

УДК 628.35

АНАЛИЗ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. П. Созник, С. А. Горносталь

Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков

На основе предложенной математической модели на примере Диканевских очистных сооружений г. Харькова рассмотрены возможности улучшения качества биологической очистки сточных вод в аэротенках. Показано, что при реализации системы очистки в виде аэротенк-вытеснитель можно уменьшить концентрацию загрязнений, сбрасываемых в природные водоемы, приблизительно в 20 раз и повысить экологическую безопасность очистных сооружений.

Ключевые слова: аэротенк, биологическая очистка, математическая модель, экологическая безопасность.

Введение. По данным исследований Института географии НАН Украины (г. Киев) и Украинского государственного НИИ ВОДГЕО (г. Харьков) в Харьковской области более 50% сбросов сточных вод в водные объекты составляют сбросы без очистки. Одной из причин таких сбросов является то, что традиционные технологии биологической очистки сточных вод имеют ряд недостатков. Учитывая масштабы сооружений очистки, наиболее перспективным с экономической точки зрения является путь улучшения качества очистки. Поэтому необходимо иметь адекватные математические модели процессов биологической очистки. Это позволит предложить рекомендации по предотвращению чрезвычайных экологических ситуаций, связанных со сбросом в водоемы очищенных вод, с концентрацией загрязнений превышающей предельно допустимые значения, и улучшить состояние окружающей среды и защиты водоемов от загрязнений.

Метод биологической очистки сточных вод широко используется на очистных сооружениях. Процесс очистки осуществляется в аэротенках различного типа: идеального вытеснения, идеального смешивания и промежуточного типа. Работа аэротенков основана на способности микроорганизмов извлекать органические загрязнения из сточных вод в процессе своей жизнедеятельности. Большое разнообразие микроорганизмов в активном иле, которое меняется с течением времени, и существование различных типов их взаимодействия между собой [1] обуславливает многофакторность и существенную сложность описания процессов биологической очистки в аэротенках. С этой целью используют математическое моделирование явлений взаимодействия микроорганизмов активного ила между собой и с субстратом, поступающим со сточными водами. Основным аппаратом всех детерминированных моделей являются системы дифференциальных уравнений первого порядка различной степени сложности. Основные идеи таких уравнений были предложены для описания биологических популяций и обобщены для системы жертва-хищник А.Н. Колмогоровым [2]. Существенным моментом таких теорий является наличие трофической функции, которая описывает функциональный отклик хищника на жертву. При использовании различных модельных представлений для трофической функции возникает проблема устойчивости биологических сообществ [2, 3].

Такой теоретический подход нашел широкое применение [4-7] для моделирования процессов биологической очистки сточных вод активным илом. Созданные на этом пути модели в той или иной степени удовлетворительно описывают явления очистки в идеальных аэротенках [4].

Постановка задачи и ее решение. На комплексе биологической очистки «Диканевский» (КБOD, г. Харьков) очистка сточных вод осуществляется на аэротенках промежуточного типа (рис. 1).

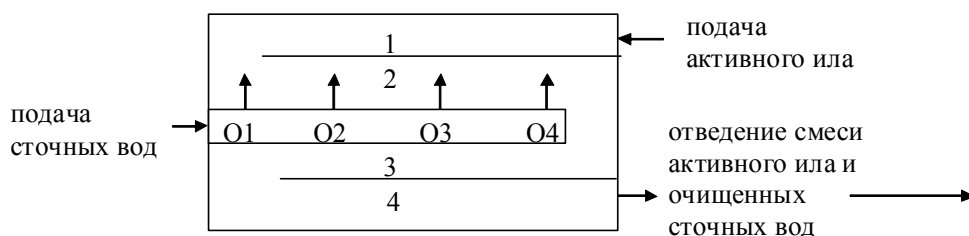


Рис. 1. Схема сечения четырехкоридорного аэротенка с расположением окон, через которые подается сточная жидкость в секцию: O1 – первое окно, O2 – второе окно, O3 – третье окно, O4 – четвертое окно; 1 – регенератор (первый коридор), 2 – второй коридор, 3 – третий коридор, 4 – четвертый коридор аэротенка.

Сточные воды подаются рассредоточено по всей длине второго коридора через четыре подающих окна, с возможностью регулирования их подачи с помощью шибберных заслонок, а активный ил подается в первый коридор аэротенка на регенерацию.

В процессе очистки для предотвращения седиментации активного ила и обеспечения микроорганизмов кислородом в достаточном количестве осуществляется интенсивная аэрация по всей длине аэротенка. В 1-м и 2-м коридорах интенсивность аэрации приблизительно в два раза больше, чем в коридорах 3 и 4. Сооружения построены в 70-80-х годах, поэтому в настоящее время при реконструкции отдельных секций возникает вопрос о влиянии расположения и количества точек впуска сточных вод на качество очистки. Чтобы решить этот вопрос необходимо иметь математическую модель, с помощью которой можно описать процессы, происходящие в аэротенках такого типа и изучить влияние отдельных параметров на протекание процесса биологической очистки.

С учетом конструктивных особенностей рассматриваемого аэротенка и различия явлений, происходящих в разных его коридорах, нами для описания процессов очистки для сооружений КБОД предложена физическая модель [8]. Согласно модели [8] весь процесс биологической очистки можно разделить на три фазы. Первая фаза соответствует первому коридору аэротенка – регенератору. Вторая фаза соответствует впуску сточных вод (второй коридор). При расчетах второй фазы учитывалось, что кроме подачи активного ила и его интенсивной аэрации, происходит подача сточных вод рассредоточено по длине коридора в четырех точках. Объем подаваемых сточных вод больше объема активного ила, поэтому происходит изменение концентрации хлопьев и дисперсных бактерий активного ила и сточных вод в местах их ввода за счет взаимного разбавления. Третья фаза соответствует третьему и четвертому коридорам аэротенка. Исходя из физической модели [8] нами предпринята попытка [9] математического описания очистки в таком реальном аэротенке исходя из уравнений типа Моно-Герберта с учетом аэрации [4] и автолиза [6]. Кроме того, в отличие от моделей [4], было учтено, что при регенерации происходит частичное разрушение хлопьев ила и образование дисперсных бактерий. Образование дисперсных бактерий в 1-й фазе является существенным отличительным моментом модели [8], так как такие микроорганизмы окисляют органическое вещество более интенсивно, чем хлопья. Было показано [9], что модели, предназначенные для описания явлений в идеальных аэротенках и обобщенные для реальных аэротенков, приводят к неудовлетворительным результатам. В частности, на выходе из аэротенка активный ил состоит в основном из дисперсных бактерий, которые не способны к седиментации во вторичном отстойнике.

Поэтому, исходя из идей, изложенных в [3], нами была предложена математическая модель в виде следующей системы уравнений:

$$\frac{dX}{dt} = (-a_x + b_x L)X + k_2 G X Z - k_1 G^m X + k_4 S X \quad (1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (-a_z + b_z L)Z - k_2 G X Z + k_1 G^m X + k_4 S Z \quad (2)$$

$$\frac{dL}{dt} = -(g_x X + g_z Z)L \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = (k_3 - k_4 S)(X + Z), \quad (4)$$

где X , Z , S , L – концентрации, соответственно, хлопьев, дисперсных бактерий, продуктов автолиза и загрязнений; k_1 – скорость эрозии хлопьев, k_2 – константа скорости агрегации; k_3 и k_4 – константы, характеризующие скорость образования и скорость окисления продуктов автолиза соответственно, G – градиент скорости в турбулентном потоке; m – константа, a_x , a_z – скорости отмирания хлопьев и дисперсных бактерий; b_x , b_z – константы, характеризующие скорости образования хлопьев и дисперсных бактерий за счет размножения, g_x , g_z – скорости потребления субстрата хлопьями и дисперсными бактериями.

Система уравнений (1)-(4) использовалась для описания явлений во всех трех фазах. При этом для каждой фазы система (1)-(4) решалась отдельно, а фаза 2 с учетом распределенной подачи сточных вод разбивалась дополнительно на четыре подфазы. Значения, полученные в результате численного решения системы уравнений для каждой фазы, являются начальными условиями для последующей фазы биологической очистки. В уравнениях (1) и (2) первые слагаемые соответствуют модели [3] для двух хищников, которые потребляют одинаковую пищу. Второе слагаемое в (1) описывает увеличение концентрации хлопьев за счет процесса агрегации дисперсных бактерий в хлопья, а третье слагаемое учитывает убывание хлопьев за счет эрозии, следствием чего является образование дисперсных бактерий. В уравнении (2)

второе слагаемое описывает уменьшение концентрации дисперсных бактерий за счет процесса агрегации, а третье слагаемое учитывает увеличение концентрации дисперсных бактерий за счет эрозии хлопьев [4]. Четвертое слагаемое в уравнениях (1)-(2) учитывает прирост хлопьев и дисперсных бактерий за счет потребления продуктов автолиза. Уравнение (3) описывает изменение концентрации загрязнений в зависимости от скоростей потребления субстрата хлопьями и дисперсными бактериями. Уравнение (4), предложенное в [6], описывает изменение концентрации продуктов автолиза.

Отметим, что уравнения (1)-(3) имеют принципиальные отличия от рассмотренных в [3]. Прежде всего, в связи с конечной длиной 4-х коридоров аэротенка время взаимодействия ограничено и поэтому не возникает проблем устойчивости [2, 3]. Во-вторых, в (1) и (2) присутствуют слагаемые (2-е и 3-е), которые описывают влияние внешних факторов (аэрация) на среду обитания. Поэтому хищники X и Z , имея разные скорости размножения и отмирания, испытывают взаимопревращения, обусловленные фактором аэрации. Кроме того, в каждой фазе, с учетом разбиения 2-й фазы на четыре подфазы, осуществляются свои различные начальные условия.

Используя уравнения (1)-(4), нами были проведены расчеты при условиях, которые соответствуют работе сооружений на КБОД. Расход активного ила, подаваемого в регенератор, $q_u = 25,2 \text{ м}^3/\text{мин}$, доза ила $a_u = 6 \text{ г/л}$, а концентрация остаточных загрязнений на входе в регенератор $L_i = 0,015 \text{ г/л}$. Предполагаем также, что концентрации дисперсных бактерий $Z_{\text{вх}} \approx 0$, продуктов автолиза - $S_{\text{вх}} \approx 0,03 \text{ г/л}$. С учетом разной интенсивности подачи воздуха в фазах 1, 2 и фазе 3 нами были приняты соответствующие значения параметров $G_{1-2} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$ и $G_3 = 2 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ [4]. На действующих сооружениях КБОД г. Харькова очистка сточных вод происходит при их впуске через четыре подающих окна, расположенных равномерно по длине коридора, концентрация загрязнений в сточных водах равна $L_{\text{св}} \approx 0,15 \text{ г/л}$, а интенсивность подачи сточных вод составляет $q_{\text{св}} \approx 45 \text{ м}^3/\text{мин}$.

В [9] было показано, что предложенная модель дает удовлетворительные значения для концентраций ила и субстрата на выходе из аэротенка, которые согласуются с контролируруемыми величинами. Поэтому уравнения (1)-(4) использованы нами для проведения анализа качества очистки сточных вод в различных условиях. В частности, нами исследовано влияние интенсивности подачи сточных вод с разными концентрациями загрязнений на качество очистки с учетом возможностей комбинирования открытия окон 1-4. Результаты расчетов концентраций загрязнений и хлопьев на выходе из аэротенка при параметрах $m = 2$, $k_1 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ мин}$, $k_2 = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ л/г}$, взятых из [4], представлены на рис. 2, 3.

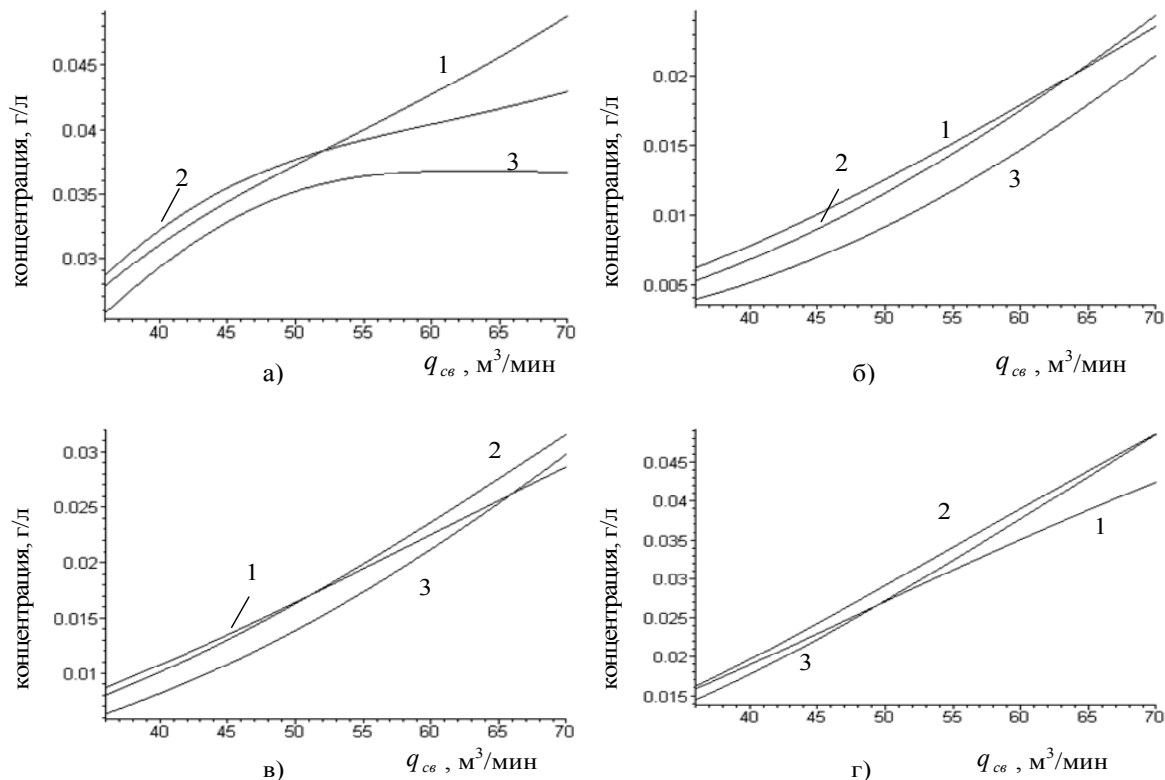


Рис. 2. Зависимость концентрации загрязнений на выходе из аэротенка от расхода сточных вод при подаче: а) через четыре окна, б) через первое окно, в) через второе окно, г) через первое и четвертое окна; концентрация загрязнений в стоках, поступающих на очистку: 1 – 0,1 г/л, 2 – 0,15 г/л, 3 – 0,2 г/л.

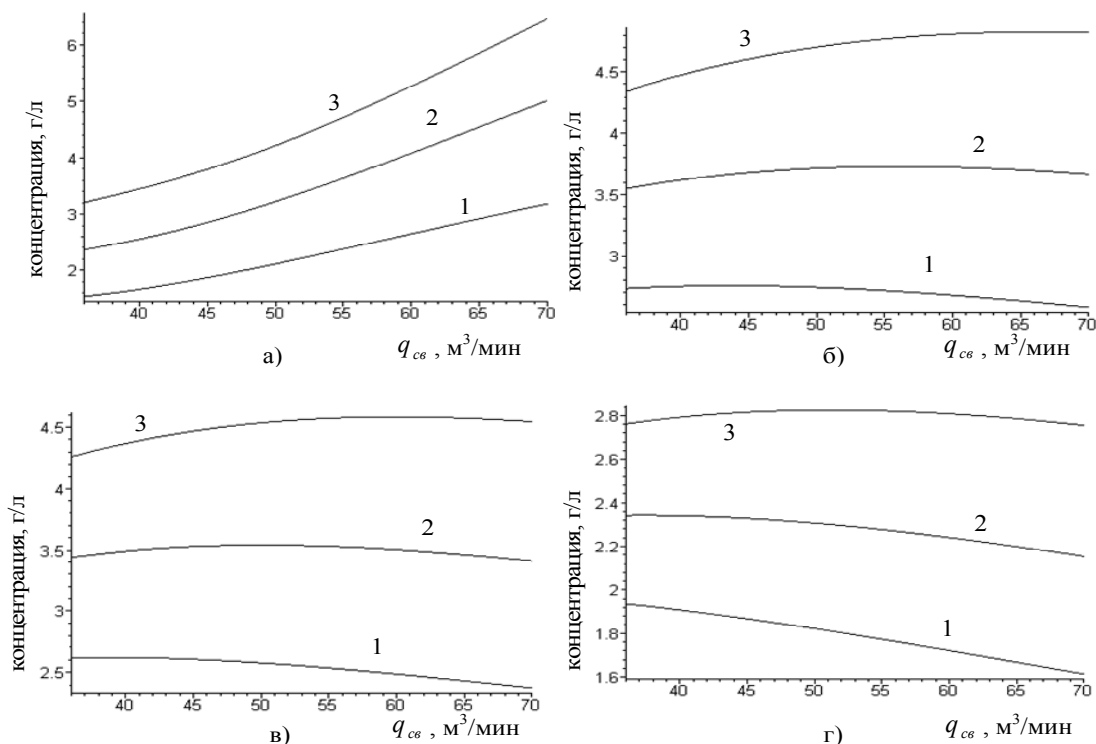


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для концентрации хлопьев

При $L_{cв} \approx 0,15$ г/л для варианта подачи сточных вод через четыре окна получаем следующие значения концентраций на выходе из аэротенка: $L_{ввых} = 0,035$ г/л, $X_{ввых} = 2,8$ г/л. При впуске сточных вод только через первое окно при таких параметрах работы получаем значения: $L_{ввых} = 0,009$ г/л, $X_{ввых} = 3,65$ г/л. При впуске через второе окно получаем: $L_{ввых} = 0,012$ г/л, $X_{ввых} = 3,41$ г/л. При впуске через первое и четвертое окна значения $L_{ввых} = 0,024$ г/л, $X_{ввых} = 2,6$ г/л. Видим, что наименьшее значение концентрации загрязнений в сточных водах получаем для варианта «подача сточных вод через первое окно», наибольшую концентрацию загрязнений – для варианта «подача через четыре окна». Концентрация дисперсных бактерий практически не зависит от количества и места подачи сточных вод. Концентрация хлопьев на выходе из аэротенка принимает максимальное значение для варианта «подача сточных вод через первое окно» и «подача сточных вод через второе окно» и минимальное значение для варианта «подача сточных вод через первое и четвертое окна» и через четыре окна.

При значениях концентраций загрязнений в поступающих сточных водах $L_{cв} = 0,1$ г/л и той же интенсивности подачи сточных вод, что и в предыдущем варианте, при впуске через четыре окна получаем значения концентраций: $L_{ввых} = 0,034$ г/л, $X_{ввых} = 1,8$ г/л. При подаче сточных вод только через первое окно при таких параметрах работы получаем такие значения: $L_{ввых} = 0,01$ г/л, $X_{ввых} = 2,7$ г/л. При впуске через второе окно получаем: $L_{ввых} = 0,012$ г/л, $X_{ввых} = 2,6$ г/л. При впуске через первое и четвертое окна значения $L_{ввых} = 0,0225$ г/л, $X_{ввых} = 1,85$ г/л.

Анализируя полученные результаты, видим, что наименьшее значение концентрации загрязнений в сточных водах получаем для варианта «подача сточных вод через первое окно» и «подача сточных вод через второе окно», наибольшую концентрацию загрязнений – для варианта «подача через четыре окна». Концентрация хлопьев на выходе из аэротенка принимает максимальное значение для варианта «подача сточных вод через первое окно» и варианта «подача сточных вод через второе окно», минимальное значение - для варианта «подача сточных вод через четыре окна» и для варианта «подача сточных вод через первое и четвертое окна».

При концентрации загрязнений в поступающих сточных водах $L_{cв} = 0,2$ г/л с той же интенсивностью подачи сточных вод при впуске через четыре окна получены следующие значения концентраций: $L_{ввых} = 0,032$ г/л, $X_{ввых} = 3,8$ г/л. При впуске сточных вод только через первое окно при таких параметрах работы получаем значения: $L_{ввых} = 0,007$ г/л, $X_{ввых} = 4,6$ г/л. При впуске через второе окно получаем: $L_{ввых} = 0,011$ г/л, $X_{ввых} = 4,25$ г/л. При впуске через первое и четвертое окна значения

$L_{\text{вих}} = 0,02$ г/л, $X_{\text{вих}} = 3,3$ г/л. Наименьшее значение концентрации загрязнений в сточных водах получаем для варианта «подача сточных вод через первое окно», наибольшую концентрацию загрязнений – для варианта «подача через четыре окна». Концентрация хлопьев на выходе из аэротенка принимает максимальное значение для варианта «подача сточных вод через первое окно» и варианта «подача сточных вод через второе окно», минимальное значение - для варианта «подача сточных вод через четыре окна» и для варианта «подача сточных вод через первое и четвертое окна».

При увеличении интенсивности подачи сточных вод до $q_{\text{св}} \approx 70$ м³/мин при различных значениях концентраций загрязнений в сточных водах наименьшие значения концентрации загрязнений на выходе получены для варианта подачи сточных вод через первое окно.

Зависимости изменения концентраций хлопьев и остаточных загрязнений на выходе из аэротенка от концентрации субстрата на входе и интенсивности подачи сточных вод показаны на рис.4.

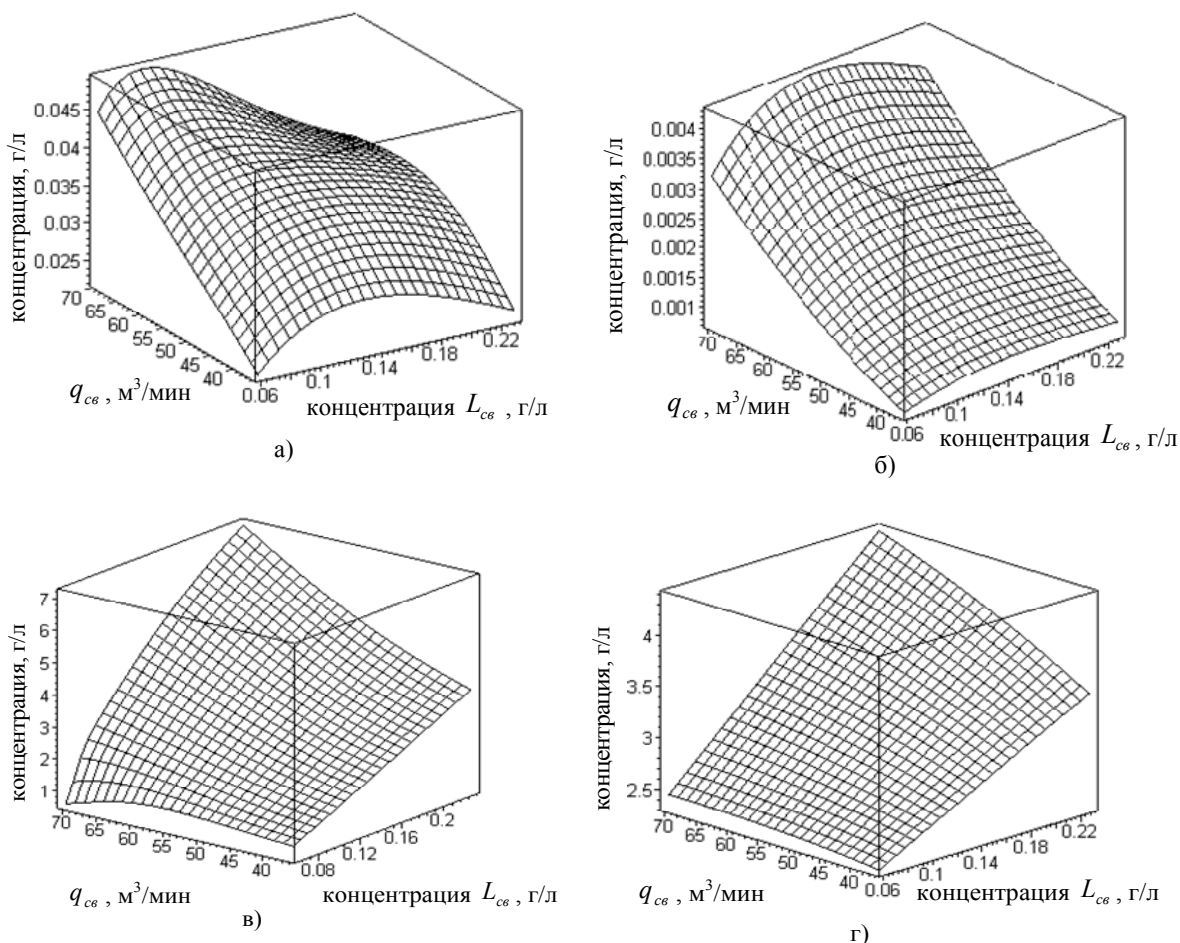


Рис. 4. Зависимость концентрации загрязнений (а)-(б) и концентрации хлопьев (в)-(г) на выходе из аэротенка от расхода сточных вод при подаче соответственно: а), в) через первое окно, б), г) через четыре окна

Из рис.4 видно, что при $L_{\text{вх}} \approx 0,15$ г/л и подаче через четыре окна концентрация загрязнений на выходе является наибольшей при любой интенсивности подачи сточных вод. При увеличении или уменьшении $L_{\text{вх}}$ эта концентрация уменьшается. Следовательно, при подаче сточных вод через четыре окна повысить степень очистки возможно уменьшением концентрации $L_{\text{вх}}$ путем разбавления подаваемых стоков (например, надфиловой водой из илоуплотнителей). Увеличение $L_{\text{вх}}$ достигается подачей избыточного ила в первичный отстойник. Кроме того, на рис. 4 видно, что при подаче сточных вод через первое окно, концентрация загрязнений на выходе из аэротенка при тех же начальных условиях приблизительно в 20 раз меньше. Таким образом, проведенные нами расчеты показывают, что применение аэротенков типа вытеснитель дает более стабильный и качественный результат при очистке сточных вод по БПК_{полн} по сравнению с конструкцией «аэротенк промежуточного типа».

Выводы. Анализируя полученные результаты, видим, что варианты «подача сточных вод через первое окно» и «подача сточных вод через второе окно» (случаи сосредоточенного впуска сточных вод «аэротенк-вытеснитель») показывают достаточно хорошие результаты в широком диапазоне изменения концентрации загрязнений в поступающих стоках и интенсивности подачи сточных вод.

Вариант подачи сточных вод через четыре окна характеризуется стабильностью результатов качества очистки, которые слабо зависят от концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку, и от интенсивности подачи сточных вод. При этом вариант с подачей сточных вод через первое окно дает более высокую степень очистки, а концентрация хлопьев при высоких нагрузках на ил принимает меньшие значения, что будет существенно влиять на дальнейшие процессы уплотнения активного ила и снизит проблемы с утилизацией его избытка. При таком варианте подачи сточных вод существенно повышается экологическая безопасность очистных сооружений и улучшается экологическое состояние водоемов, в которые сбрасываются сточные воды после очистки.

РЕЗЮМЕ

На основі запропонованої математичної моделі на прикладі Диканівських очисних споруд м. Харкова розглянуті можливості покращення якості біологічного очищення стічних вод в аеротенках. Показано, що при реалізації системи очищення у вигляді аеротенк-вітиснювач можна зменшити концентрацію забруднень, що скидаються в природні водоймища, приблизно в 20 разів і підвищити екологічну безпеку очисних споруд.

Ключові слова: аеротенк, біологічне очищення, математична модель, екологічна безпека.

SUMMARY

Based on the proposed mathematical model on the example of Dikanevskykh cleansing buildings of Kharkov the possibilities for the improvement the quality of biological purification of wastewater in aerotank considered. It is shown that during realization of the cleaning system in a kind continuous-flow aeration tank it is possible to decrease concentration of the contaminations thrown down in natural reservoirs, approximately in 20 times and to increase the ecological safety of cleansing buildings.

Keywords: aerotank, biological cleaning, mathematical model, ecological safety.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М. Акварос, 2003. – 512 с.
2. Свиричев Ю. М. Устойчивость биологических сообществ / Ю. М. Свиричев, Д. О. Логофет. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
3. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. – М.: Наука, 1976. – 288 с.
4. Вавилин В. А. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом / В. А. Вавилин, В. Б. Васильев. – М.: Наука, 1979. – 119 с.
5. Кафаров В. В. Математическое моделирование биохимических реакторов / В. В. Кафаров, А. С. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность. – 1979. – 343 с.
6. Олійник О. Я. Особливості моделювання очистки стічних вод у системі аеротенк-відстійник-регенератор / О. Я. Олійник, С. М. Зябліков // Проблеми водопостач., водовідвед. та гідравліки. – 2005 – Вип. 4. – С. 46-53.
7. Святенко А. І. Важливість врахування особливостей біологічного очищення в аеротенках для поліпшення показників їх роботи. / А. І. Святенко, Л. М. Корнійко // Екологічна безпека. – 2009. – № 4. – С.93-96.
8. Горносталь С. А. Описание процессов, происходящих в системе аэротенк – вторичный отстойник, и их физическое моделирование / С. А. Горносталь, А. П. Созник // Технічні науки та архітектура. – 2008.– Вип.81. – С. 133-139.
9. Горносталь С. А. Моделирование процессов биологической очистки в идеальных и реальных аэротенках / С. А. Горносталь, Е. А. Петухова, А. П. Созник // Проблеми надзв. ситуацій. – 2009. – Вип.10. – С. 67-77.

Поступила в редакцію 20.05.2010 г.