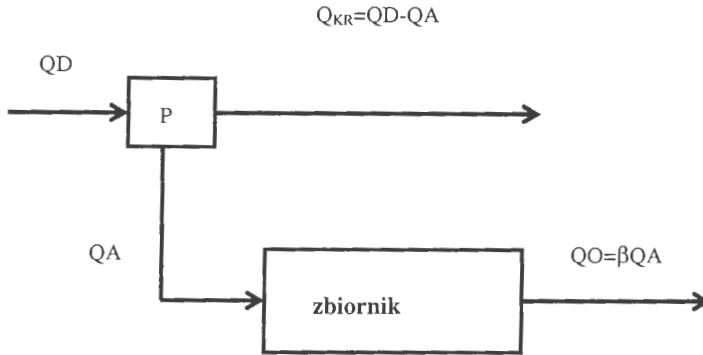
Współdziałanie zbiorników retencyjnych z siecią kanalizacyjną

Zbiornik retencyjny może pracować w sieci kanalizacyjnej jako przepływowy lub w lokalizacji bocznej. Rysunek 2. przedstawia sposoby działania zbiornika w sieci.

- a) zbiornik zlokalizowany w osi kanału



b) zbiornik zlokalizowany w obejściu bocznym



Rys.2. Schematy działania zbiornika w sieci

Sposób współdziałania zbiornika z siecią ma wpływ na wyznaczanie bilansu ścieków w zbiorniku i objętości użytkowej zbiornika.

Przy pracy zbiornika w układzie przepływowym natężenie dopływu do zbiornika Q_A jest tożsame z natężeniem przepływu w sieci Q_D . Natężenie odpływu określa zależność:

$$Q_O = \beta Q_A$$

Dla zbiornika działającego w układzie z obejściem bocznym odpowiednie natężenia określone są następującymi zależnościami:

$$Q_A = Q_D - Q_{KR}$$

$$Q_O = \beta(Q_D - Q_{KR})$$

gdzie:

Q_A – natężenie dopływu do zbiornika

Q_D – natężenie przepływu kanałem

Q_O – natężenie odpływu ze zbiornika

Q_{KR} – natężenie przepływu odprowadzanych przez przelew z ominięciem zbiornika

β – współczynnik redukcji natężenia przepływu w zbiorniku

Bilans ścieków w zbiorniku

Równanie bilansu ścieków w zbiorniku oparte jest na równaniu zachowania masy i ma postać:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_A(t)}{F_{kp}} - \frac{Q_O(t)}{F_j}$$

gdzie:

h – wysokość napełnienia zbiornika

F_{kp} – powierzchnia pozioma komory przepływowej

F_j - powierzchnia pozioma zbiornika

Natężenie odpływu ścieków ze zbiornika wyraża się zależnością:

$$QO = \sqrt{2g\mu_0 F_0} \sqrt{h}$$

gdzie:

F_0 – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu odpływowego

g - przyspieszenie ziemskie

μ_0 – współczynnik wydatku otworu wypływowego wyznaczanego ze wzoru

$$\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{8gl}{c_H^2 \cdot D_0} + \sum \zeta + 1}}$$

gdzie:

l – długość przewodu odpływowego

c_H – wsp. Cezy

D_0 – średnica przewodu odpływowego

$\sum \zeta$ - suma strat na przepływie przewodem odpływowym

4. Literatura

1. S.Biedugnis: Metody informatyczne w wodociągach i kanalizacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
2. J.Chudzicki, S.Sosnowski: Instalacje kanalizacyjne. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. Z o.o, Warszawa 2004
3. P.Mizgalewicz, K.Knapik, A.Wieczysty: Analiza pracy sieci kanalizacyjnych przy zastosowaniu EMC. Ochrona Środowiska nr 434/3-4 (20-21), 1984.
4. J.Wartalski: Komputerowe metody projektowania i analizy hydraulicznej sieciowych układów kanalizacyjnych. Ochrona Środowiska, nr 434/3-4 (20-21), 1984
5. M.Serek: Zastosowanie mikrokomputerów do obliczania sieci kanalizacji deszczowej. Ochrona Środowiska, nr 488/1-2 (27-28), 1986.
6. WILO Polska- producent pomp i urządzeń sanitarnych: Podstawy odprowadzania i pompowania ścieków. Oferta handlowa.

the 1990s, the number of people who have been employed in the public sector has increased in all countries. The increase has been particularly large in the United States, where the public sector has grown from 12.5% of the total workforce in 1970 to 20.5% in 1995 (see Figure 1).

There are a number of reasons for the increase in public sector employment. One reason is that the public sector has become a more attractive place to work. This is due to a number of factors, including the fact that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

There are also a number of reasons why the public sector has become a more attractive place to work. One reason is that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

There are also a number of reasons why the public sector has become a more attractive place to work. One reason is that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

There are also a number of reasons why the public sector has become a more attractive place to work. One reason is that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

There are also a number of reasons why the public sector has become a more attractive place to work. One reason is that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

There are also a number of reasons why the public sector has become a more attractive place to work. One reason is that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

There are also a number of reasons why the public sector has become a more attractive place to work. One reason is that public sector jobs are often more secure and offer better benefits than private sector jobs. Another reason is that the public sector has become a more important part of the economy, particularly in countries where the public sector provides a large amount of social services.

the 1990s, the number of people in the UK who are aged 65 and over has increased from 10.5 million to 13.5 million (1990-2000).

There is a growing awareness of the need to improve the health and well-being of older people. The Department of Health (2001) has set out a strategy for the health care of older people, and the Department of Health and the Department of Social Security (2001) have published a strategy for the care of older people. The strategy for the care of older people is based on the following principles:

- Older people should be able to live independently and actively in their own homes.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.

The strategy for the care of older people is based on the following principles:

- Older people should be able to live independently and actively in their own homes.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.

The strategy for the care of older people is based on the following principles:

- Older people should be able to live independently and actively in their own homes.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.

The strategy for the care of older people is based on the following principles:

- Older people should be able to live independently and actively in their own homes.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.

The strategy for the care of older people is based on the following principles:

- Older people should be able to live independently and actively in their own homes.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.

The strategy for the care of older people is based on the following principles:

- Older people should be able to live independently and actively in their own homes.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.
- Older people should be able to live in their own homes for as long as possible.