

- нением режима грунтовых вод // Сучасні проблеми теорії фільтрації. – Рівне: Вісник УДАВГ. -1998. - С. 113-118.
8. Методические рекомендации по прогнозированию подтопления берегов водохранилищ и использованию подтопленных земель// - Л.: Изд-во ВНИИГ им Б.Е. Веденеева, 1978. – 87с.
9. Методические рекомендации по расчетам защиты территорий от подтопления// Науч. рук. А.Я.Олейник, отв.исп. В.С.Кремез. - Киев: ИГМ НАНУ - Укргипроводхоз. - 392с.

УДК 614.8

*Горносталь С.А., преп., УГЗУ,
Петухова Е.А., канд. техн наук, доц., УГЗУ,
Созник А.П., д-р физ.-мат. наук, проф., УГЗУ*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В ИДЕАЛЬНЫХ И РЕАЛЬНЫХ АЭРОТЕНКАХ

На основе обобщения моделей биологической очистки в идеальных аэротенках предпринята попытка описать явления очистки в реальных сооружениях. Показано, что такие модели не пригодны для этих целей. Предложена новая математическая модель, результаты расчетов по которой позволят разработать рекомендации по предотвращению чрезвычайных ситуаций, связанных с попаданием в водоем недостаточно очищенных сточных вод.

Ключевые слова: биологическая очистка, аэротенк, модели

Постановка проблемы. Проблеме возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с нарушением процессов сбора, передачи и очистки сточных вод в настоящее время уделяется повышенное внимание. Традиционные технологии биологической очистки сточных вод имеют ряд недостатков, и для крупных очистных сооружений до сих пор важной практической задачей остается вопрос соблюдения норматива предельно допустимых сбросов, значение которого все время ужесточается. В современных условиях, учитывая масштабы сооружений очистки, наиболее перспективным с экономической точки зрения является путь улучшения качества очистки. Для этого необходимо иметь адекватные математические модели, которые позволили бы описать процессы, про-

исходящие в действующих аэротенках, и установить какие изменяемые параметры аэротенка и как влияют на качество очистки, что позволит создать рекомендации по предотвращению чрезвычайных ситуаций, связанных со сбросом в водоемы очищенных вод, с концентрацией загрязнений превышающей предельно допустимые значения.

Анализ последних исследований и публикаций. Созданию математических моделей процессов, происходящих в сооружениях биологической очистки, посвящено много публикаций. В частности, в [1] детально проанализированы известные модели типа Моно, Герберта, Иерусалимского, Кенейла, Гюнтер – Запрудского и других авторов. Показано, что указанные модели в той или иной мере удовлетворительно описывают явления очистки в различных аэротенках идеального типа.

Постановка задачи и ее решение. На комплексе биологической очистки «Диканевский» (КБОД) подача сточных вод осуществляется рассредоточено по всей длине второго коридора через четыре подающих окна, с возможностью регулирования их подачи с помощью шиберных заслонок, а активный ил подается в первый коридор аэротенка на регенерацию. Такую конструкцию нельзя отнести ни к одному из типов аэротенков, рассмотренных в [1-4]. Поэтому возникает вопрос, который и рассматривается в данной работе: применимы ли известные модели или необходимо создание новых моделей для описания процессов в действующем аэротенке.

В [5] нами была обобщена модель Герберта, являющаяся модификацией модели Моно, с учетом процессов аэрации и образования в результате дисперсных бактерий, а также с учетом явления автолиза [4]

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

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

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu}{K_L + L} (X + Z) L, \quad (3)$$

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

где X , Z , S , L - концентрации, соответственно, хлопьев, дисперсных бактерий, продуктов автолиза и загрязнений; μ - максимальная удельная скорость роста хлопьев; K_L - константа полунасыщения, k_1 - скорость эрозии хлопьев, k_2 - константа, характеризующая скорость агрегации хлопьев; G - градиент скорости в турбулентном потоке; β и λ - удельные скорости убывания соответственно хлопьев и дисперсных бактерий; k_3 и k_4 - константы, определяющие скорость образования и окисления продуктов автолиза, m - константа, Y - коэффициент трансформации.

Решая систему уравнений (1)-(4) с параметрами $\mu = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$, $K_L = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ г/л}$, $Y = 0,85$, $\beta = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ [1] и различными начальными условиями, пренебрегая явлениями аэрации и автолиза, получаем результаты представленные на рис. 1. Из рисунка видно, что кривая, описывающая изменение X , совпадает с экспериментальной кривой роста и убывания биомассы активного ила при небольшой начальной дозе ила в пределах $a_{ex} = 0,008 \div 0,02 \text{ г/л}$ и $L_{ex} = 0,15 \text{ г/л}$ (рис. 1а).

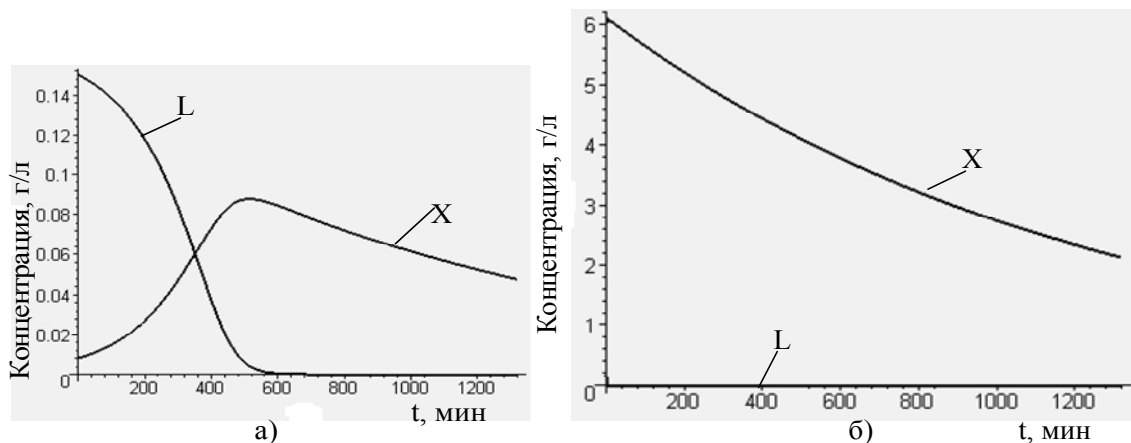


Рис. 1 – Изменение концентрации субстрата L и дозы активного ила X : а) при начальной дозе ила $0,008 \text{ г/л}$; б) при начальной дозе ила 6 г/л

Однако, в действительности на входе в регенератор аэротенка - смесителя доза ила должна составлять около $a_{ex} = 6 \text{ г/л}$. При таких начальных условиях концентрация субстрата практически мгновенно уменьшается до нуля, происходит не возрастание, а

убывание биомассы ила, концентрация которой за 20 часов уменьшается в три раза (рис.1 б), что не соответствует экспериментальным данным.

Для описания процессов в системе аэротенк – вторичный отстойник для сооружений КБОД нами предложена физическая модель [6], согласно которой весь процесс можно разделить на четыре фазы. Для описания явлений в первых трех фазах была использована система уравнений (1)–(4), решение которой без учета продуктов автолиза находилось нами для каждой фазы 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. Расчеты были выполнены 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 концентрация дисперсных бактерий $Z_i \approx 0$. Расход сточных вод составляет $q_{ce} = 45,13 \text{ м}^3/\text{мин}$ с концентрацией загрязнений $L_{ce} = 0,15 \text{ г/л}$. С учетом разной интенсивности подачи воздуха в фазах 1, 2 и фазе 3 нами были приняты соответствующие значения параметров $G = G_{1-2} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$ и $G = G_3 = 1,6 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ [1]. Результаты расчетов при указанных выше величинах и при значениях параметров $m = 2$, $k_1 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ мин}$, $k_2 = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ л/г}$, взятых из [1], приведены на рис. 2.

Из рис. 2а видно, что в первой фазе (в регенераторе) происходит снижение концентрации хлопьев и субстрата, увеличение концентрации дисперсных бактерий.

На выходе из регенератора получаем значения $X = 3,6 \text{ г/л}$, $Z = 0 \text{ г/л}$, $L \approx 0 \text{ г/л}$, причем значение X по величине близко к измеряемым величинам. На выходе из второй фазы очистки было получено (рис.2 в), что концентрация хлопьев снижается практически до нуля, а концентрация дисперсных бактерий возрастает до $Z = 0,24 \text{ г/л}$. В конце третьей фазы (рис. 2 г) получаем следующие значения концентраций: $X = 0,08 \text{ г/л}$, $Z = 0,25 \text{ г/л}$, $L \approx 0$. Доза активного ила $a = X + Z = 0,33 \text{ г/л}$ на выходе из аэротенка

существенно меньше экспериментального значения $a_9 = 3 - 4$ г/л.

При этом основную часть составляют дисперсные бактерии, которые практически не оседают во вторичном отстойнике, а составляющая хлопьев не превышает 25%. Значение концентрации субстрата также значительно меньше измеряемых величин $L_9 \approx 0,015$ г/л. Полученные значения концентраций хлопьев и дисперсных бактерий соответствуют явлению вспухания ила и выносу его в водоем.

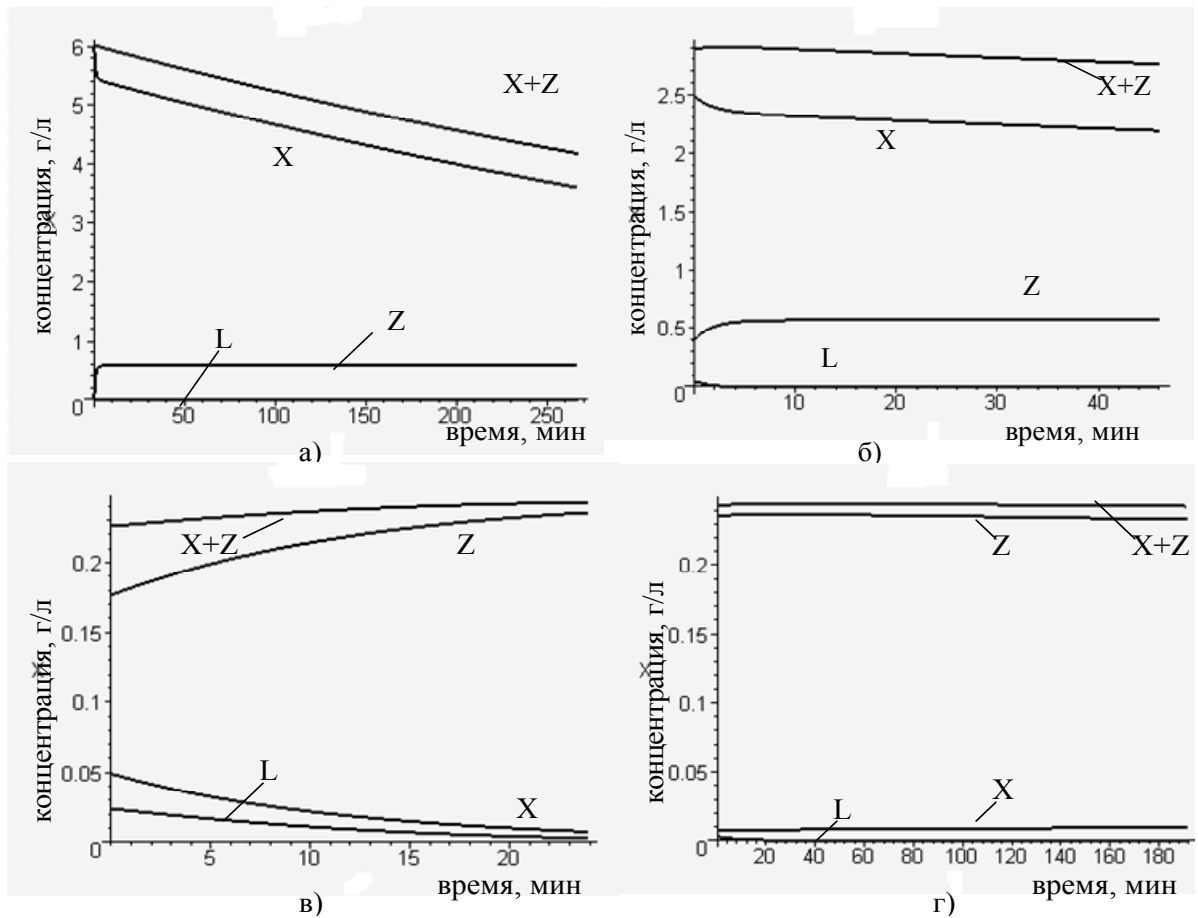


Рис. 2 – Изменение концентраций: а) первая фаза; б), в) вторая фаза: 1-й и 4-й впуски сточных вод соответственно, г) третья фаза

Нами были предприняты попытки улучшить согласие результатов расчетов с экспериментальными значениями X и L путем введения вместо одного параметра μ двух μ_X и μ_Z в формулах (1), (2) и (3), а также путем варьирования параметров $G_{1,2}$ и G_3 , значения которых согласно [1] могут изменяться в определенных пределах. Однако такие расчеты, а также учет уравнения (4)

не позволили улучшить согласие полученных значений a и L с экспериментальными величинами. Таким образом, можно сделать вывод, что уравнения, предложенные для описания процессов биологической очистки сточных вод в идеальных аэротенках, не дают удовлетворительного описания процессов в реальных аэротенках. В связи с этим нами была предложена другая математическая модель для описания процессов, происходящих в реальном аэротенке, в основу которой положена работа [7]

$$\frac{dX}{dt} = (-a_x + b_x L)X + k_2 GXZ - k_1 G^m X + k_4 SX \quad (5)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (-a_z + b_z L)Z - k_2 GXZ + k_1 G^m X + k_4 SZ \quad (6)$$

$$\frac{dL}{dt} = -(g_x X + g_z Z)L \quad (7)$$

$$\frac{dS}{dt} = (k_3 - k_4 S)(X + Z), \quad (8)$$

где 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.

В уравнениях (5) и (6) первые слагаемые соответствуют модели [7] для двух хищников, которые потребляют одинаковую пищу. Второе слагаемое в (5) 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 (6) второе слагаемое описывает уменьшение концентрации дисперсных бактерий за счет процесса агрегации, а третье слагаемое учитывает увеличение концентрации дисперсных бактерий за счет эрозии хлопьев [1]. Уравнение (7) описывает изменение концентрации загрязнений, в зависимости от скоростей потребления субстрата хлопьями и дисперсными бактериями. Уравнение (8) совпадает с уравнением (4).

Решая уравнения (5)-(8) без учета S при тех же начальных условиях, что и для уравнений (1)-(4), получаем результаты, приведенные на рис. 3.

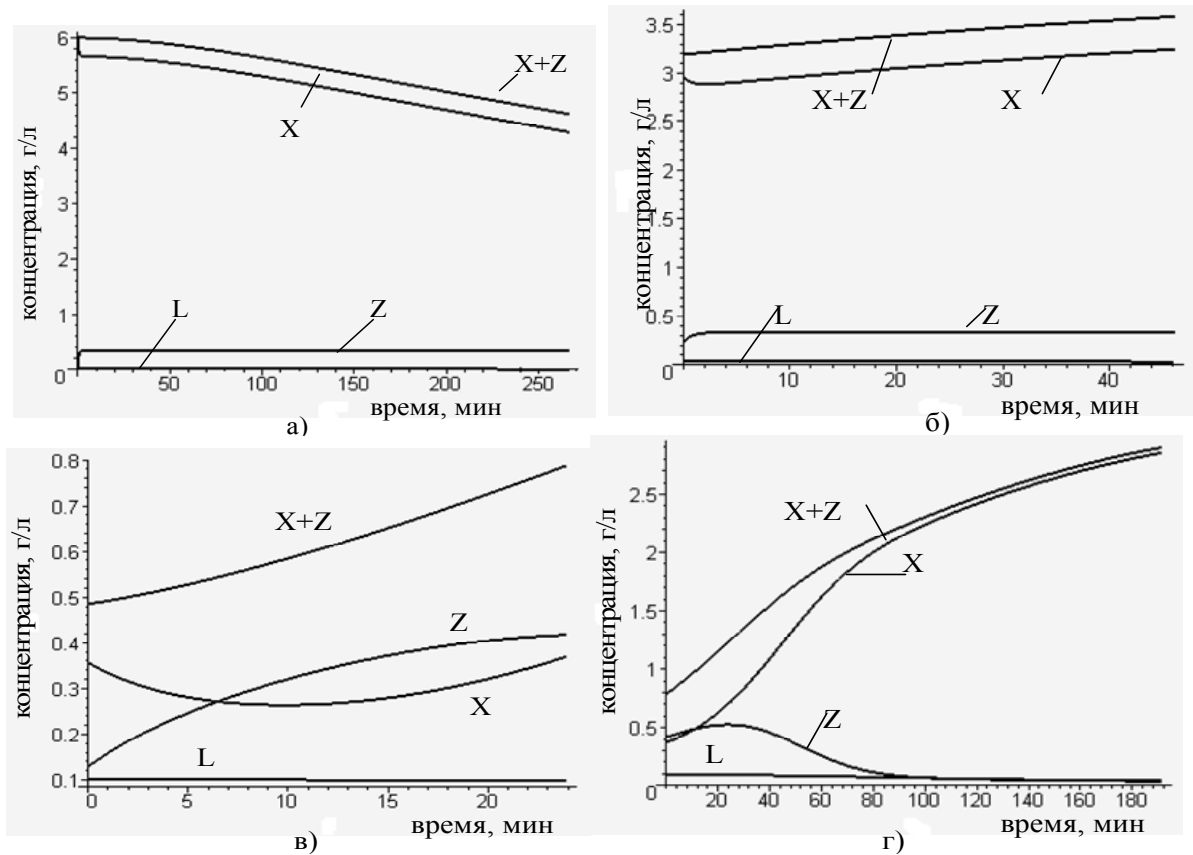


Рис. 3 – Изменение концентраций: а) первая фаза; б), в) вторая фаза: 1-й и 4-й выпуски сточных вод соответственно, г) третья фаза

Расчеты выполнены при следующих значениях параметров: $a_x = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, $b_x = 7 \cdot 10^{-2} \text{ л}/(\text{г} \cdot \text{мин})$, $a_z = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, $b_z = 3,7 \cdot 10^{-1} \text{ л}/(\text{г} \cdot \text{мин})$, $g_x = g_z = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ л}/(\text{г} \cdot \text{мин})$, $G_{1-2} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$ и $G_3 = 2 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$, $k_1 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ мин}$, $k_2 = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ л}/\text{г}$. Отметим, что значения пяти параметров a_x , a_z , b_x , g_x , g_z находились нами путем подбора к известному значению концентрации хлопьев X на выходе из аэротенка, а остальные взяты из [1]. На выходе из третьей фазы получаем значения концентраций $X = 2,85 \text{ г}/\text{л}$, $Z \geq 0 \text{ г}/\text{л}$, $L \approx 0,015 \text{ г}/\text{л}$. При этом скорость образования дисперсных бактерий b_z примерно в 5 раз больше скорости роста хлопьев b_x , а скорость отмирания больше в 2,6 раза с учетом того, что ско-

рости потребления субстрата g_x и g_z одинаковы. Такой вывод согласуется с представлением о том, что дисперсные бактерии играют существенную роль в биологической очистке сточных вод [1, 8].

Из сравнения концентраций, представленных на рис. 2 и 3, можно сделать выводы, что результаты расчетов по изложенным моделям начинают существенно отличаться, начиная со второй фазы. Кроме того, на всех этапах второй фазы (рис. 3 б-в) модель (5)-(8) приводит к тому, что концентрация хлопьев сначала уменьшается, а затем возрастает. В конце второй фазы модель (1) – (4) дает значительное превышение концентрации дисперсных бактерий по сравнению с концентрацией хлопьев. При использовании модели (5) – (8) значения этих концентраций примерно одинаковы (рис. 3 в), при этом концентрация хлопьев имеет тенденцию к возрастанию. Особенно значительно отличие в описании моделями (1) – (4) и (5) – (8) процессов в третьей фазе, где предложенная нами модель приводит к почти полной агрегации дисперсных бактерий хлопьями ила так, что возрастание концентрации ила идет, в основном, за счет увеличения концентрации хлопьев. Такой результат хорошо согласуется с процессами, происходящими в реальных аэротенках.

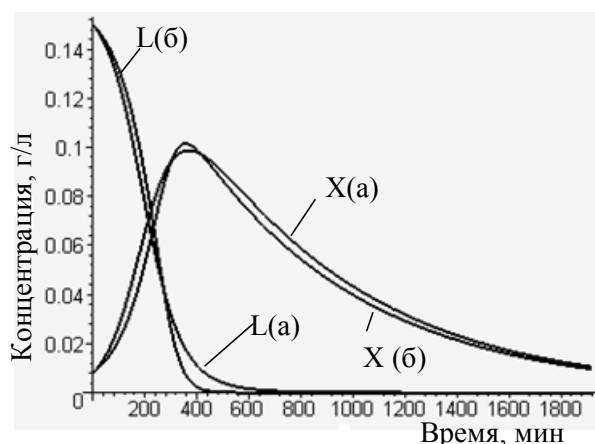


Рис. 4 – Зависимости изменения концентраций хлопьев и загрязнений: а) для модели (1) – (4); б) для модели (5) – (8)

Отметим, что нашу модель (5) – (8) можно согласовать с моделью Моно – Герберта для идеальных аэротенков при таких значениях параметров $a_x = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, $b_x = 9,9 \cdot 10^{-2} \text{ л/(г} \cdot \text{мин)}$, $a_z = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, $b_z = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ л/(г} \cdot \text{мин)}$, $g_x = g_z = 1,08 \cdot 10^{-1} \text{ л/(г} \cdot \text{мин)}$. Зависимости концентраций, полученные в результате

решения уравнений (1) – (4) и (5) – (8) с учетом только X и L при $k_1 = k_2 = 0$ (идеальный аэротенк – смеситель) показаны на рис. 4.

Таким образом, уравнения (5)-(8) могут описывать также и процессы, происходящие в аэротенках идеального типа. Проведенные нами исследования показали, что модель (5)-(8) при значениях параметров соответствующих результатам, приведенным на рис. 3, можно для идеального аэротенка согласовать с моделью (1)-(4) при таких параметрах: $\mu = 3,5 \cdot 10^{-1} \text{ мин}^{-1}$, $K_L = 4,77 \text{ г/л}$, $Y = 27$, $\beta = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$. Решая тогда систему уравнений (1)-(4) при прежних значениях остальных параметров, получаем результаты, которые представлены на рис. 5.

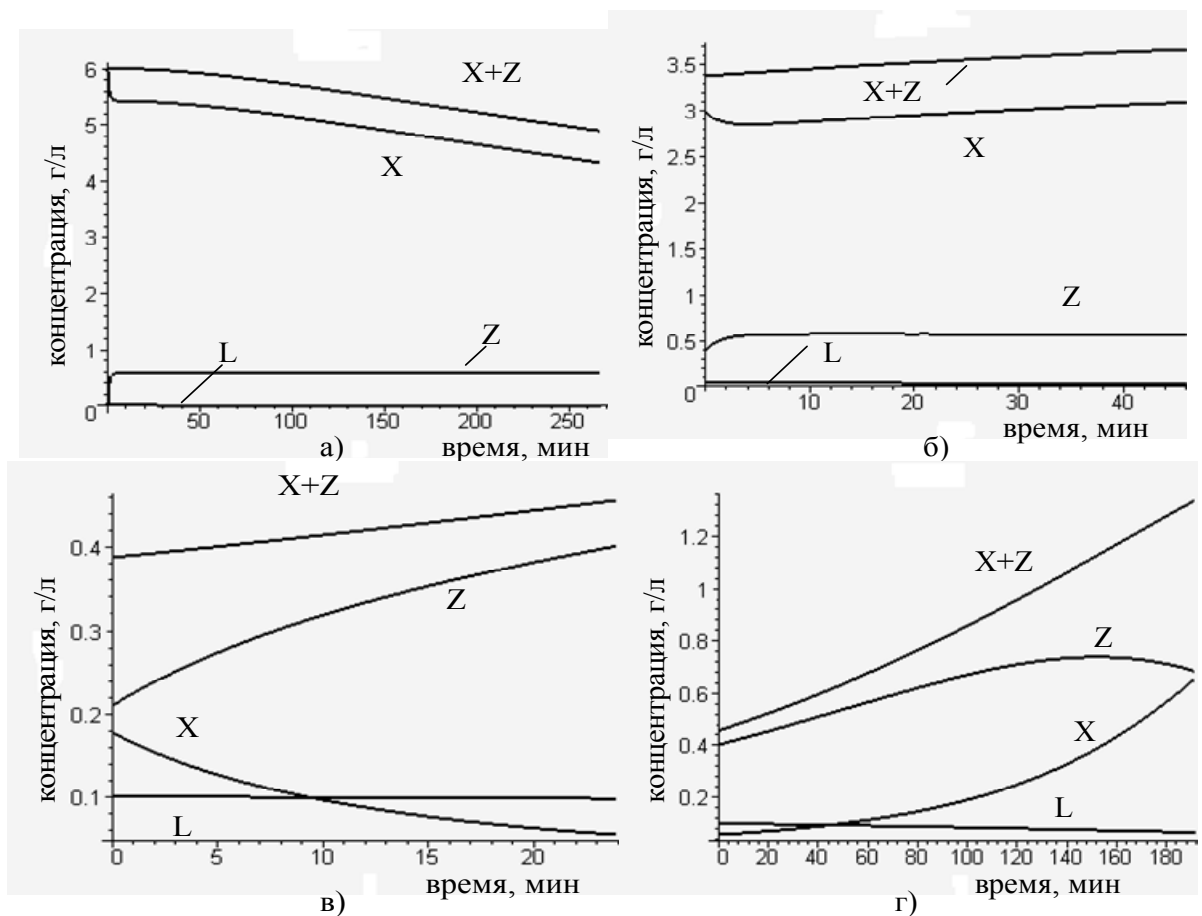


Рис. 5 – Изменение концентраций: а) в первой фазе (регенераторе); б), в) во второй фазе: при 1-м и 4-м впусках сточных вод соответственно; г) в третьей фазе

Результаты таких расчетов показывают, что зависимости концентраций от времени принципиально не отличаются между собой на рис. 3 а, б и рис. 5 а, б. Отличия в концентрациях возни-

кают, начиная с середины второй фазы. При этом использование модели (1)-(4) снова приводит к уменьшению концентрации хлопьев на выходе из второго коридора аэротенка. Получаем, как и на рис. 2 в, что концентрация дисперсных бактерий значительно превышает концентрацию хлопьев.

В результате на выходе из третьей фазы концентрации хлопьев и дисперсных бактерий $X = 0,6$ г/л, $Z = 0,6$ г/л имеют практически одинаковые значения, а концентрация субстрата $L = 0,08$ г/л. Указанные значения концентраций на выходе из аэротенка существенно отличаются от экспериментально измеренных значений: $X_9 = 3 - 4$ г/л, $Z_9 \geq 0$ г/л, $L_9 \approx 0,015$ г/л.

Выводы. Значения концентраций X и L , получаемые при решении системы уравнений (1) – (4) или (5) – (8) являются начальными условиями для описания процессов в четвертой фазе очистки (вторичный отстойник), где должно происходить оседание хлопьев активного ила в процессе отстаивания. На выходе из аэротенка количество дисперсных бактерий должно быть минимальным, чтобы не допустить выноса ила из сооружений, так называемого вспухания ила. Проведенное нами исследование показывает, что модель, предназначенная для описания процессов в идеальных аэротенках и обобщенная для реальных аэротенков в виде уравнений (1)-(4), приводит к неудовлетворительным результатам. Поэтому нам представляется, что предложенная нами модель в виде уравнений (5)-(8) является более перспективной для изучения явлений в реальных аэротенках. В дальнейшем нами предполагается провести более детального анализа этих уравнений и установить, какие из управляемых параметров аэротенка оказывают наибольшее влияние на качество очистки сточных вод. В результате можно будет сформулировать рекомендации, которые будут способствовать уменьшению риска возникновения чрезвычайных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. – 119 с.
2. Monod J. La technique de culture continue theorie and applications. – Ann. Institut Pasteur, 1950. – 79 с.

3. Herbert D. A theoretical analysis of continuous culture systems. – In: Symp. Of continuous of microorganisms, 1960. L., 1961. Sc. I, monogr. N 12, p. 44-52.
4. Олійник О.Я., Зябліков С.М. Особливості моделювання очистки стічних вод у системі аэротенк-відстійник-регенератор Зб.наук.пр. “Проблеми водопостач., водовідвед. та гідравліки”. — Київ: - Вип. 4, 2005. — С. 46-53.
5. Горносталь С.А., Созник А.П. Построение математической модели процессов, происходящих в регенераторе аэротенка. Проблемы надзв. ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗУ. Вип.7.- Харків: УЦЗУ, 2008. – С.51-57.
6. Горносталь С.А., Созник А.П. Описание процессов, происходящих в системе аэротенк – вторичный отстойник, и их физическое моделирование. Наук. - техн. зб. Серія: Технічні науки та архітектура, вип.81. – Киев: Техніка, 2008. – С. 133-139.
7. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976. - 288 с.
8. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М. Акварос, 2003. – 512 с.
nuczu.edu.ua