



УДК 698.35

Е. К. Грудяева, С. Е. Душин, Н. Е. Шолмова

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С МЕМБРАННЫМ БИОРЕАКТОРОМ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Представлено описание технологического процесса очистки сточной воды с использованием мембранного реактора. Исследована математическая модель Моно взаимодействия биомассы и субстрата в реакторе.

Сточные воды, биологическая очистка, мембранный биореактор, активный ил, субстрат, модель Моно

В настоящее время реконструкция существующих и строительство новых очистных сооружений канализации на основе методов глубокой биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора является важнейшей инженерной задачей [1]. С целью повышения эффективности работы таких установок возникает необходимость разработки математических моделей (ММ) управляемых технологических процессов.

Локальная канализационная очистная установка представляет собой систему, состоящую из подсистем, каждая из которых отвечает за определенный вид очистки – механическую, биологическую, очистку ультрафиолетом, а также за процесс обезвоживания. Функциональная схема системы очистки сточных вод с мембранным биореактором изображена на рис. 1.

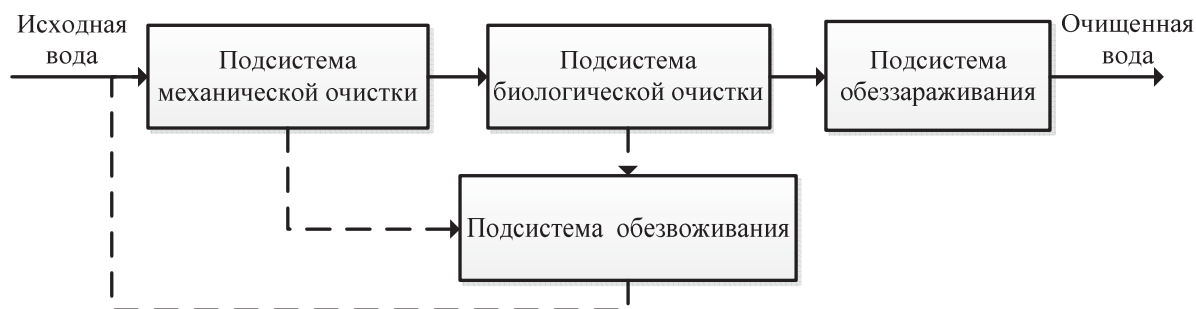


Рис. 1

Исходные сточные промышленные воды подаются в подсистему предварительной механической очистки для фильтрации крупного мусора. Далее вода поступает в резервуар-усреднитель (РУ), где находятся насосы для равномерной подачи сточных вод в биореактор при неравномерном поступлении воды на вход установки. Внутри емкости может располагаться теплообменник для нагрева сточных вод в холодное время.

После механической очистки вода поступает в подсистему биологической очистки, представляющую собой мембранный биореактор (МБ), который служит для проведения биохимического процесса окислирования загрязнений. Вместе с исходной водой в резервуар реактора подается концентрированный активный ил (АИ) и раствор коагулянта. В МБ происходит интенсивная аэрация сточных вод с помощью компрессора и аэраторов. В случае чрезмерного увеличения биомассы часть иловой смеси поступает на обезвоживание, что снижает общую минерализацию АИ.

Далее вода с помощью насоса подачи ила поступает на ультрафильтрационные мембраны (УМ), где биологически очищенная вода отделяется от ила. Ультрафильтрационное устройство состоит из блока фильтрующих модулей, в каждом из которых расположен пучок полых волокон с проницаемой поверхностью (мембраной), отверстия в которой обеспечивают ультрафильтрацию жидкости. Полупроницаемость УМ дает возможность проникать чистой воде сквозь отверстия на поверхности мембраны и не позволяет АИ попасть в трубопровод с пермеатом. Иловая смесь остается внутри мембранной трубки и циркулирует по контуру (рис. 2), где может быть также последовательно установлено несколько ультрафильтрационных устройств, при этом часть смеси возвращается в биореактор.

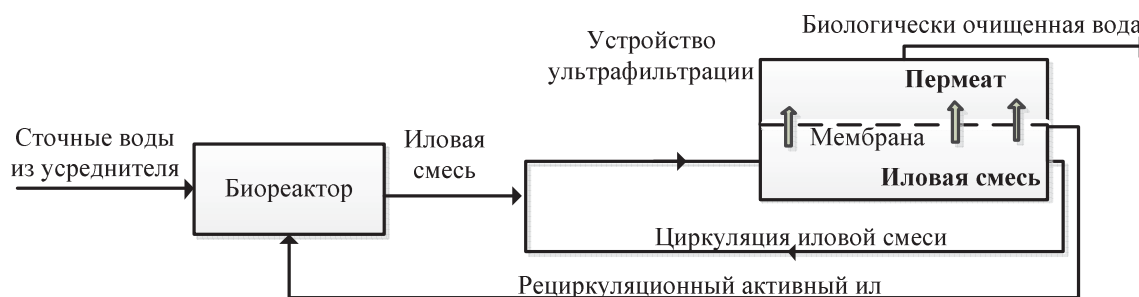


Рис. 2

По мере циркуляции иловой смеси мембраны теряют свойства проницаемости и нуждаются в промывке. Для предотвращения остановки технологического процесса в подсистеме биоочистки предусмотрено как минимум две технологические линии, поэтому при промывке одной из них вторая осуществляет фильтрацию иловой смеси. В случае двух технологических линий ультрафильтрации одна из них является рабочей, вторая – резервной.

Существуют различные способы промывки УМ. На практике широко используется способ, применяемый для промывки горизонтальных мембранных блоков типа «Кросс-флоу» («Cross flow», поперечный поток) с диаметром мембранных трубок, не позволяющим применять обратную промывку. Периодически проводится промывка чистой водой, подаваемой в направлении фильтрации (рис. 3) из резервуара чистой воды РЧВ. Налет ила внутри поверхности мембранной трубки отделяется и возвращается в биореактор.

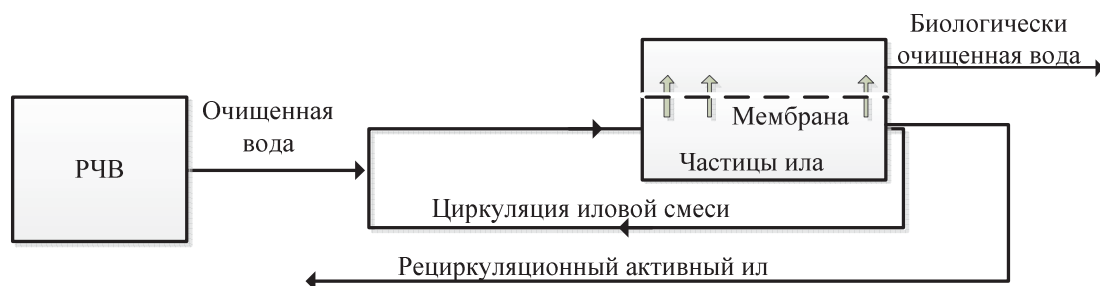


Рис. 3

После промывки очищенной водой проводится цикл химических промывок, при котором в контур циркуляции поочередно подаются и циркулируют по нему различные химические растворы, после чего загрязнения лучше поддаются воздействию и смываются напором чистой воды. Жидкость сливается в РУ, разбавляется водой до безопасных концентраций и возвращается на биоочистку.

Второй способ промывки мембран обычно используется для ультрафильтрационных устройств типа «Эйр-лифт» («Air-Lift», подъем воздуха). Устройства расположены вертикально. Подача воздуха осуществляется через поток иловой смеси. Схема обратной промывки мембран этого типа приведена на рис. 4. При обратной промывке очищенная вода подается в УМ в направлении, обратном направлению фильтрации, так же проводится химическая промывка.

Подсистема обеззараживания является завершающим звеном в технологической линии очистки. В устройстве установлены ультрафиолетовые лампы обеззараживания, обеспечивающие соответствие нормам экологического сброса. В подсистему обеззараживания вода поступает из РУ и МБ в периодическом режиме. Спрессованный осадок может использоваться в качестве удобрений, а вода возвращается в РУ.

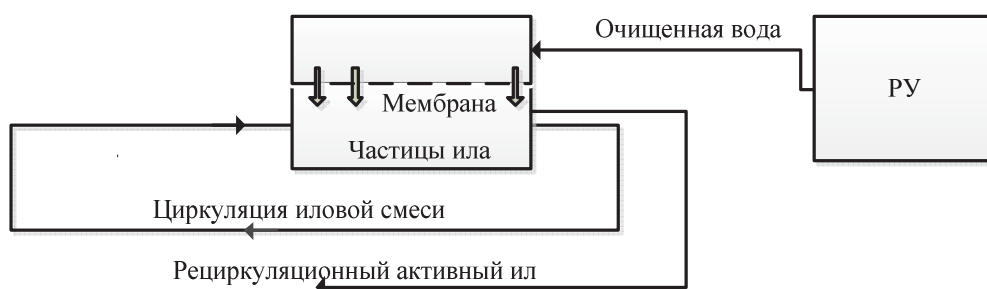


Рис. 4

Биологическая очистка осуществляется в результате непосредственного контакта сточных вод с АИ. Биомасса представляет собой искусственно созданную экосистему, включающую все основные физиологические группы микроорганизмов, обеспечивающие разложение углерода, азота, фосфора, серы и других элементов. В биоценозах АИ развиваются представители микрофлоры: бактерии, грибы, одноклеточные водоросли, растительные жгутиконосцы. Ил также включает простейших и многоклеточных животных: жгутиконосцы, саркодовые, инфузории, черви, коловратки, тихоходки, паукообразные [2].

Собственно биореактор (без УМ) как основной элемент в системе биоочистки представляет собой резервуар прямоугольного сечения, через который протекают сточные во-

ды с АИ. По способу подачи сточных вод реакторы классифицируются на 3 типа: вытеснители (рис. 5, а), смесители с рассредоточенной или центральной подачей и выпуском сточных вод (рис. 5, б) и реакторы промежуточного типа (рис. 5, в) [3].

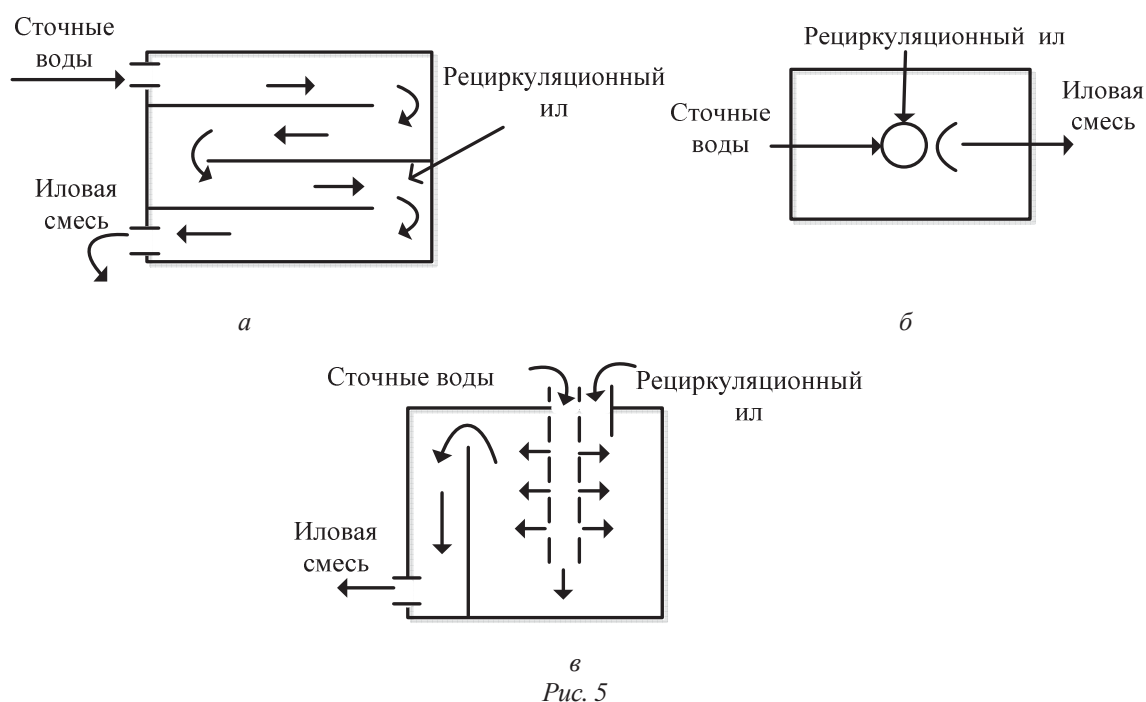


Рис. 5

Реакторы-вытеснители представляют собой резервуары, состоящие из нескольких коридоров, разделенных продольными перегородками, которые не до конца доходят до одной из торцевых стенок. Концентрации загрязняющих веществ и скорости реакций изменяются по длине резервуара. Вначале процесс очистки проходит быстрее, поскольку уменьшается количество субстрата. Такие реакторы применяются при очистке вод сложного состава с большой долей промышленных сбросов.

Реакторы-смесители работают при равномерной скорости процесса очистки и позволяют обеспечить быстрое и полное перемешивание иловой массы и сточных вод. Данный тип используется при очистке промышленных сточных вод с большой концентрацией загрязнений, сходных по составу с бытовыми, а кроме того – при залповых перегрузках системы очистки. Использование смесителей не исключает угрозы вспухания АИ из-за высоких нагрузок на ил во всем объеме резервуара.

К биореакторам промежуточного типа относятся, например, коридорные реакторы с рассредоточенной по длине подачей сточных вод и с впуском АИ в начало коридора. Биореактор промежуточного типа может быть представлен схемой, изображенной на рис. 6 [3]. Резервуар является открытым, имеет прямоугольное сечение и разделен перегородками на технологические зоны, через которые протекают сточные воды с АИ. Концентрация загрязнений уменьшается по длине реактора от входа сточных вод к выходу иловой смеси и очищенной воды. Кроме того, она различна в пределах длины одной зоны.

При первичном заполнении реактора вводится начальная загрузка иловой массы, которая растет в течение определенного времени с начальной загрузкой сточных вод. В каждой зоне устанавливается свой биоценоз благодаря различным условиям аэрации.

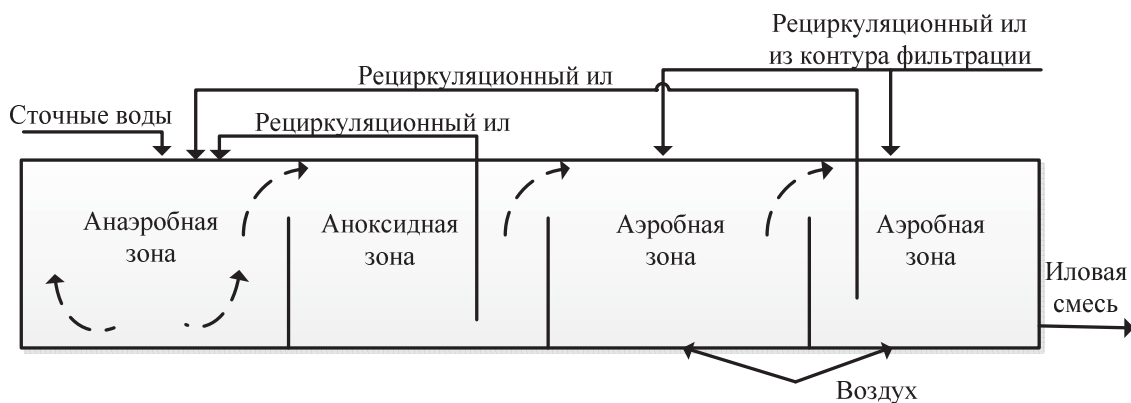


Рис. 6

В первой зоне без принудительной подачи воздуха бактерии-анаэробы извлекают фосфор из воды. В аноксидной зоне проходит процесс денитрификации, осуществляется перемешивание с помощью мешалки и в результате жизнедеятельности анаэробных организмов удаляются нитраты и нитриты. В третьей зоне происходит процесс нитрификации в результате принудительной аэрации и перемешивания, бактерии-нитрификаторы окисляют аммонийный азот. Четвертая зона – аэробная – также предназначена для проведения процесса нитрификации. Чередование аэробных и анаэробных зон осуществляется в различном порядке в зависимости от состава исходной сточной воды. Процессы нитрификации требуют наличия кислорода, а денитрификации и удаления фосфора – его отсутствия, поскольку кислород вызывает гибель бактерий-анаэробов.

Иловая масса постоянно перемешивается, поскольку оседание ила препятствует питанию нижних слоев и дыханию верхних. В результате не удается достичь необходимого качества очистки воды. В зонах, подвергающихся аэрации, воздух вводится посредством компрессора и трубок-аэраторов, установленных на дне зон реактора, что способствует насыщению жидкости кислородом и перемешиванию.

Для дополнительного перемешивания в биореакторе устанавливаются мешалки с электроприводом, работающие в постоянном режиме. Кроме того, рециркуляция иловой смеси между зонами также способствует дополнительному перемешиванию, но основное значение рециркуляции заключается в следующем. На входе в биореактор, где уровень загрязнения максимальный, АИ путем сорбции поглощает органические соединения, окисляет их. В процессе движения иловой массы от входа реактора к выходу происходит питание АИ, снижение загрязнений и повышается способность ила окислять новые загрязнения – бактерии становятся «голодными». Отсутствие рециркуляции будет способствовать гибели иловой массы ввиду отсутствия питания.

Биологическая очистка наиболее эффективна в условиях жизнедеятельности определенных видов культур АИ, их численности и необходимого уровня развития популяций организмов. Основными факторами, влияющими на жизнеспособность АИ, являются следующие: температура иловой смеси в реакторе θ ; наличие необходимого количества питательных веществ C_i , где i – вид загрязнения (нитраты, фосфаты и т. д.); значение pH;

количество растворенного кислорода в иловой смеси C_{O_2} ; начальный состав и качество активного ила C_j^0 (j – группа бактерий активного ила); наличие света J ; возраст ила V ; время реакции t_p ; наличие токсинов в исходной воде C_z (z – вид токсинов).

В соответствии с этими факторами можно выделить процессы, происходящие в биореакторе [1]:

1. Рост и развитие организмов активного ила.
2. Питание иловой массы субстратом, формируемым из загрязнений сточных вод и дополнительной подкормки. В свою очередь для питания необходимы 3 этапа:
 - непосредственный контакт иловой массы и субстрата, обеспечиваемый необходимым перемешиванием;
 - диффузия субстрата через мембрану клетки;
 - химическая реакция внутри клетки ила.
3. Массообмен целевым компонентом (загрязнениями) в сточной воде с активным илом в процессе сорбции.
4. Оксидирование (дыхание) активного ила.
5. Фотосинтез водорослей в составе активного ила.

На рис. 7 приводится функциональная схема биореактора, где приняты следующие обозначения: Q_i^{BX}, C_i^{BX} – расход и концентрация соответственно i -х загрязнений на входе биореактора; $Q_j^{BX1}, Q_j^{BX2}, Q_j^{BX3}, C_j^{BX1}, C_j^{BX2}, C_j^{BX3}$ – расход и концентрации соответственно j -х культур активного ила при рециркуляции иловой смеси в различных зонах; $Q_i^{ВЫХ}, C_i^{ВЫХ}$ – расход и концентрация соответственно i -х загрязнений на выходе биореактора; $Q_j^{ВЫХ}, C_j^{ВЫХ}$ – расход и концентрация соответственно j -х культур активного ила на выходе биореактора; Q_{O_2}, C_{O_2} – расход и концентрация кислорода.

Принимая во внимание всю сложность биохимических процессов, происходящих в МБ, исследования желательнее начинать с простых моделей.

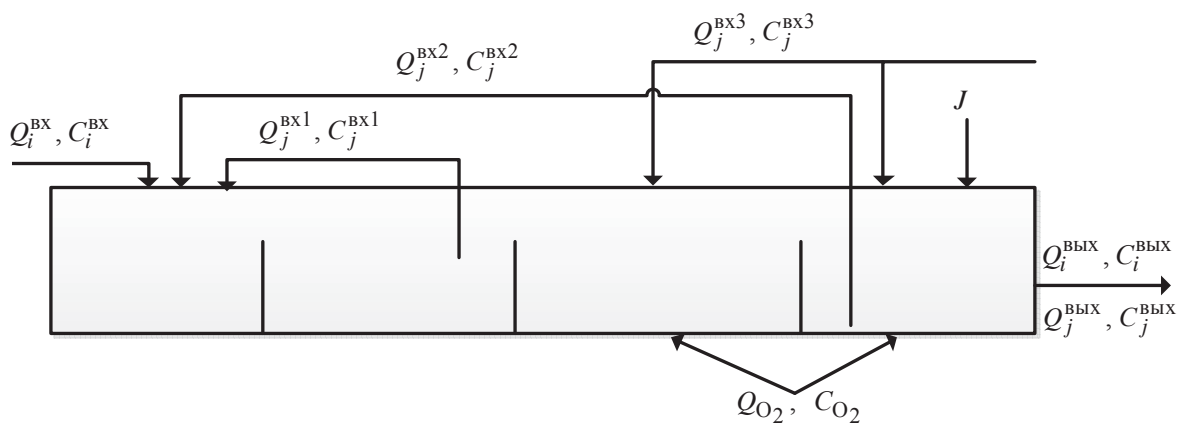


Рис. 7

При построении ММ биохимического процесса оксидирования загрязнений во внимание принимаются следующие допущения: жидкость в реакторе полностью перемешивается (модель идеального перемешивания); концентрации субстрата и иловой смеси неизменны по сечению аппарата; разделение на зоны не учитывается; температура реагента в реакторе принимается постоянной.

В качестве простейшей ММ, описывающей рост биомассы ила при лимитирующем субстрате, можно принять модель Моно [4]:

$$\frac{dC_{и}}{dt} = -\frac{C_{и}}{T} + \frac{\mu_m C_c C_{и}}{K_{C_c} + C_{и}},$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{BX} - C_c}{T} - \frac{\mu_m C_c C_{и}}{Y(K_{C_c} + C_{и})},$$

где C_c – концентрация субстрата; $C_{и}$ – концентрация биомассы ила; $T = V / q$ – период аэрации, V – объем рабочего пространства аппарата, q – расход реагента, поступающего в аппарат; μ_m – максимальная удельная скорость роста биомассы ила; K_{C_c} – константа полунасыщения, равная концентрации субстрата, при которой скорость процесса равна $\mu_m / 2$; $Y = \left| \frac{C_{и}}{C_c} \right|$ – коэффициент трансформации субстрата в биомассу.

Результаты моделирования в виде графиков процессов изменения концентраций субстрата и ила при конкретных технологических параметрах реагирующих потоков представлены на рис. 8. При случайном увеличении концентрации субстрата во входном потоке удельная скорость роста бактерий увеличивается, что в свою очередь приводит к большему потреблению субстрата. Из графиков видно, что качество воды на выходе из реактора неудовлетворительное, поскольку установившаяся концентрация загрязнений в выходном потоке возросла. С возрастанием периода аэрации концентрация субстрата на выходе возвращается к исходному уровню (рис. 9).

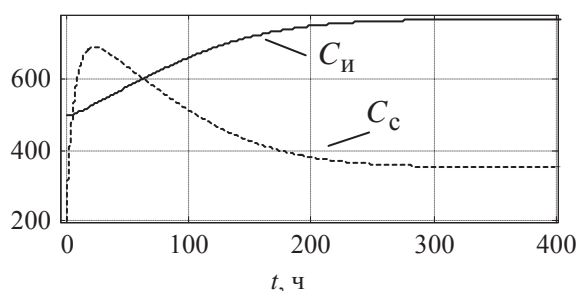


Рис. 8

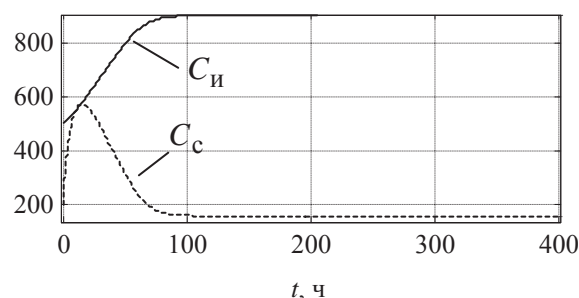


Рис. 9

Исследования показали, что ММ имеет две особые (стационарные) точки: седло ($C_{c1} = 1500, C_{и1} = 0$) и устойчивый узел ($C_{c2} = 351, C_{и2} = 770$). На рис. 10 представлен фазовый портрет модели.

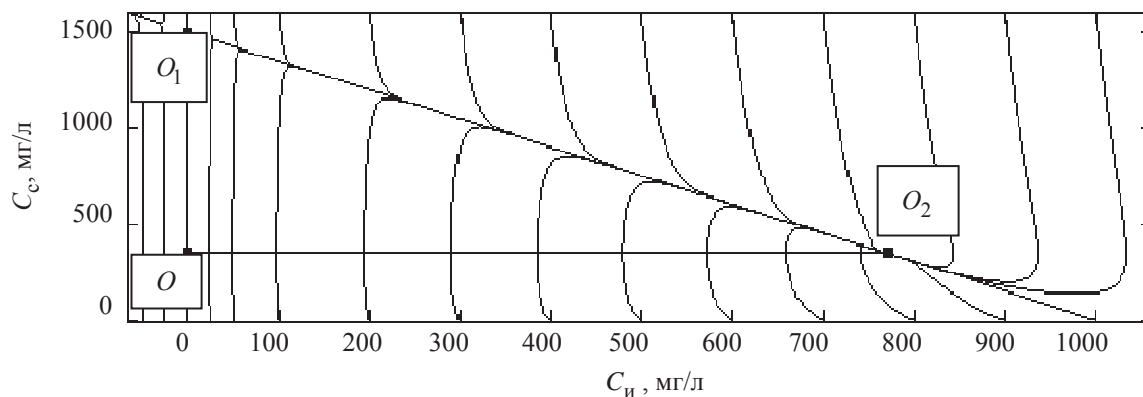


Рис. 10

По фазовому портрету модели Моно можно сделать ряд выводов:

1. Сепаратриса, идущая из седловой особой точки O_1 в узловую точку O_2 , разбивает фазовую плоскость на две области. Все траектории, начинающиеся выше сепаратрисы и заканчивающиеся на ней, характеризуются возрастанием концентрации ила при одновременном убывании концентрации субстрата. Такой характер объясняется тем, что субстрат поглощается илом, вызывая рост последнего. Область траекторий, ограниченная линиями OO_1O_2 , характеризуется увеличением концентрации ила, а область, лежащая ниже линии OO_2 , – уменьшением концентрации ила. В области OO_1O_2 сначала происходит очень незначительный рост ила с увеличением субстрата на выходе, а затем ил начинает активно поглощать субстрат при изменении траектории вдоль сепаратрисы. В области под кривой OO_2 имеющегося субстрата недостаточно для роста ила и вследствие этого концентрация ила убывает. Чем больше начальная концентрация ила, тем интенсивнее происходит его убывание, что заметно по траекториям, расположенным ближе к узлу.

2. Наиболее эффективный режим работы соответствует движению вдоль сепаратрисы, когда $|dC_n / dC_c| = \max$. При этом на одно и то же приращение субстрата приходится наибольший прирост ила из всех траекторий. Крайне неэффективны режимы соответствующие траекториям, подходящим к узлу справа (не вдоль сепаратрисы), поскольку при возрастании субстрата наблюдается незначительный рост ила с последующей убылью (если траектории направлены сверху вниз) либо только его убыль (для траекторий, идущих снизу вверх).

3. Если уменьшать значение периода аэрации, то будет происходить сближение узла с седлом. При критическом значении $T = \frac{K_{C_c} + C_c^{BX}}{\mu_m C_c^{BX}}$ узел совпадет с седловой точкой, превратившись в седло-узел. Корни характеристического уравнения станут равными:

$$\lambda_1 = -\frac{1}{T} = -\frac{\mu_m C_c^{BX}}{K_{C_c} + C_c^{BX}}, \lambda_2 = 0.$$

Дальнейшее уменьшение значения периода аэрации T приводит к исчезновению устойчивого узла и сохранению одной неустойчивой особой точки типа «седло». Это приводит к вымыванию биомассы из реактора, поскольку прирост биомассы не компенсирует ее отток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Н. Б., Грудяева Е. К. Современные сооружения очистки сточных вод от азотно-фосфорных и органических соединений с применением технологии МБР Air-Lift // Водоснабжение и канализация. 2012. № 7–8. С. 90–100.

2. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003.

3. Вавилин В. А., Васильев В. Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод с активным илом. М.: Наука, 1979.

4. Monod J. Rechercher sur la croissance des cultures bacteriennes. Paris: Herman et Cie, 1942.

E. K. Grudyaeva, S. E. Dushin, N. E. Sholmova

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF WASTEWATER TREATMENT WITH THE MEMBRANE BIOREACTOR AS CONTROL OBJECT

The description of technological process of wastewater treatment with use of the membrane bioreactor is represented. The mathematical Monod model of interaction a biomass and substrate in the reactor is investigated

Wastewater, biological treatment, membrane bioreactor, activated sludge, substrate, Monod model

УДК 681.513.1

С. А. Романов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РОБАСТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Рассматривается нелинейный аффинный объект с неопределенными параметрами. Проведен анализ некоторых методов управления, робастно стабилизирующих систему. Показано, что для исследуемого объекта удовлетворительных результатов можно добиться управлением по линеаризованной модели.

Робастная устойчивость, стабилизация, нелинейные системы, параметрическая неопределенность

Проблема управления при наличии неопределенности, в частности параметрической, является в настоящее время одной из центральных в теории управления. В линейном случае существует множество подходов к ее решению: интервальный, H_∞ -оптимизация, μ -синтез, подход на основе линейных матричных неравенств и др. [1]. Для нелинейных систем эффективные методы синтеза при наличии неопределенности в общем случае отсутствуют. Проанализируем на конкретном примере возможные методы синтеза для таких систем.

Рассмотрим систему стабилизации магнитного подшипника [2], описываемую уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{L_0}{m} \left(\frac{(x_3 + I_0)^2}{(k - 2x_1)^2} - \frac{(x_4 + I_0)^2}{(k + 2x_1)^2} \right) \\ - \frac{R_1 (k - 2x_1) x_3}{L_0} - \frac{2x_2 (x_3 + I_0)}{k - 2x_1} \\ - \frac{R_2 (k + 2x_1) x_4}{L_0} + \frac{2x_2 (x_4 + I_0)}{k + 2x_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k - 2x_1}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{k + 2x_1}{L_0} \end{bmatrix} \mathbf{u},$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ – вектор состояния; x_1 – положение ротора; x_2 – скорость ротора; x_3, x_4 – токи; $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ – вектор управления, компонентами которого являются напряжения u_1 и u_2 . Номинальные значения параметров системы: $m = 2$ кг, $k = 2.0125 \cdot 10^{-3}$ м,