

*Проведено аналітичні дослідження ефективності очистки стічних вод в умовах діючого підприємства КП «Чернігівводоканал» (Україна) в залежності від погодних умов. Розроблено математичні моделі ефективності роботи станції біологічної очистки залежно від температури повітря, величини опадів, наявності танення снігу. Врахування метеопрогнозу і отриманих залежностей сприятиме реалізації оперативних дій, що забезпечують якість очищення стічних вод*

*Ключові слова: стічні води, ефективність очищення, температура, біологічне споживання кисню, біоценоз*

*Проведены аналитические исследования эффективности очистки сточных вод в условиях действующего предприятия КП «Черниговводоканал» (Украина) в зависимости от погодных условий. Разработаны математические модели эффективности работы станции биологической очистки в зависимости от температуры воздуха, величины осадков, наличия таяния снега. Использование метеопрогноза и установленных зависимостей будет способствовать реализации оперативных действий, обеспечивающих качество сточных вод*

*Ключевые слова: сточные воды, эффективность очистки, температура, биологическое потребление кислорода, биоценоз*

УДК 681.3.07:644.65

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26307

# МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СТАНЦІЇ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

**О. О. Шевченко**  
Здобувач\*

**В. А. Крупко**  
Аспірант\*

**Л. М. Клінцов**  
Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра економічної кібернетики та інформатики\*\*

**І. М. Іванова**  
Доктор технічних наук, професор\*

\*Кафедра водопостачання та водовідведення\*\*

\*\*Чернігівський національний технологічний університет  
вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, Україна, 14027

## 1. Вступ

Захист від забруднення водних об'єктів має для України дуже важливе значення. Основним джерелом забруднення водойм, що призводить до погіршення якості води і порушення нормальних умов життєдіяльності гідробіонтів, є скиди недостатньо очищених стічних вод. Україна потерпає від того, що практично 100 % діючих спеціалізованих каналізаційно-очисних споруд (КОС) не забезпечують необхідний рівень очищення за окремими компонентами [1]. Пропонується [2] для вирішення цієї проблеми запровадження технологій доочищення стоків, але об'єм доочищуваних стоків поки що не перевищує 1–6 % в окремих регіонах.

Станціям біологічного очищення приділяється значна увага, вони мають не тільки певні переваги (економічні, екологічні), але і недоліки, до яких відноситься нестабільність очищення стічних вод та необхідність утилізації осаду, який утворюється після очищення стічних вод активним мулом. Для утилізації осаду відпрацьовуються такі шляхи [3, 4] як використання його в якості будівельного матеріалу, як наповнювача та зв'язуючого елементу асфальту (після термічної обробки осаду), як добрива. Щодо поліпшення стабільності очищення стічних вод, то цей показник залежить від життєдіяльності активного мулу [5, 6], а також від існування зовнішніх причин для КОС, які

впливають на якість процесу очищення стічних вод. Так, порушення існуючих правил (наприклад, залпові скиди токсичних речовин) здатні зруйнувати усю систему очищення, тому необхідною умовою ефективного функціонування КОС є впровадження соціальної відповідальності в усіх користувачів [7]. Склад забрудників та динаміку зміни їх концентрації і статистичний розподіл приведено в [8], що доводить залежність якості очищення від значної кількості чинників, а зміна складу стічних вод внаслідок зміни соціально-економічних умов у регіоні потребує своєчасного фінансування для реконструкції КОС чи впровадження нових технологій і обладнання.

## 2. Аналіз сучасних досліджень і публікацій

У сучасних публікаціях проводиться обговорення шляхів поліпшення процесу очищення стічних вод на станціях біологічного очищення [9–13]. Приділяється увага недостатній ефективності роботи каналізаційних очисних споруд щодо очищення від сполук азоту, і для інтенсифікації роботи аеротенка пропонується внесення змін у його конструкцію, поділ на зони з пріоритетними процесами – або процесами денітрифікації або нітрифікації, побудована математична модель, яка може бути застосована при проектуванні нових конструкцій аеротенків [9].

Пропонується також в якості альтернативного методу анаеробне очищення стічних вод на початковій стадії, яке б передувало їх аеробному очищенню [10]. Інші автори [11] пропонують реагентну обробку біологічно очищених стічних вод.

Зрозуміло, що вдосконалення конструкцій та технологій затримується економічними факторами, в той же час без значних витрат існує можливість інтенсифікації процесу очищення стічних вод за рахунок мікроорганізмів (активного мулу) в аеротенку, зокрема, виявлена роль ANAMMOX-бактерій у перетворенні нітритів і амонійного азоту у молекулярний азот [12, 13]. Вважаємо, що недостатньо враховуються метеороумови під час очищення стічних вод, нами не виявлено в літературних джерелах даних відносно одночасного впливу концентрацій органічних забрудників зі зміною метеорологічних умов на ефективність роботи КОС за тривалий період часу.

Існують дані про вплив окремих показників на біологічне очищення стічних вод – температура, біомаса активного мулу та інше [14–19]. Температура стічних вод зазвичай приймається залежно від середньорічної температури повітря [14] і є важливим технологічним параметром біологічних процесів очищення, тому що від неї залежать швидкість біохімічних реакцій і розчинність у воді кисню, необхідного для життєдіяльності мікроорганізмів. Регулювання технологічних параметрів дозволяє зменшити тривалість і підвищити ефективність очищення стічних вод. У процесі біологічного очищення стічних вод у залежності від зміни температурних умов навколишнього середовища відбувається зміна біоценозу. Більшість очисних споруд аеробного типу працюють під відкритим небом і не передбачають системи регулювання температури. У залежності від кліматичних умов і пори року температура стічних вод, що очищуються біологічно, може коливатися від 2–5 до 25–35 °С. Влітку і ранньою осінню, коли температура стічних вод не нижче 15 °С, розвиваються переважно мезофільні і деякі термофільні мікроорганізми; пізньою осінню, узимку і навесні переважають психрофільні форми [15].

Управління процесом очищення передбачає насичення стічних вод повітрям, зміна основних компонентів біологічної системи в процесі керування представлена на рис. 1, а. Якість процесу залежить також від навантаження за біохімічним споживанням кисню (БСК), седиментаційні властивості мулу представлені на рис. 1, б [15].

Підвищення температури за межі фізіологічної норми мікроорганізмів приводить до їхньої загибелі, у той час як зниження температури викликає лише зниження фізіологічної норми активності мікроорганізмів. Повільна зміна температур у межах фізіологічної норми не робить істотного негативного впливу на мікроорганізми, однак різкі коливання температури несприятливо впливають на їхню життєдіяльність. При низьких температурах знижується швидкість процесу біологічного очищення, зменшується глибина очищення, погіршується процес нітрифікації і флокуляції мікроорганізмів, що, у свою чергу, призводить до збільшення кількості мікроорганізмів, які виносяться зі стічними водами із вторинних відстійників. Для інтенсифікації роботи очисних споруд в зимовий час необхідно підвищити концентрацію активного мулу

в стічних водах, а також збільшити час перебування стічних вод у системі очищення.

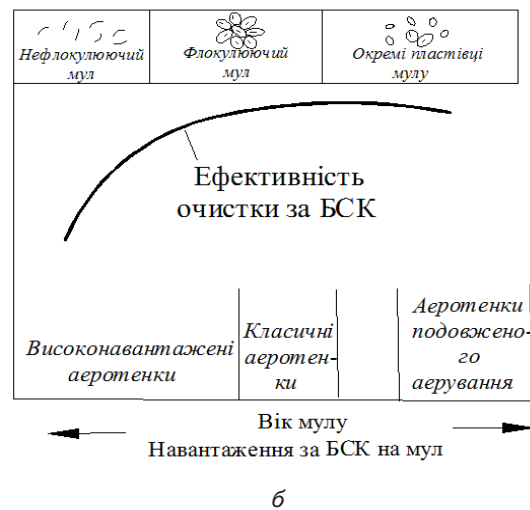
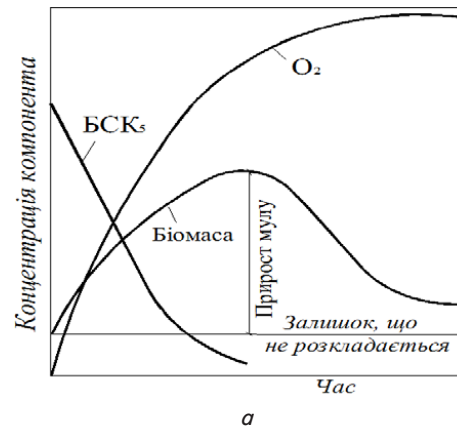


Рис. 1. Взаємозв'язок основних параметрів процесу біологічного окислення: а – зміна основних компонентів біологічної системи в процесі аерування; б – вплив навантаження на седиментаційні властивості мулу [15]

Зміна температури води викликає зміну розчинності кисню у воді. У теплий час року, коли фізіологічна активність мікроорганізмів підсилюється, розчинність кисню знижується; у зимовий період спостерігається протилежна картина. У зв'язку з цим для підтримки досить високої ефективності біологічного очищення в теплий час року необхідно робити більш інтенсивну аерацію, а в зимовий – високу концентрацію мікроорганізмів у зворотному мулі, а також збільшувати тривалість аераційного періоду. Підвищення концентрації кисню у воді в зимовий період до 5 мг/л більш активує обмінні процеси в клітинах.

Середня температура стічних вод у містах України в холодну пору року коливається в межах 15–17 °С, температура вод у невеликих і середніх селищах 9–14 °С. У аеротенках із звичайним режимом аерації при температурі повітря – 10–20 °С, температура стоків за час обробки падає на 1–3 °С, в аеротенках з продовженим режимом аерації, з перекриттям з щитів, на 4–9 °С, що призводить до уповільнення або повного припинення процесу біохімічної очистки стічних вод [16].

Процес нітрифікації, який відбувається в аеротенках, здійснюється в результаті життєдіяльності та функціональної активності нітрифікуючих бактерій, які відносяться до хемосинтезуючих автотрофів; присутність в середовищі органічних сполук згубно відбивається на їхньому розвитку, тому нітрифікація амонійного азоту починається в аеротенках тільки після практично повного окислення сполук вуглецю, які характеризуються показником БСК [17].

Процеси нітрифікації залежать від температури стічної рідини. При температурі +9 °С знижується швидкість нітрифікації (8 °С – мінімально допустима); при температурі +6 °С процес припиняється повністю, при температурі понад +37 °С швидкість нітрифікації також знижується у зв'язку зі зменшенням у воді розчиненого кисню. У діапазоні температур від 15 до 35 °С нітрифікація задовільна і її інтенсивність наростає з підвищенням температури [17]. Моделюванню процесу очищення стічних вод приділяється значна увага [9, 18], але існуючі моделі недостатньо охоплюють різноманітні чинники, що впливають на якість біологічного очищення стічних вод. Тому було проведено дослідження з отримання математичних моделей, що дозволять прогнозувати ефективність роботи очисної станції в різні пори року, своєчасно використовувати персоналом технічні можливості управління процесом для підвищення якості стічних вод.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є моделювання ефективності роботи каналізаційно-очисної станції біологічного очищення для різних періодів року залежно від забрудненості стічної води і метеумов.

Для досягнення поставленої мети обрано наступні задачі:

- дослідити кореляцію між показником біохімічного сподивання кисню за п'ять діб (БСК<sub>5</sub>) на вході і виході станції біологічного очищення стічних вод в різні періоди року – зима, весна, літо, осінь з урахуванням метеумов у періоді, що розглядається (наявність дощових опадів, танення снігу, температуру повітря);

- побудувати математичні моделі ефективності роботи КОС, що будуть враховувати розглянуті параметри.

### 4. Результати математичного моделювання ефективності роботи станції біологічного очищення стічних вод та їх

Дослідження кореляції між БСК<sub>5</sub> на вході і виході станції біологічного очищення стічних вод в різні періоди року проведено з використанням коефіцієнта ефективності очищення (K<sub>e</sub>):

$$K_e = \frac{БСК_{5a}}{БСК_{5b}}, \tag{1}$$

де БСК<sub>5a</sub> – фактичні дані вхідної стічної води, БСК<sub>5b</sub> – фактичні дані очищеної стічної води на виході з очисної станції.

Вплив погодних умов на ефективність роботи КОС за результатами вимірювань показника стічної води

біохімічного споживання кисню (БСК<sub>5</sub>) на вході і виході з очисних споруд проаналізовано на основі даних роботи протягом 18 місяців КП «Чернігівводоканал» [7]. Для аналізу впливу погодних умов використовувався архів погоди у м. Чернігові.

Використані дані та розрахований за цими даними коефіцієнт ефективності очищення представлено у табл. 1–4. В цих же таблицях представлена інформація про виявлені метеумови у періоді, що розглядається – наявність дощових опадів, танення снігу, температура повітря, що використано для побудови математичних моделей ефективності роботи КОС у заданих умовах (Кер).

Таблиця 1

Теоретичні і фактичні показники ефективності очищення стічних вод (зимовий період)

Дата	БСК <sub>5a</sub>	БСК <sub>5b</sub>	K <sub>e</sub>	t, °C	T <sub>д</sub>	T <sub>с</sub>	K <sub>ер</sub>
05.01.2011	328	10,4	31,53846	-7,4			28,40646
12.01.2011	280	10,24	27,34375	0,5	2	2	29,43911
19.01.2011	224	11,84	18,91892	-0,5			12,42374
02.02.2011	368	16,96	21,69811	-4			29,18404
09.02.2011	288	12,48	23,07692	-6			23,37139
16.02.2011	280	9,92	28,22581	-9,5			25,71715
07.12.2011	230	22,8	10,08772	2,2		6	11,47976
14.12.2011	492	13,92	35,34483	5		6	33,84234
21.12.2011	584	9,68	60,33058	1,2	2	6	58,23522

Таблиця 2

Теоретичні і фактичні показники ефективності очищення стічних вод (весняний період)

Дата	БСК <sub>5a</sub>	БСК <sub>5b</sub>	K <sub>e</sub>	t, °C	T <sub>д</sub>	T <sub>с</sub>	K <sub>ер</sub>
02.03.2011	272	9,92	27,41935	-2,3			26,0476
09.03.2011	264	9,6	27,5	0,7			25,8668
16.03.2011	208	9,6	21,66667	2,7			22,32633
06.04.2011	320	9,6	33,33333	13,8			31,21521
13.04.2011	336	10,56	31,81818	10,4			31,8881
20.04.2011	280	9,92	28,22581	10,9			28,16804
04.05.2011	296	10,88	27,20588	13,8	3		31,19423
11.05.2011	392	10,88	36,02941	22,4			37,10481
18.05.2011	384	10,88	35,29412	23			36,63666
14.03.2012	490	11,8	41,52542	3,3			41,43283
21.03.2012	590	11,2	52,67857	9,4	7		52,64407
04.04.2012	750	13,2	56,81818	1,5			58,76701
11.04.2012	410	11,2	36,60714	8,5			36,65553
18.04.2012	590	11,6	50,86207	7,3	4		50,79364
03.05.2012	580	11,2	51,78571	26			50,22562
16.05.2012	529	10,4	50,86538	18,6	4		48,02917

Таблиця 3

Теоретичні і фактичні показники ефективності очищення стічних вод (літній період)

Дата	БСК <sub>5а</sub>	БСК <sub>5в</sub>	K <sub>e</sub>	t <sub>оС</sub>	T <sub>д</sub>	T <sub>с</sub>	K <sub>ep</sub>
01.06.2011	324	10,56	30,68182	30			28,52474
08.06.2011	248	9,92	25,0	28	1		23,49237
15.06.2011	248	9,93	25,17613	26			27,93795
06.07.2011	344	9,92	34,67742	19,6			38,43473
13.07.2011	400	10,88	36,76471	25,2			36,60754
20.07.2011	296	9,28	31,89655	19	2		30,93936
03.08.2011	312	9,28	33,62069	20,8			35,73083
10.08.2011	360	10,24	35,15625	24			35,52758
17.08.2011	240	9,6	25,0	18	4		23,3643
06.06.2012	410	10	41,0	19,7	1		39,07613
13.06.2012	600	11,6	51,72414	17	1		51,36122
20.06.2012	540	9,4	57,44681	23			45,83904
04.07.2012	580	15,04	38,56383	28,2			43,51172
11.07.2012	621	13,8	45,0	26			47,54042
18.07.2012	466	14,16	32,9096	20	2		39,02164

Таблиця 4

Теоретичні і фактичні показники ефективності очищення стічних вод (осінній період)

Дата	БСК <sub>5а</sub>	БСК <sub>5в</sub>	K <sub>e</sub>	t <sub>оС</sub>	T <sub>д</sub>	T <sub>с</sub>	K <sub>ep</sub>
05.10.2011	382	26,16	14,60245	20			14,41249
12.10.2011	322	13,4	24,02985	12	4		14,73179
19.10.2011	181	13,8	13,11594	8,7			15,32529
02.11.2011	230	12,48	18,42949	7,4			15,1438
09.11.2011	240	12	20	3,7	2		15,14151
16.11.2011	395	27,92	14,14756	0,1			14,56223

Розрахунковий коефіцієнт ефективності очищення (K<sub>ep</sub>) визначено за допомогою програми лінійного пакету Microsoft Excel 7.0, яка працює за методом найменших квадратів. Математичну модель, яка описує ефективність біологічного очищення стічних вод на КОС залежно від пори року, здійснено у наступному вигляді:

$$K_{ep} = A_0 + A_1 \cdot \text{БСК}_{5a} + A_2 \cdot t^{\circ\text{C}} + A_3 \cdot T_d + A_4 \cdot T_c, \quad (2)$$

де t – температура повітря, °C; T<sub>д</sub> – кількість періодів по три години, за які зафіксовано проливні дощі; T<sub>с</sub> – кількість періодів по три години плюсової температури протягом доби; A<sub>0</sub>...A<sub>4</sub> – коефіцієнти рівняння.

Для коефіцієнта ефективності очищення K<sub>ep</sub> (з індексом з-зима, в-весна, л-літо, о-осінь) отримано математичні моделі для моделювання ефективності роботи КОС у кожному періоді року:

$$K_{ep}^{(з)} = -9,26224 + 0,094833 \text{БСК}_{5a} - 0,88698t + 6,148887 T_d - 0,146978 T_c,$$

$$K_{ep}^{(в)} = 7,963296 + 0,067499 \text{БСК}_{5a} + 0,119731t + 0,532999 T_d,$$

$$K_{ep}^{(л)} = 37,05196 + 0,052554 \text{БСК}_{5a} - 0,85182t - 2,74194 T_d,$$

$$K_{ep}^{(о)} = 16,13232 - 0,00397 \text{БСК}_{5a} - 0,01011t + 2,345029 T_d.$$

Якість отриманих моделей оцінювалась за допомогою коефіцієнта детермінації d. Найкращі коефіцієнти детермінації становили для зимового періоду d=0,92, для весняного періоду d=0,98, для літнього періоду d=0,80, а для осіннього періоду d=0,82.

На рис. 2 приведено графіки кінетики зміни K<sub>e</sub> та K<sub>ep</sub> протягом умовного періода (тривалість одного періоду дорівнює десять діб). Як видно з наведеного графіка, коефіцієнт ефективності очищення є нестабільним, змінювався в окремі періоди від 10 до 60 одиниць.

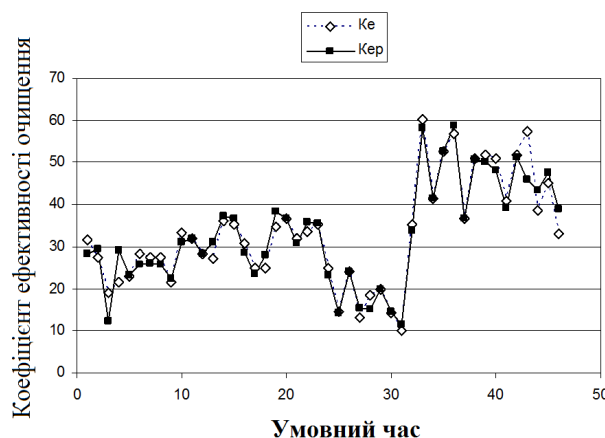


Рис. 2. Графіки кінетики зміни показників Ke та Kep

Розроблені математичні моделі доводять, що такі досліджені параметри, як температура повітря, величина опадів, наявність танення снігу впливають на ефективність роботи каналізаційно-очисної станції, а врахування метеопрогнозу та отриманих залежностей дозволяє своєчасно здійснювати оперативні дії, що забезпечують якість процесу очищення стічних вод і доведення їх показників до вимог нормативних документів.

## 5. Висновки

1. Розглянуто показник ефективності очищення стічних вод в реальних умовах як відношення показників БСК<sub>5</sub> на вході і виході очисної станції, за допомогою якого встановлено, що у розглянутому періоді коефіцієнт ефективності роботи КОС виявляв нестабільність, змінювався від 10 до 60 одиниць.

2. Отримано математичні моделі ефективності роботи КОС з урахуванням температури повітря, дощових опадів та танення снігу для різних періодів року. Врахування метеопрогнозу на основі отриманих залежностей сприятиме плануванню оперативних дій персоналу очисної станції з поліпшення процесу та підвищенню якості очищених стічних вод.

## Література

1. Щетинин, А. И. Опыт реконструкции очистных сооружений с применением технологии нитро-денитрификации [Текст] / А. И. Щетинин, Ю. М. Мешенгиссер, М. А. Есин, Б. Ю. Малбиев, А. А. Реготун // Водопостачання та водовідведення. – 2011. – № 3. – С. 41–49.
2. Гіроль, А. М. Проблема доочищення стічних вод в Україні та шляхи її вирішення [Текст] : XIV міжнар. наук.-практ. конф. / А. М. Гіроль // Екологія. Людина. Суспільство. – Київ: Національний технологічний університет України «КПІ», 2011. – С. 44–45.
3. Крупко, В. А. Шляхи мінімізації забруднення довкілля [Текст] : IX Міжн. наук.-практ. конф. / В. А. Крупко // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування – Європейський досвід. – ЧДІЕУ. – 2013. – № 9. – С. 128–130.
4. Bottril, P. Minimizing the sludge disposal problem [Text] / P. Bottril // Water and Waste treat. – 1997. – Vol. 40, Issue 9. – P. 26.
5. EN 12255-6 [Text] / Wastewater treatment plants – Part 6: Activated sludge process, 2002. – 14 p.
6. Eikelboom, D. H. Process Control of Activated Sludge Plants by Microscopic Investigation [Text] / D. H. Eikelboom. – London: IWA Publishing, 2000. – 156 p.
7. ISO 26000: 2010 [Text] / Guidance on Social Responsibility (Настанова з соціальної відповідальності), 2010.
8. Шатохіна, Ю. В. Якість процесу очищення стічних вод як функція складу вхідного потоку [Текст] / Ю. В. Шатохіна, Л. М. Клінцов, О. М. Шкінь, Н. С. Мазюк // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2013. – Т. 1, № 1 (9). – С. 36–38.
9. Грицина, О. О. Підвищення ефективності роботи аеротенків для глибокої очистки міських стічних вод від сполук азоту [Текст] : XIV міжнар. наук.-практ. конф. / О. О. Грицина // Екологія. Людина. Суспільство. – Київ: Національний технологічний університет України «КПІ», 2011. – С. 50–51.
10. Бляшина, М. В. Анаеробне очищення стічних вод на першій стадії біологічної очистки [Текст] : міжнар. наук.-практ. конф. / М. В. Бляшина, Л. А. Саблій // Екологія. Людина. Суспільство. – Київ: Національний технологічний університет України «КПІ», 2011. – С. 33–34.
11. Терновська, О. І. Дослідження процесів доочищення міських стічних вод [Текст] / О. І. Терновська, І. М. Еріна // Екологічна безпека та техногенна безпека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов. Сб. научн. трудов ВОДГЕО. – Харьков, ИПП «Контраст», 2012. – С. 134–139.
12. Михайловская, М. В. АНАМОКС – как метод удаления соединений азота из сточных вод и перспективы его применения в Украине [Текст] / М. В. Михайловская // Химия и технология воды. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 675–683.
13. Михайловська, М. В. Порівняльний аналіз біологічного очищення стічних вод від сполук азоту [Текст] / М. В. Михайловська, П. І. Гвоздяк // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2007. – № 2. – С. 109–117.
14. Температура и состав сточных вод [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://domremstroy.ru/da/kanalizacia06.html>
15. Яковлев, С. В. Очистка производственных сточных вод [Текст]: уч. пос. / С. В. Яковлев, А. Я. Карелин, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронин. – М.: Стройиздат, 1985. – 162 с.
16. Аэробные процессы биохимической очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://libertydoc.net/books/-mikrobiologicheskoe\\_proizvodstvo\\_bav.t.6\\_\\_2.aerobnye\\_processy\\_biokhimicheskoi\\_ochistkistochnyh\\_vod](http://libertydoc.net/books/-mikrobiologicheskoe_proizvodstvo_bav.t.6__2.aerobnye_processy_biokhimicheskoi_ochistkistochnyh_vod)
17. Теория и расчет комбинированных сооружений биологической очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.mediana-eco.ru/information/stoki\\_biological/calculation](http://www.mediana-eco.ru/information/stoki_biological/calculation)
18. Жмур, Н. С. Управление процессом и контроль результата очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками [Текст] / Н. С. Жмур. – М.: Луч, 1997. – 118 с.
19. Drolka, M. The Results of Mathematical Model and Pilot Plant Research of Wastewater Treatment, Model and Wastewater Treatment [Text] / M. Drolka et al. // Chem. Biochem. Eng. Q. – 2001. – Vol. 15, Issue 2. – P. 71–74.