

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Юбилейна приложна научно-техническа конференция
„65 години Хидротехнически факултет и 15 години немскоезиково обучение”

6–7 ноември 2014
6–7 November 2014

International Jubilee Conference
„65th Anniversary Faculty of Hydraulic Engineering and 15th Anniversary Hydraulic Engineering in German”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

XLVII ^{ТОМ}
vol.

2014

св.
fasc. I-A

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОДЕЛНИ ПАРАМЕТРИ НА МАСОПРЕНОС НА КИСЛОРОД В ЛАБОРАТОРНА АЕРИРАНА КОЛОНА

Д. Аличков¹, С. Димитрова², Б. Инджов³

Ключови думи: аерирана колона, масопренос на кислород, стандартен коефициент на масопренос на кислород, стандартна граница на насищане

Научна област: пречистване на води

РЕЗЮМЕ

Целта на настоящата работа е да се изследва влиянието на дълбочината на потапяне на аерационната система и количеството на подавания въздух към нея върху моделните параметри на масопренос на кислород. Експериментите са осъществени в лабораторен реактор тип колона, оборудвана с аерационна система. Концентрацията на разтворен кислород е измервана в три характерни дълбочини (1 m, 2 m, 3 m). За проведените експерименти подаваното количество въздух към аерационната система е в диапазона от 50 ndm³/h до 550 ndm³/h. Изведени са аналитични зависимости за моделните параметри: стандартен коефициент на масопренос на кислород ($k_L a_{20}$) и стандартна граница на насищане ($C_{S,20}$).

1. Въведение

Ефективното снабдяване с кислород е необходимо изискване за осъществяване на аеробни химични и биохимични реакции. Аерацията е процес, базиран на принципите на масопренос, който намира най-голямо приложение в съвременните съоръжения за пречистване на отпадъчни води с активна утайка.

¹ Димитър Аличков, доц. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на водите“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: d.alitchkov@aquains.com

² Соня Димитрова, доц. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на водите“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: son_fhe@uacg.bg

³ Борислав Инджов, ас. инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на водите“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: bindjov4525@abv.bg

Преносът на кислород от газова в течна фаза често е скороопределящ етап в аеробните процеси поради малката разтворимост на кислорода в течната среда. Това изисква познаване на обемния коефициент на масопренос на кислород $K_L a_L$. Обемният коефициент на масопренос $K_L a_L$ зависи от много параметри, включващи свойства на течната фаза, геометрията на реактора, оперативни условия [1]. Той е основен параметър при проектиране на реактори и аерационни системи.

Съществуват различни методи за експериментално определяне на коефициента на масопренос [2]. В настоящата разработка е приложен методът за определяне на количеството кислород в чиста вода. Изискванията за провеждане на такъв тип измервания са регламентирани в БДС стандарта [3]. Моделни параметри $k_L a_{20}$ (стандартен коефициент на масопренос на кислород) и $C_{S,20}$ (стандартната концентрация на разтворен кислород при насищане) са получени чрез прилагане на абсорбционна процедура.

Настоящото изследване има за цел да проследи как се изменят основните моделни параметри ($k_L a_{20}$ и $C_{S,20}$), описващи скоростта на усвояване на кислорода в чиста вода при различна дълбочина и различно количество на подавания въздух към аерационната система.

За провеждане на изследването бе конструиран колонен тип аериран реактор. Този тип реактори се използват главно за химични процеси, включващи окисление, алкилиране, полимеризация и хидрогениране, при производството на синтетични горива и в биохимически реакции, като ферментация и биологично пречистване на отпадъчни води [4, 5, 6]. Аерираните колонни реактори притежават редица предимства: проста конструкция, нямат механично движещи се части, в тях се осъществява добър топлинен и масов пренос, висока термична стабилност, добро смесване на фазите, ниски енергийни, конструктивни и експлоатационни разходи [5]. Това ги прави подходящи за изследване на моделни кинетични параметри на химични и биохимични реакции.

2. Теоретична основа

Абсорбционният метод за определяне на скоростта на подаване на кислород в чиста вода се изразява в отстраняване на разтворения кислород с помощта на химични реагенти и последваща реаерация до ниво, близко до нивото на насищане за дадени условия, като концентрацията на разтворения кислород се измерва непрекъснато.

Основната зависимост, с която се описва скоростта на абсорбция на кислорода от водата, е

$$\frac{dC}{dt} = k_L a_T \times (C_{S_t} - C_t), \quad (1)$$

където dC/dt е скоростта на пренос на кислород във водата;

$k_L a_T$ – обемнен коефициент на масопренос на кислород;

C_t – концентрация на кислорода във водата в момента t ;

C_{S_t} – граница на насищане с кислород във водата.

Етапът на реаерация за насищане на водата с кислород е определящ за получаването на моделните параметри $k_L a_{20}$ и $C_{S,20}$. Данните, получени от всяко измерване, се анализират чрез опростен модел на масопренос (получен след решаване на диференциалното уравнение (1)), представен с функцията

$$C_t = C_{s,p^*,T} \times (C_{s,p^*,T} - C_0) \times \exp(k_L a_T \times t), \text{ (mg/l)}, \quad (2)$$

където C_t е концентрацията на разтворен кислород за време t , (mg/l);

p^* – барометричното налягане по време на изпитване, (hPa);

$C_{s,p^*,T}$ – концентрацията на разтворен кислород при насищане, (mg/l);

C_0 – концентрацията на разтворен кислород за време $t = 0$, (mg/l);

$k_L a_T$ – коефициентът на масопренос на кислород при температура на измерването, (h^{-1});

Формула (2) се трансформира в линейна зависимост чрез метода на нелинейна регресия

$$\ln \left(\frac{C_{s,p^*,T} - C_t}{C_{s,p^*,T} - C_0} \right) = k_L a_T \times t \quad (3)$$

Коефициентът на масопренос на кислород $k_L a_T$ се определя от функция (3). Той се преобразува към стандартна температура ($T = 20$ °C) както следва:

$$k_L a_{20} = k_L a_T \times 1,024^{(20-T)} \quad (4)$$

Стойността на кислорода от изпитването при насищане се преобразува към стандартни условия чрез корелационни фактори както следва:

$$C_{s,20} = C_{s,p^*,T} \times \left(\frac{C_{s,St,20}}{C_{s,St,T}} \right) \times \left(\frac{p_{St}}{p^*} \right) = C_{s,p^*,T} \times k_T \times k_p, \text{ (mg/l)}, \quad (5)$$

където k_T е корекционен коефициент на температурата и се изчислява по следната формула:

$$k_T = \left(\frac{C_{s,St,20}}{C_{s,St,T}} \right) = \frac{9,08}{14,57 - 0,3931 \times T + 0,0071 \times T^2 - 0,0000585 \times T^3}; \quad (6)$$

$C_{s,St,20} = 9,08$, (mg/l) – табулираната стойност на разтворен кислород при насищане за температура 20 °C, стандартно налягане ($p_{St} = 1013$ hPa) и 100% влажност на въздуха;

$C_{s,St,T}$ е табулираната стойност на разтворения кислород по време на измерване и съгласно [7], която може да се определи с достатъчна точност по следната формула:

$$C_{s,St,T} = 14,57 - 0,3931 \times T + 0,0071 \times T^2 - 0,0000585 \times T^3, \text{ (mg/l)}; \quad (7)$$

k_p – корекционен коефициент на налягането, който се изчислява по следната формула:

$$k_p = \frac{p_{St}}{p^*}, \text{ (-)}, \quad (8)$$

където $p_{St} = 1013$ hPa е налягането при стандартни условия;

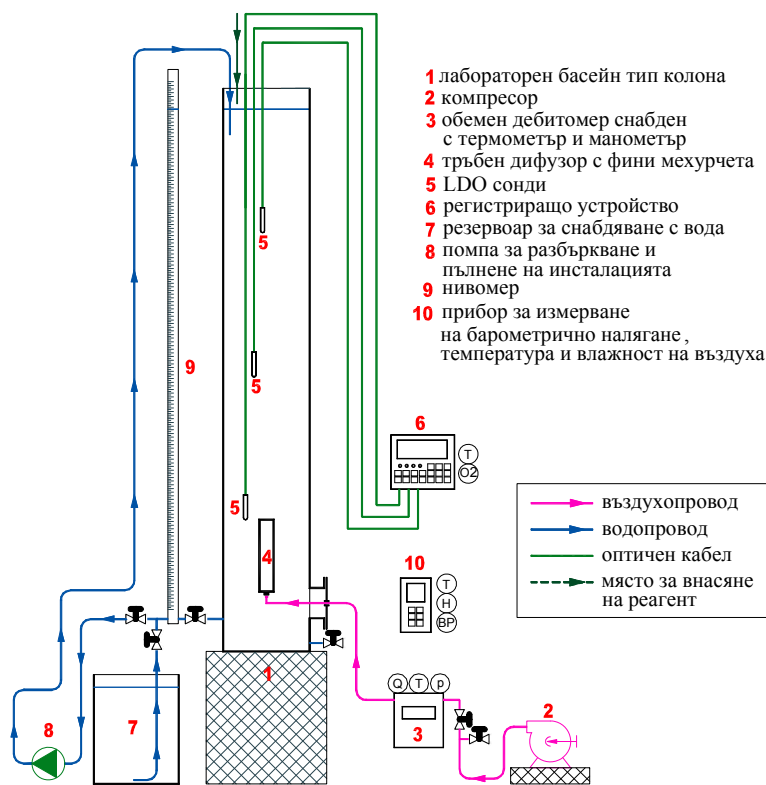
p^* , (hPa) е съответно големината на барометричното налягане в момента на провеждане на измерването.

3. Експериментална инсталация

На фиг. 2 е представена принципна схема на лабораторната инсталация, на която са проведени измерванията.

Инсталацията съдържа следните основни елементи:

- лабораторен басейн тип колона с обем $V = 152$ l;
- въздуходувка (компресор) MAPRO тип CL12/21;
- дебитомер за въздух ITRON тип G6 RF1, снабден с термометър и манометър;
- тръбен дифузор с фини мехурчета OXYFLEX® MS 70 x 500;
- LDO сонди за измерване концентрацията на разтворен кислород – 3 бр. (монтирани на 1 m, 2 m и 3 m под водното ниво, като най – дълбоката сонда се намира в непосредствена близост до аерационната система);
- контролер SC 1000 – за събиране на данни от 3-те LDO сонди;
- съд с обем 80 l – резервоар на инсталацията;
- центробежна помпа – за разбъркване и пълнене на лабораторния басейн тип колона;
- нивомер за височината на водния стълб в колоната;
- прибор Kestrel 4000 – измерване и запис на данни за скорост на вятъра, барометрично налягане, надморска височина, температура и влажност на въздуха.



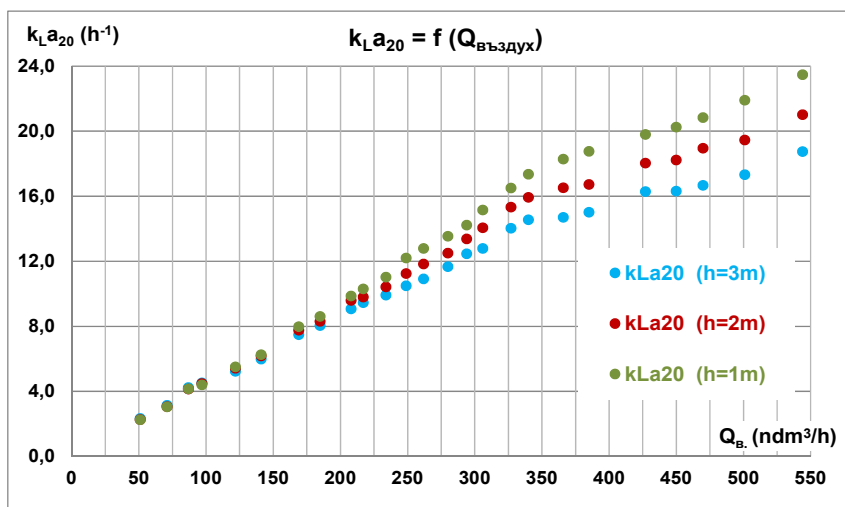
Фиг. 1. Схема на лабораторна инсталация

За измерване на концентрацията на кислород в аерационния басейн тип колона са използвани три LDO кислородни сонди. С помощта на външна LDO кислородна сонда модел HQ40D (калибрирана в лаборатория на производителя) бяха калибрирани трите LDO кислородни сонди, използвани в експеримента.

Количество натриев сулфит (Na_2SO_3), необходимо за понижаване на концентрацията на разтворен кислород, е изчислявано съгласно уравнението на реакцията: $2\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 = 2\text{Na}_2\text{SO}_4$. Стехиометричното количество, необходимо за свързване на 1 mg O_2 е 7,9 mg Na_2SO_3 [3]. При всеки тест количеството Na_2SO_3 е изчислявано в зависимост от обема на водата и концентрацията на разтворен кислород.

4. Резултати от експерименталните изследвания

От проведените експерименти с лабораторна аерационна колона са получени моделните параметри $C_{S,p^*,T}$, k_{LaT} . Границата на насищане ($C_{S,p^*,T}$) е определена след достигането на равновесна концентрация на кислорода за всеки един експеримент. Обемният коефициент на масопенос (k_{LaT}) е изчислен чрез обработване на записаните данни от LDO кислородните сонди по формула (3). За правилното му определяне е използвана областта от записани данни $C = 0,1 \cdot C_{S,p^*,T} \div 0,8 \cdot C_{S,p^*,T}$ [8]. Необходимо условие за правилното провеждане на тази процедура е броят на обработваните данни да бъде по-голям от 30 [3,8]. Събраните данни за $C_{S,p^*,T}$ и k_{LaT} се привеждат към стандартни условия по формули (4) и (5). Корекционните коефициенти на температурата и налягането при привеждане на $C_{S,p^*,T}$ се изчисляват по формули (6) и (8).



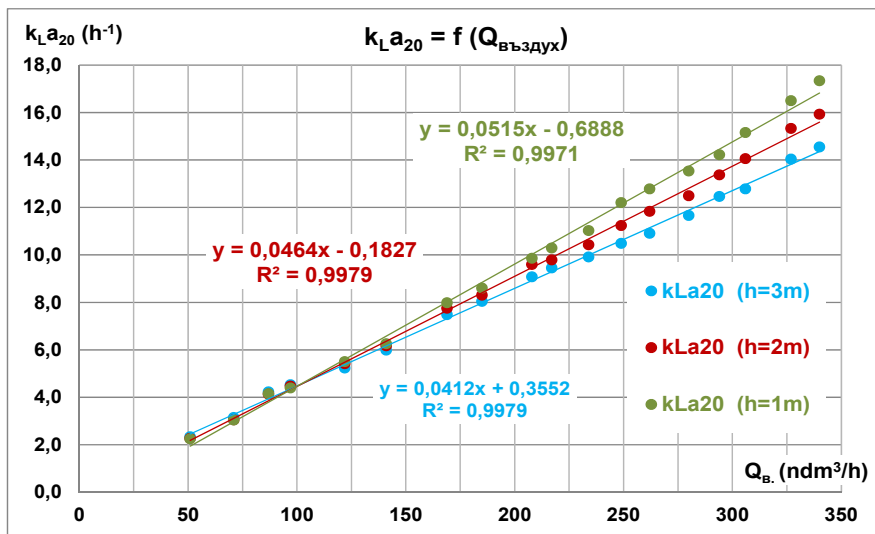
Фиг. 2. Данни от изменението на $k_L a_{20} = f(Q_{\text{въздух}})$ в различните дълбочини

На фиг. 2 е представено изменението на стандартния обемен коефициент на масопенос $k_L a_{20}$ в различните дълбочини на измерване в зависимост от промяната на подаваното количество въздух към аерационната система. От графиката се вижда, че в диапазона от 320÷360 $\text{ndm}^3\text{/h}$ се появява инфлексна точка. Това се обяснява с промяната на режима на движение на въздушните мехурчета, който преминава от хомогенен в хетерогенен, т.е. след тази точка в обема на системата освен малките, започват да се образуват и големи въздушни мехурчета вследствие на коалесценция [9].

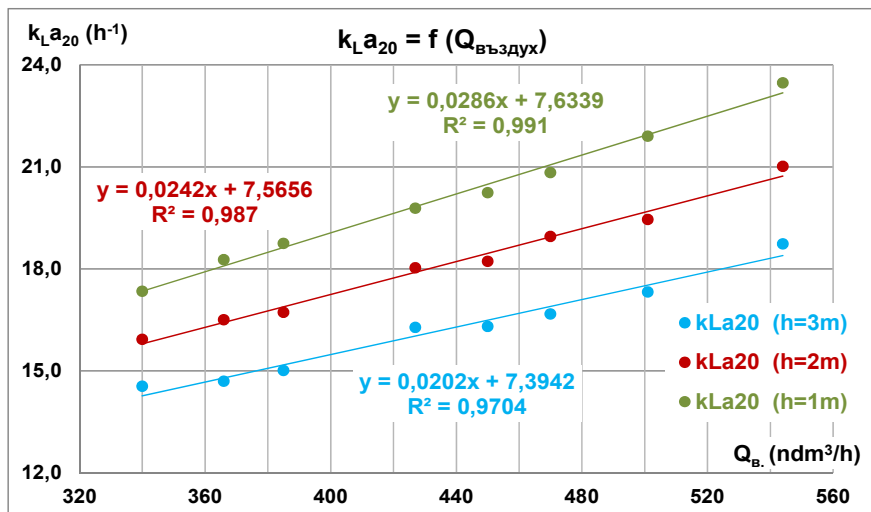
На фиг. 3 и 4 са показани изведените аналитични зависимости за определяне на стандартния обменен коефициент на масопренос $k_L a_{20}$ при различни дълбочини за двете зони. От представените резултати се вижда, че същите добре изравняват експерименталните резултати с много висок коефициент на корелация, като имат ясно изразен линеен характер

$$k_L a_{20} = a Q_{\text{въздух}} + b, \quad (9)$$

където a и b са експериментално получени коефициенти.

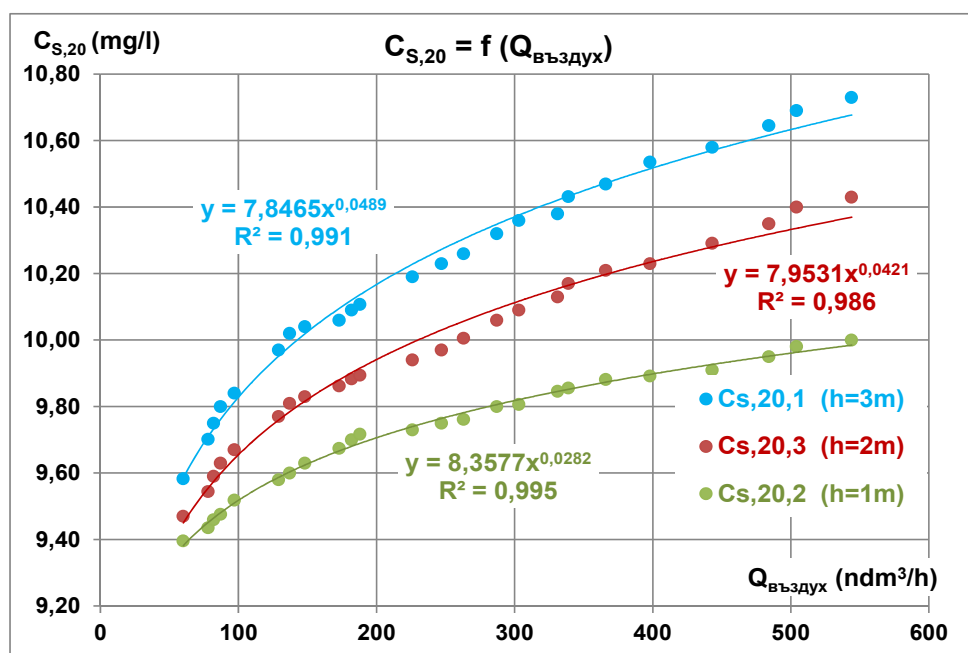


Фиг. 3. $k_L a_{20} = f(Q_{\text{въздух}})$ в диапазона от 0 ÷ 350 ndm³/h



Фиг. 4. $k_L a_{20} = f(Q_{\text{въздух}})$ в диапазона от 320 ÷ 560 ndm³/h

Скоростта на масопренос от въздушните мехурчета включва и някои допълнителни особености. Равновесната концентрация на насищане при този тип аериране не е в пряка зависимост само от температурата и атмосферното налягане, а зависи още от хидростатичното налягане и морфологичния състав на подавания въздух. При възходящо движение на въздушните мехурчета масопреносът на кислород се осъществява от концентрационния градиент, възникващ между газовата фаза и заобикалящата я водна среда. Съдържанието на кислород в едно въздушно мехурче зависи от скоростта на въздушния поток и от изменението на преносния коефициент между двете фази в дълбочина [10]. Тези причини, както и изследванията на различни видове дифузори [10, 11] показват защо при потопените аерационни системи се постигат по-високи равновесни концентрации на насищане с кислород.



Фиг. 5. Данни от изменението на $C_{S,20} = f(Q_{\text{въздух}})$ в различните дълбочини

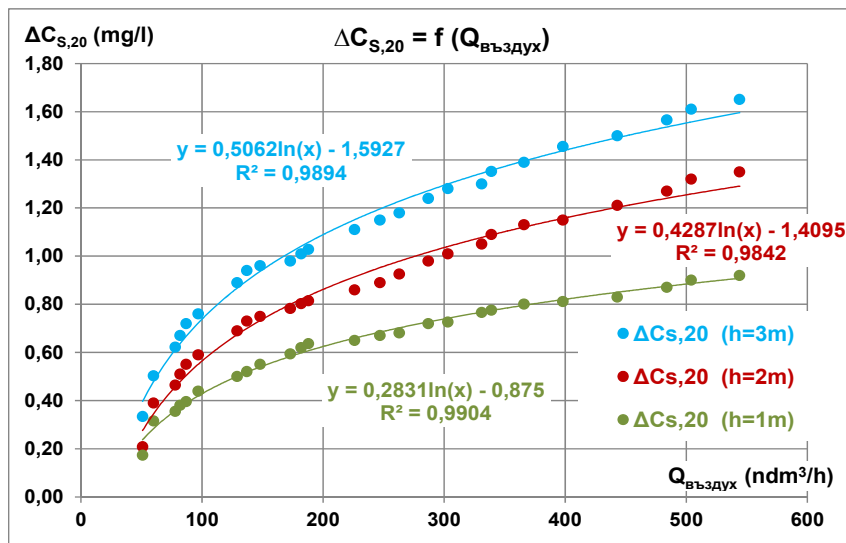
На фиг. 5 са показани изведените аналитични зависимости за определяне на стандартната граница на насищане $C_{S,20}$ за различните дълбочини в зависимост от промяната на подаденото количество въздух към аерационната система както следва:

$$C_{S,20} = c(Q_{\text{въздух}})^d, \quad (10)$$

където $Q_{\text{въздух}}$ е подаденото количество въздух в (ndm³/h);

c и d са коефициенти, получени по експериментален начин.

От графиката се вижда, че получените зависимости описват експерименталните резултати с много висок коефициент на корелация.



Фиг. 6. Данни от изменението на $\Delta C_{S,20} = f(Q_{\text{въздух}})$ в различните дълбочини

На фиг. 6 са представени резултатите за изменение на стандартната концентрация на разтворен кислород $\Delta C_{S,20}$ в зависимост от подаденото количество въздух и дълбочината, получено от следния математически израз:

$$\Delta C_{S,20} = C_{S,20,Zi} - C_{S,St,20}, \text{ (mg/l)}, \quad (11)$$

където $C_{S,20,Zi}$ (mg/l) е изчислената стандартна концентрация на разтворения кислород при съответно подадено количество въздух и дълбочина на измерване;

$C_{S,St,20} = 9,08$, (mg/l) – табулираната стойност на разтворен кислород при насищане за температура 20°C, стандартно налягане ($p_{st} = 1013$ hPa) и 100% влажност на въздуха.

Резултатите на фиг. 6 показват, че стандартната граница на насищане $C_{S,20}$ може да се изрази със следната аналитична зависимост:

$$C_{S,20} = C_{S,St,20} + e \cdot \ln(Q_{\text{въздух}}) + f, \quad (12)$$

където $Q_{\text{въздух}}$ е подаденото количество въздух в (ndm³/h);
 e и f са експериментално получени коефициенти.

Вижда се, че получените логаритмични зависимости описват експерименталните данни с коефициент на корелация.

5. Заключение

1. С цел оперативно определяне на моделните параметри на масопренос на кислород е извършено изследване на влиянието на дълбочината и количеството на подавания въздух в специално конструиран лабораторен реактор, тип колона.

2. Установена е връзка между моделните параметри $k_L a_{20}$ и $C_{s,20}$, дълбочината на водния слой и количеството на подавания въздух към дифузорите.
3. Получена е аналитична зависимост за стандартния коефициент на обмен масопренос на кислород в два режима на движение на въздушните мехурчета.
4. Установена е аналитична зависимост за определяне на стандартната граница на насищане $C_{s,20}$ в зависимост от количеството подаден въздух и дълбочината.
5. Необходимо е провеждане на допълнителни изследвания с цел отчитане влиянието на особеностите на ареционните устройства върху получените коефициенти.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Marcos von Sperling*. Basic principles of wastewater treatment. Biological wastewater treatment series, Vol.2, IWA Publishing, 2007.
2. *A. Kapic, T. J. Heindel*. Correlating gas-liquid mass transfer in a stirred-tank reactor. *Chem. Eng. Res. and Des.* 84, A3, 239 -245, 2006.
3. БДС EN 12255-15 Пречиствателни станции за отпадъчни води част 15: Измерване на количеството кислород в чиста вода в аерационни биобасейни на биологични съоръжения, 2004.
4. *B. Gourich, Ch. Vial, N. El Azher, M. Belhaj Soulam, M. Ziyad Chern*, Influence of hydrodynamics and probe response on oxygen mass transfer measurements in a high aspect ratio bubble column reactor: Effect of the coalescence behavior of the liquid phase. *Bioch. Eng. Jour.* 39, 1–14, 2008.
5. *W.-D. Deckwer*, Bubble column reactors. *J.Wiley&Sons, Chichester, UK, 1992*.
6. *N. Kontarci, E. Borak, K. Ulgen*. Bubble column reactors. *Process Biochemistry*, 40, 2263-2283, 2005.
7. *American Society of Civil Engineering Committee of Sanitary Engineering Research*. Solubility of atmospheric oxygen in water. *J. Sanitary Eng. Div.* 86(7): 41–53 1960.
8. *Zh. He, An. Petiraksakul, W. Meesapya*. Oxygen-Transfer Measurement in Clean Water. *The Jour. of KMITNB*. Vol. 13, Jan–Mar 2003.
9. *R. Krishna, J. M. van Baten*. Mass transfer in bubble columns. *Catalysis Today* 79-80, 67-75, 2003.
10. *C. DeMoyera, Er. Schierholza, J. Gullivera, St. Wilhelmsb*. Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems. *Water Research*, 37, 1890–1904 2003.
11. *J. A. Mueller, W. C. Boyle, H. J. Popel*. Aeration: Principles and Practice. *Water Quality Management Library, CRC PRESS, 2004*.

EVALUATION OF MODEL OXYGEN MASS TRANSFER COEFFICIENTS IN LABORATORY BUBBLE COLUMN

D. Alitchkov¹, S. Dimitrova², B. Indzhov³

Keywords: *bubble column, oxygen mass transfer, standard oxygen mass transfer coefficient, standard saturation concentration*

Research area: *water treatment*

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the influence of the aeration system submergence depth and the supplied air quantity on the oxygen mass transfer coefficients. The experiments are carried out in a laboratory bubble column. Dissolved oxygen concentration is measured at three different column depths (1 m, 2 m, 3 m). The experimental air flow is in the range of 50 ndm³/h to 550 ndm³/h. Analytical relationships are derived for the model parameters standard oxygen mass transfer coefficient ($k_L a_{20}$) and standard saturation concentration ($C_{S,20}$).

¹ Dimiter Alitchkov, Assoc. Prof. Dr. Dipl. Eng., Dpt. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: d.alitchkov@aquains.com

² Sonya Dimitrova, Assoc. Prof. Dr. Dipl. Eng., Dpt. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: son_fhe@uacg.bg

³ Borislav Indzhov, Asst. Dipl. Eng., Dpt. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: bindjov4525@abv.bg