

Grzegorz ŁAGÓD<sup>1</sup>

## REAERACJA ŚCIEKÓW W KANALIZACJI GRAWITACYJNEJ

### REAERATION OF SEWAGE IN GRAVITATIONAL SEWER SYSTEM

**Abstrakt:** Stopień natlenienia ścieków ma kluczowe znaczenie dla tlenowych procesów biodegradacji zanieczyszczeń, przeprowadzanych przez biomasę heterotroficzną bytującą w systemie kanalizacyjnym. Stopień ten zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to stężenie tlenu w powietrzu ponad swobodnym zwierciadłem ścieków, pole powierzchni kontaktu ścieków i powietrza oraz właściwości hydrodynamiczne przepływu. Gazy powstające w kanalizacji oprócz uciążliwości zapachowej mogą stanowić zagrożenie zdrowia i życia osób odpowiedzialnych za eksploatację i konserwację kanałów. Aby zminimalizować skalę opisanych problemów, projektuje się sieci kanalizacyjne w sposób zapewniający skuteczną ich wentylację, co przy prawidłowej realizacji projektu oraz odpowiednim stanie technicznym elementów systemu skutkuje składem powietrza w kanalizacji zbliżonym do składu powietrza atmosferycznego. Na podstawie przeglądu literatury oraz badań terenowych prowadzonych w miastach Lublin i Chełm przyjęto, iż stężenie tlenu w kolektorze ponad swobodnym zwierciadłem ścieków jest takie samo jak w powietrzu atmosferycznym (podczas badań prowadzonych w poprawnie funkcjonujących kolektorach kanalizacyjnych tylko w jednym punkcie zanotowano stężenie tlenu poniżej 18%). Założenie takie jest spełnione dla większości sytuacji występujących w kanalizacji grawitacyjnej i znacznie ułatwia opis procesów tlenowych w biomacie zawieszonyj w toni ścieków i błonie biologicznej zanurzonej w ściekach. Proces reaeracji ścieków w kolektorach kanalizacji grawitacyjnej opisano za pomocą równań uwzględniających między innymi stężenie tlenu rozpuszczonego w ściekach, w równowadze z atmosferą, współczynniki wpływu detergentów i temperatury oraz wyznaczany empirycznie ogólny współczynnik transferu tlenu.

**Słowa kluczowe:** kanalizacja grawitacyjna, powietrze w przewodach kanalizacyjnych, reaeracja ścieków, biodegradacja ścieków w przewodach kanalizacyjnych

Gazy powstające w kanalizacji oprócz uciążliwości zapachowej mogą stanowić zagrożenie zdrowia i życia osób odpowiedzialnych za eksploatację i konserwację kanałów. Aby zminimalizować ilość wytwarzanych i stagnujących w kanałach gazów, projektuje się sieci kanalizacyjne w sposób zapewniający skuteczną ich wentylację, co przy prawidłowej realizacji projektu oraz odpowiednim stanie technicznym elementów systemu skutkuje składem powietrza w kanalizacji zbliżonym do składu powietrza atmosferycznego. Stan taki stwierdzono podczas badań prowadzonych na obiektach sieci kanalizacyjnych miast Lublina oraz Chełma. W trakcie serii kilkudziesięciu pomiarów wykonanych za pomocą urządzenia „GasHunter” tylko raz stężenie tlenu w powietrzu ponad zwierciadłem ścieków w przewodzie kanalizacyjnym było mniejsze od 18%. Dla potrzeb modelu przyjęto, iż skład powietrza w kolektorze ponad swobodnym zwierciadłem ścieków jest taki sam jak powietrza atmosferycznego [1-4]. Założenie takie jest spełnione w większości sytuacji występujących w kanalizacji grawitacyjnej i znacznie ułatwia opis procesów tlenowych w biomacie zawieszonyj w toni ścieków i błonie biologicznej zanurzonej w ściekach [3, 5-14].

Z wytycznych dotyczących projektowania sieci kanalizacyjnych wynika [1, 2, 15], iż względna wysokość napełnienia kanałów nie powinna przekraczać 0,8 ich wysokości całkowitej, między innymi ze względu na ochronę przed zagniwaniem ścieków. Badania terenowe oraz literatura przedmiotu wskazują na to, iż ścieki w grawitacyjnej kanalizacji

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 081 538 43 22, email: G.Lagod@wis.pol.lublin.pl

rozdzielczej zajmują zwykle w ciągu doby nie więcej niż 50% przekroju całkowitego przewodu, a w kanalizacji ogólnospławnej ok. 10%. Niecałkowite wypełnienie zapewnia istnienie strefy powietrznej (o składzie zbliżonym do powietrza atmosferycznego, niekiedy z podwyższoną zawartością siarkowodoru i metanu) w górnej części przekroju kanałów, umożliwiającej reaerację przepływających ścieków [15].

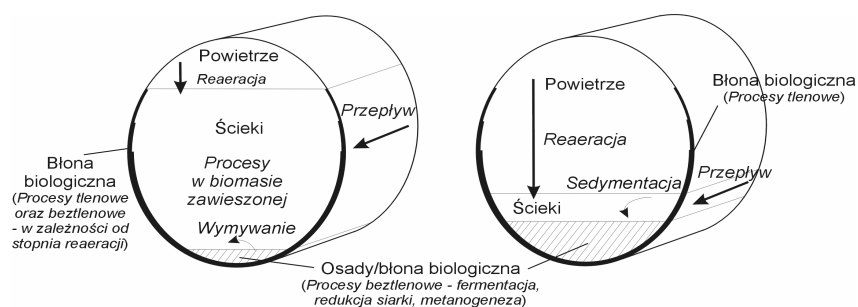
Skład powietrza w przewodzie zależy od skuteczności przewietrzania sieci kanalizacyjnej. Przewietrzanie to jest dość złożonym procesem i różni się znacznie od przewietrzania pomieszczeń. Powietrze, które do przewodów kanalizacyjnych dostało się z zewnątrz, oziębia się w nich bądź też ogrzewa - w zależności od pory roku, a następnie w wyniku różnicy ciśnienia może wypływać wywiewnikami zlokalizowanymi w różnych miejscach sieci. Powietrze, dostające się do sieci kanalizacyjnej przez przypadkowe nieszczelności oraz studzienki kanalizacyjne, ma stosunkowo niewielki udział w całości gazów tworzących poduszkę powietrzną w kanalizacji rozdzielczej. W celu zapewnienia skutecznej wentylacji montowane są w sieci specjalne urządzenia napowietrzające [1, 2, 15].

Należy w tym miejscu zauważyć, że chociaż z punktu widzenia mieszkańców osiedli bardziej wskazana jest sytuacja, w której system kanalizacji grawitacyjnej jest całkowicie szczelny i nie dochodzi do wymiany powietrza pomiędzy nim a atmosferą, to jednak z perspektywy eksploatorów systemu kluczowe jest zapewnienie skutecznego przewietrzania kanałów, co oprócz możliwości bezpiecznej ich konserwacji ogranicza również ilość toksycznych gazów, które powstają w warunkach beztlenowych.

### Reaeracja ścieków w kanalizacji grawitacyjnej

Stopień natlenienia ścieków ma kluczowe znaczenie dla tlenowych procesów biodegradacji zanieczyszczeń, przeprowadzanych przez biomasę heterotroficzną bytującą w systemie kanalizacyjnym. Stopień ten zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to stężenie tlenu w powietrzu ponad swobodnym zwierciadłem ścieków, pole powierzchni kontaktu ścieków i powietrza oraz właściwości hydrodynamiczne przepływu.

W zależności od wysokości wypełnienia przekroju kanału ściekami, które definiuje warunki hydrodynamiczne przepływu, można rozważać dwie główne, przeciwstawne do siebie sytuacje (rys. 1).



Rys. 1. Procesy zachodzące w grawitacyjnym systemie kanalizacji sanitarnej przy różnych poziomach wypełnienia ściekami [6, 9, 13]

Fig. 1. Processes occurring inside the gravitational sewer system at different sewage levels [6, 9, 13]

Pierwsza z omawianych sytuacji występuje przy wysokim napełnieniu, które powoduje wymywanie złogów osadów zgromadzonych na dnie, zaś ze względu na dużą objętość przepływających ścieków oraz małą powierzchnię, przez którą może następować reaeracja, prowadzi do powstawania stref beztlenowych w błonie biologicznej i ściekach. Druga sytuacja ma miejsce w przypadku niskiego napełnienia kanału, przy którym następuje sedimentacja transportowanych osadów oraz skuteczna reaeracja.

Opis zmian stężenia tlenu w ściekach płynących w kanalizacji grawitacyjnej dla rozpatrywanego odcinka można przedstawić w następujący sposób [5]:

$$\left(\frac{\partial S_O}{\partial t}\right) = U \left(\frac{\partial S_O}{\partial x}\right) + k_l \frac{B}{A} (S_O^* - S_O) - r_{O,bf} \frac{O_Z}{A} - r_{O,bz}$$

gdzie:  $S_O$  - stężenie tlenu w ściekach [ $\text{g O}_2 \text{ m}^{-3}$ ],  $t$  - czas [s],  $U$  - prędkość średnia przepływu ścieków [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $x$  - długość przewodu [m],  $r_{O,bz}$  - prędkość poboru tlenu przez biomasę zawieszoną [ $\text{g O}_2 \text{ m}_{bz}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ],  $r''_{O,bf}$  - prędkość poboru tlenu przez błonę biologiczną [ $\text{g O}_2 \text{ m}_{bf}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ],  $k_l$  - prędkość przepływu masy w fazie płynnej [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $B$  - szerokość zwierciadła ścieków [m],  $S_O^*$  - równoważne stężenie tlenu w powietrzu [ $\text{g O}_2 \text{ m}^{-3}$ ],  $A$  - pole przekroju czynnego [ $\text{m}^2$ ],  $O_Z$  - obwód zwilżony [m].

Na podstawie rozważań teoretycznych wspartych danymi doświadczalnymi powstały cytowane w literaturze przedmiotu zależności opisujące reaerację ścieków w przewodach kanalizacji grawitacyjnej. Podstawowe równanie bywa zapisywane jako [6, 10, 11, 13]:

$$\rho_{rea} = K_L a (S_{OS} - S_O) = K_{LO_2} (S_{OS} - S_O)$$

gdzie:  $\rho_{rea}$  - prędkość transferu tlenu [ $\text{g m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ],  $K_L a = K_{LO_2}$  - ogólny współczynnik transferu tlenu [ $\text{d}^{-1}$ ],  $S_{OS}$  - stężenie saturacji tlenu rozpuszczonego w ściekach [ $\text{g m}^{-3}$ ].

Stężenie saturacji tlenu rozpuszczonego w ściekach w równowadze z atmosferą można obliczyć z następującej zależności [6]:

$$S_{OS} = \frac{P - p_s}{760 - p_s} (14,652 - 0,41022 T + 0,00799 T^2 - 0,0000773 T^3)$$

gdzie:  $P$  - aktualne ciśnienie [mm Hg],  $p_s$  - ciśnienie pary nasyconej w temperaturze  $T$  [mm Hg],  $T$  - temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Ogólny współczynnik transferu tlenu definiowany jest w następujący sposób [12, 13]:

$$K_L a = K'_L a = K'_L H^{-1}$$

gdzie:  $K'_L$  - szybkość transferu tlenu [ $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ],  $a$  - stosunek powierzchni styku ścieków i powietrza do objętości ścieków [ $\text{m}^{-1}$ ],  $H$  - średnia głębokość hydrauliczna, czyli stosunek przekroju czynnego do szerokości zwierciadła ścieków,  $A/B$  [m].

Równanie opisujące prędkość transferu tlenu można uzupełnić o zależności związane z temperaturą oraz właściwościami ścieków [6, 12, 13]:

$$\rho_{rea} = \alpha K_L a (20) (\beta S_{OS} - S_O) \alpha_r^{(T-20)}$$

gdzie:  $\alpha$  - współczynnik uwzględniający wpływ detergentów, zwykle około 0,95 [-],  $\alpha_r$  - współczynnik uwzględniający wpływ temperatury na reaerację, około 1,024 [-],  $\beta$  - współczynnik uwzględniający różnicę rozpuszczalności tlenu w ściekach i czystej wodzie, zwykle w zakresie 0,8÷0,95 [-].

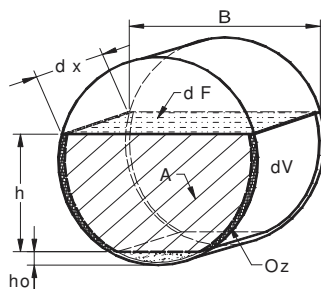
Wzory empiryczne na ogólny współczynnik transferu tlenu wyprowadzane były i cytowane w literaturze wielokrotnie, tabela 1 zawiera zestawienie najważniejszych z nich. Użyte w przedstawionych wzorach symbole kolejno oznaczają:  $Fr$  - liczba Frouda [-],  $U$  - prędkość średnia [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $g$  - przyspieszenie ziemskie [ $\text{m s}^{-2}$ ],  $s$  - spadek dna kanału [ $\text{m m}^{-1}$ ],  $R_h$  - promień hydrauliczny [m],  $D$  - średnica przewodu [m],  $B_m$  - współczynnik zależny od intensywności mieszania oraz jakości ścieków, około 720 [-]. W przedstawionych pracach modelowych wykorzystano wzór zaproponowany przez Jensena w 1995 roku.

Tabela 1  
Wzory empiryczne wyprowadzone dla określenia ogólnego współczynnika transferu tlenu  $K_L a(20)$  w kanalizacji grawitacyjnej [5, 6, 10, 12, 13]

Table 1  
Empirical equations to obtain the general coefficient of oxygen transfer  $K_L a(20)$  in gravitational sewerage [5, 6, 10, 12, 13]

Nr	Autorzy	Wyrażenie na $K_L a$ ( $\text{h}^{-1}$ )
1	Krenkel, Orlob (1962)	$7,235(Us)^{0,408}H^{-0,66}$
2	Owens, et al (1964)	$0,222 U^{0,67}H^{-1,85}$
3	Parkhurst, Pomeroy (1972)	$0,96(1+0,17Fr^2)(sU)^{3/8}H^{-1}$
4	Tsivoglou, Neal (1976)	$B_m Us$
5	Tagizadeh-Nasser (1986)	$0,4 U (H/R_h)^{0,613}H^{-1}$
6	Jensen, Hvitved-Jacobsen (1991)	$0,96(1+0,17 Fr)(sU)^{0,76}H$
7	Jensen (1995)	$0,86(1+0,2 Fr^2)(sU)^{3/8}H^{-1}$
8	Balmer, Tagizadeh-Nasser (1995)	$2,10(s U g)^{3/8} (H/D)^{0,4}/H$

Wielkości związane z geometrią i hydrodynamiką kolektora kanalizacji grawitacyjnej wykorzystywane w modelu przedstawia rysunek 2.



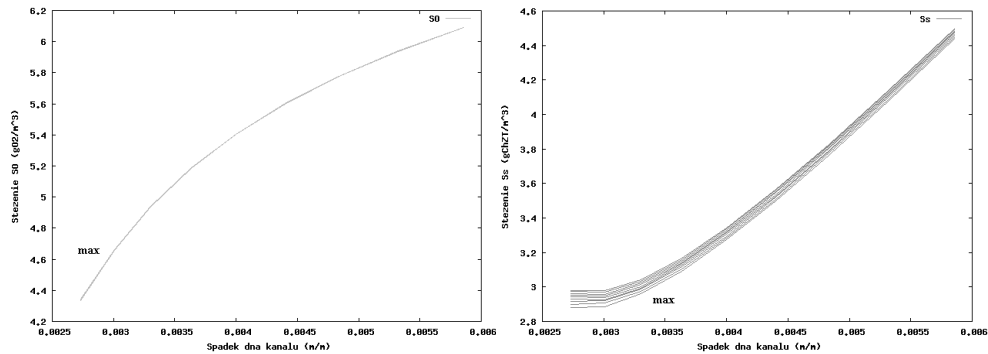
Rys. 2. Wielkości związane z modelem obiektu rzeczywistego - kolektora kanalizacji grawitacyjnej [13, 14]

Fig. 2. Dimensions related to the model of real object - gravitational sewer pipe [13, 14]

### Omówienie wyników i podsumowanie

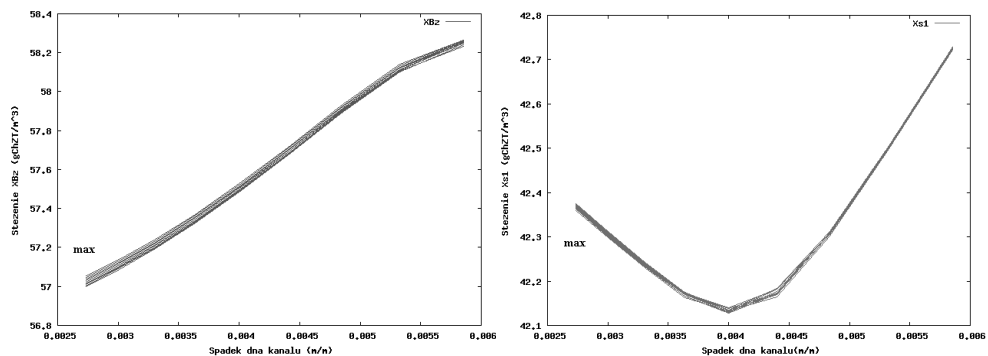
Po skalibrowaniu autorskiego modelu numerycznego biodegradacji ścieków w kanalizacji grawitacyjnej, którego podstawową częścią jest prezentowany moduł reaeracji ścieków zarówno pod względem geometrycznym, hydrodynamicznym, jak i biologicznym, przeprowadzono kilka serii symulacyjnych [13, 14]. Interesujące wydają się wyniki dotyczące wpływu spadku dna kanału, stężenia początkowego substancji

rozpuszczonej oraz tlenu na zmiany stężeń modelowanych komponentów na końcu kolektora.



Rys. 3. Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w ściekach  $S_O$  oraz biodegradowalnej substancji rozpuszczonej  $S_S$  na wylocie z kolektora w funkcji spadku dna kanału dla różnych wartości początkowych  $S_O$ . Linia środkowa odpowiada wartości  $1 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$ . Na wykresie oznaczono również maksymalną wartość dla  $S_S$

Fig. 3. Changes of dissolved oxygen concentration  $S_O$  in sewage and dissolved biodegradable substrates  $S_S$  at the end of conduit, correlated to inclination of pipe bottom for different initial values of  $S_O$ . The central line represents the value of  $1 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$ , the maximal value of  $S_S$  was also marked on the graph



Rys. 4. Zmiany stężenia biomasy heterotroficznej  $X_{Bz}$  oraz substancji szybko ulegającej hydrolizie  $X_{S1}$  na wylocie z kolektora w funkcji spadku dna kanału dla różnych wartości początkowych  $S_O$ . Linia środkowa odpowiada wartości  $1 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$ . Na wykresie oznaczono również maksymalną wartość dla  $S_S$

Fig. 4. Changes of heterotrophic biomass concentration  $X_{Bz}$  and fast hydrolysable substances at the end of conduit, correlated to inclination of pipe bottom for different initial values of  $S_O$ . The central line represents the value of  $1 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$ , the maximal value of  $S_S$  was also marked on the graph

Na podstawie analizy prezentowanych wyników (rys. rys. 3 i 4) można stwierdzić, iż symulacja przemian zachodzących w konkretnym kolektorze pozwala odpowiedzieć na pytanie, czy do przyspieszenia procesów biodegradacji ścieków potrzebny jest dodatek biomasy na wlocie czy też raczej zapewnienie odpowiedniej ilości tlenu. Jak wynika z symulacji oraz badań literaturowych, słabe przewietrzanie i deficyt tlenowy stanowią

niekiedy czynnikiem ograniczającym biodegradację zanieczyszczeń w kolektorach o wielokilometrowej długości.

Jednak początkowe stężenie tlenu rozpuszczonego w ściekach na wlocie do kolektora ma niewielki wpływ na przebieg procesów biodegradacji, zaś kluczową rolę odgrywa tutaj proces reaeracji ścieków. Jeżeli podczas badań terenowych w takim kolektorze zaobserwowany zostanie deficyt tlenu rozpuszczonego, dla intensyfikacji procesów tlenowej biodegradacji ścieków można przewidzieć urządzenia napowietrzające. W przypadku kolektorów w fazie projektowej można za pomocą cytowanego modelu [13, 14] wskazać punkty, w których wystąpi deficyt tlenowy przy założonych parametrach przepływu i jakości ścieków.

Jak wynika z pomiarów prowadzonych na obiektach kanalizacji lubelskiej i chełmskiej oraz wyników badań zaczerpniętych z literatury, w warunkach klimatu umiarkowanego (Polska, Dania, Szwajcaria) proces reaeracji ścieków w sprawnie funkcjonującej kanalizacji grawitacyjnej w większości przypadków równoważą ubytek tlenu występujący w kolektorach na skutek przebiegu procesów biodegradacji zanieczyszczeń.

## Literatura

- [1] Błaszczak W., Stomatello H. i Błaszczak P.: *Kanalizacja*. Tom 1, Sieci i pompownie. Arkady, Warszawa 1983.
- [2] Imhoff K. i Imhoff K.R.: *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*. Projprzem-EKO, Bydgoszcz 1996.
- [3] Norsker N.H., Nielsen P.H. i Hvitved-Jacobsen T.: *Influence of oxygen on biofilm growth and potential sulfate reduction in gravity sewer biofilm*. Water Sci. Technol., 1995, **31**(7), 159-167.
- [4] Almeida M.C., Butler D. i Davies J.W.: *Modelling in-sewer changes in wastewater quality under aerobic conditions*. Water Sci. Technol., 1999, **39**(9), 63-71.
- [5] Huisman J.L.: *Transport and transformation process in combined sewers*. IHW Schriftenreihe, 2001, **10**, 1-180.
- [6] Hvitved-Jacobsen T.: *Sewer Processes Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks*. CRC PRESS, Boca Raton, London, New York, Washington 2002.
- [7] Huisman J.L., Weber N. i Gujer W.: *Reaeration in sewers*. Water Res., 2004, **38**, 1089-1100.
- [8] Huisman J.L., Gasser T., Gienal C., Kuhn M., Krebs P. i Gujer W.: *Quantification of oxygen fluxes in a long gravity sewer*. Water Res., 2004, **38**, 1237-1247.
- [9] Łągód G. i Sobczuk H.: *Transformation and biodegradation of pollutants in sewer systems as a processes leading to sewage self-purification*. Ecol. Chem. Eng., 2006, **13**(3-4), 247-254.
- [10] Nielsen P.H., Raunkjær K., Norsker N.H., Jensen N.A. i Hvitved-Jacobsen T.: *Transformation of wastewater in sewer systems*. Water Sci. Technol., 1992, **25**(6), 17-31.
- [11] Raunkjær K., Hvitved-Jacobsen T. i Nielsen P.H.: *Transformation of organic matter in a gravity sewer*. Water Environ. Res., 1995, **67**(2), 181-188.
- [12] Jensen N.A.: *Empirical modelling of air-to-water oxygen transfer in gravity sewers*. Water Environ. Res., 1995, **67**(6), 979-991.
- [13] Łągód G.: *Modelowanie procesów biodegradacji ścieków w kolektorach kanalizacji grawitacyjnej*. Praca doktorska. Lublin 2007.
- [14] Łągód G. i Sobczuk H.: *Modelowanie wpływu napełnienia kolektora kanalizacji grawitacyjnej na przebieg tlenowych procesów biodegradacji ścieków*. Proc. of ECOpole, 2007, **1**(1/2), 181-186.
- [15] Dąbrowski W.: *Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko*. Wyd. Polit. Krakowskiej, Kraków 2004.

## INFLUENCE OF FLOW PARAMETERS ON AEROBIC BIODEGRADATION OF POLLUTANTS IN SEWER SYSTEM

**Abstract:** The grade of sewage aeration has an essential importance for aerobic processes of pollutants biodegradation occurring in the sewer systems. This grade depends on many factors with the most important are oxygen concentration in the atmosphere over the sewage surface and dimension of sewage - air surface contact as well as the hydrodynamic flow properties. The gases occurring in sewer system besides odor problems can threaten health and life of people responsible for exploitation and conservation of the canals. To minimize the described problems, sewer systems are designed in the way preserving the efficient ventilation, which with proper design realization and the good conditions of system elements result in composition of conduit atmosphere close to atmospheric air. Basing on the literature review and field examination of conduits in cities of Lublin and Chelm it was assumed that atmosphere composition in sewer over the sewage surface is similar to the atmospheric air (during examination conducted in properly functioning sewers, oxygen concentration in only single point fall below 18%). This assumption is suitable for the majority of situations occurring in gravitational sanitation system and it visibly makes easier the description of aerobic processes in suspended biomass and biofilm growing in sewer pipes. The reaeration of wastewater in gravitational sewer systems are described by mathematical formulas considering coefficient of oxygen saturation in sewage in equilibrium with atmosphere, coefficient of detergent and the temperature influence as well as general coefficient of oxygen transfer.

**Keywords:** gravitational sewer system, atmosphere of sewer pipes, reaeration of sewage, sewage biodegradation in gravitational sewer system