

0- 795027

На правах рукописи



**САВДУР СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ  
СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

05. 13. 01. – Системный анализ, управление и обработка информации  
(химическая технология)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2012

Работа выполнена на кафедре статистики, эконометрики и естествознания Института экономики и финансов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
Азимов Юсуф Исмагилович

**Официальные оппоненты** доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электротехники  
и электроники ФГБОУ ВПО  
«Российский химико-технологический  
университет им. Д.И. Менделеева»  
Комиссаров Юрий Алексеевич

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой автоматизации  
технологических процессов и производства  
Нижекамского химико-технологического  
института ФГБОУ ВПО «КНИТУ»  
Елизаров Виктор Иванович

**Ведущая организация** Федеральное казенное предприятие  
ГОСНИИХП

Защита состоится «25» мая 2012 г. в «12» часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.13 при Казанском национальном исследовательском технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А-303).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ

Автореферат разослан «24» апреля 2012 г.



0000807857

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
Д 212.080.13  
д.т.н., профессор

А.В. Клинов

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Остреейшей проблемой для существования человечества является защита водного бассейна от возрастающего объема сбрасываемых загрязненных сточных вод промышленными предприятиями.

Очистка и глубокая очистка технологических стоков является необходимым и обязательным условием сохранения экологического равновесия окружающей среды. Вместе с тем, существующие технологии очистки сточных вод недостаточно совершенны, не обеспечивают должного уровня очистки, требуют развития дальнейших исследований.

Современные установки очистки сточных вод крупных нефтехимических производств являются структурно сложными системами. Особый интерес представляют условия внештатного функционирования таких систем, когда сточные воды имеют динамически изменяющиеся параметры, как по составу, так и интенсивности потока, вплоть до показателей залпового сброса. Эффективность их функционирования можно обеспечить с помощью современных методов обработки информации, применяя методы системного анализа сложных объектов на основе математического описания технологического процесса.

Моделирование и компьютерные эксперименты с моделью-заменителем объекта исследования являются эффективным средством, дающим возможность создавать системы управления и позволяющим рассмотреть поведение объекта во внештатных ситуациях, оценить его структуру и законы управления, а также учесть стохастическую природу возмущающих воздействий. Поэтому системный анализ процесса биохимической очистки сточных вод на основе сетей Петри, позволяющий повысить эффективность процесса биоочистки, является актуальной задачей.

**Цель работы.** Повышение эффективности процесса биохимической очистки сточных вод нефтехимических производств на основе системного анализа.

#### **Задачи исследования:**

1. Исследование на базе системного анализа процессов биохимической очистки сточных вод.
2. Обоснование целесообразности использования математического аппарата теории сетей Петри (СП) для компьютерного исследования.
3. Разработка методики двухуровневого системного моделирования процессов биохимической очистки сточных вод.
4. Построение математической модели процесса биоочистки нефтесодержащих сточных вод в струйно-отстойном аппарате (СОА).
5. Построение математических моделей в виде модифицированной сети Петри систем биоочистки нефтесодержащих сточных вод и технологических стоков полимерных производств, позволяющие исследовать системные связи и законы функционирования установки в целом.
6. Разработка программного комплекса для анализа систем биоочистки рассмотренных производств.

#### **Автор защищает:**

1. Методику системного двухуровневого моделирования сложных промышленных установок очистки сточных вод нефтехимических предприятий.

2. Постановку и формализацию задачи системного анализа функционирования установки очистки сточных вод. Практическую реализацию методики анализа на промышленных объектах.

3. Математическую модель процесса биохимической очистки нефтесодержащих сточных вод в струйно-отстойном аппарате.

4. Математические модели процессов функционирования установки биохимической очистки нефтесодержащих технологических стоков и сточных вод полимерных производств, основанные на использовании математического аппарата модифицированных сетей Петри.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана системная двухуровневая модель для исследования закономерностей функционирования аппарата биоочистки в условиях динамически изменяющихся параметров технологического процесса.

2. Предложен метод исследования системных связей в структуре моделируемого объекта с использованием математического аппарата теории сетей Петри, обеспечивающий устойчивость функционирования объектов и процессов протекающих в установке очистки сточных вод.

#### **Практическая значимость:**

1. Разработан метод структурно-параметрического синтеза процесса биохимической очистки сточных вод, ориентированный на повышение эффективности управления сложными объектами.

2. На основе предложенного метода разработан алгоритм решения задач системного анализа процесса биохимической очистки сточных вод, базирующийся на теории модифицированных сетей Петри.

3. Разработан комплекс программ, реализующий модель процесса СОА и предназначенный для компьютерного моделирования и анализа процесса функционирования струйно-отстойного аппарата, с целью обеспечения очистки сточных вод до предельно допустимой концентрации.

4. Создана программная реализация систем биохимической очистки нефтесодержащих сточных вод и сточных вод полимерных производств, позволяющая анализировать состояния системы биоочистки в целом и прогнозировать развитие внештатных ситуаций.

5. Эффективность предложенной методики апробирована на пилотной установке в цехе нейтрализации и очистки производственных сточных вод ОАО «Казаньоргсинтез», работа которой показала возможность обеспечения очистки сточных вод в условиях оборотного водоснабжения.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Апробация работы.** Результаты работы представлены на XIII Международной конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений» (Казань, 2009), на Итоговых научно-практических конференциях «Социально-экономические проблемы становления и развития рыночной экономики» (Казань, 2008–2011), на V Международной научно-практической конференции «Наука в информационном пространстве» (Днепропетровск, 2009), на Научно-практической конференции и выставке «Инновации РАН – 2010» (Казань, 2010), на XI Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань,

2010), на Международной научно-практической конференции «Инновационные, ресурсосберегающие технологии и оборудование систем водоснабжения и водоотведения» (Казань, 2011), на II Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы анализа и моделирования региональных социально-экономических процессов» (Казань, 2011).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Диссертация содержит 146 страниц основного текста, 58 рисунков, список литературы из 230 источников отечественных и зарубежных авторов.

Автор выражает благодарность профессору Морозову Н.В. за ценные советы и замечания, высказанные в процессе выполнения работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дана характеристика сточных вод нефтехимических предприятий и полимерных производств, выделены основные компоненты загрязнений. Проведен сравнительный анализ методов очистки сточных вод, показана целесообразность использования биологического метода. Описан выбор оптимальных технологических схем очистки сточной воды. Также представлен анализ закономерностей процесса БОСВ (биологическая очистка сточных вод). Рассмотрено аппаратное оформление систем БОСВ. Представлен анализ современных направлений создания систем управления биоочисткой в рамках системного подхода.

Приведен литературный обзор формальных моделей и математических методов исследования дискретных динамических систем (ДДС), к которым относятся и биохимико-технологические системы (БХТС) биоочистки. Представлен сравнительный анализ основных методов моделирования ДДС (алгоритмические модели, конечные автоматы, сетевые модели). Показано, что пока не существует теории, которая могла бы служить единым руководством для моделирования ДДС, и наиболее целесообразно для исследования БХТС использовать сети Петри (СП).

Применение методов системного анализа определяет процедуру разработки системы управления установок очистки сточных вод нефтехимических производств, которая предусматривает составление математической модели на двух уровнях функционирования: нижний уровень – определен аналитической моделью биореактора и направлен на обеспечение очистки сточных вод до предельно допустимой концентрации; верхний уровень – определен записью сетевых моделей – в сетях Петри, что обеспечивает управление потоками в установке.

Верхний уровень технологического процесса очистки сточных вод в промышленных установках рационально может быть описан модифицированными сетями Петри. Для описания системы нами предлагается использование N-схем, опирающихся на математический аппарат сетей Петри, одним из достоинств которого является возможность представления сетевой модели как в аналитической форме с возможностью автоматизации процесса анализа, так и в графической форме с обеспечением наглядности

разрабатываемой модели.

При анализе химико-технологических или биохимико-технологических схем следует учитывать основное ограничение формализма N-схем, которое состоит в том, что они не учитывают временные характеристики моделируемых систем, так как время срабатывания перехода считается равным нулю. Учитывая эти условия, нами предложены модифицированные сети Петри (МСП). Модификация сетей Петри (МСП)- сеть Петри вида  $C = \langle P, T, I, O, M, \tau_1, \tau_2 \rangle$ ,

где  $T = \{t_j\}$  – конечное непустое множество символов, называемых *переходами*, оцениваются исходя из количества условных порций продукции при непрерывной подаче в аппараты технологической схемы.

$P = \{p_i\}$  – конечное непустое множество символов, называемых *позициями*.

В нашем случае - это множество аппаратов технологической схемы;

$I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  – входная функция, которая для каждого перехода  $t_j$  задает множество его позиций  $p_i \in I(t_j)$ .

$O: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  – выходная функция, которая отображает переход в множество выходных позиций  $p_i \in O(t_j)$ .

$M: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  - функция маркировки (разметки) сети, которая ставит в соответствие каждой позиции неотрицательное целое число, равное числу меток в данной позиции, которое меняется в процессе работы сети.

Срабатывание перехода мгновенно изменяет разметку  $M(p) = (M(p_1), M(p_2), M(p_3) \dots M(p_n))$  на разметку  $M'(p)$  по следующему правилу:

$$M'(p) = M(p) - I(t_j) + O(t_j) \quad (1)$$

Запись уравнения (1) означает, что переход  $t_j$  изымает по одной метке из каждой своей входной позиции и добавляет по одной метке в каждую из выходных.

$\tau_1: T \rightarrow \mathbb{N}$  и  $\tau_2: P \rightarrow \mathbb{N}$  функции, определяющие время задержки при срабатывании перехода и время задержки в позиции.

Динамика выполнения МСП определяется движением меток, моделирующих движение дискретных потоков полупродуктов.

Реально, для химико-технологических производств (ХТП), состояние отдельных аппаратов (позиций) технологического процесса, возможно, представить в аналитической и графической форме (таблица 1).

Интерпретация ХТП по показателям перехода по значению входного и выходного потоков определяет условие заполнения или опустошения емкости аппарата (позиции). Принимаем следующие оценочные параметры технологического процесса:

$$V(\tau)_i = V_{0i} - \sum_{j=1}^k I(t_j) + \sum_{j=1}^k O(t_j), \quad (2)$$

где  $V(\tau)_i$  – текущий объем  $i$  – го аппарата технологической схемы;  $V_{0i}$  - полный объем  $i$  – го аппарата технологической схемы;  $j = 1, 2, \dots, k$  ( $k \rightarrow \infty$ ) – индекс дозы потока в интервале времени  $\Delta t$ .

Управление технологическим процессом в условиях динамического изменения параметров техпроцесса (нештатные ситуации по залповому выбросу, аварийный выход из строя отдельных элементов технологической схемы) реализуется, исходя из заданных граничных условий функционирования

установки, в частности, условия переполнения любого из совокупности технологических аппаратов схемы техпроцесса (позиции):

$$V(\tau)_i \leq V_{0i}, \quad (3)$$

Нами были построены модели основных аппаратов, реализующих технологический процесс биоочистки.

Таким образом, рассмотренная модификация сетей Петри позволяет решать следующие задачи:

- 1) анализ функционирования аппаратов системы в условиях нештатных ситуаций;
- 2) анализ переключения управления на сетевом уровне;
- 3) анализ технологических схем дискретно – непрерывных производств для обеспечения устойчивого, стабильного состояния.

**Во второй главе** рассматривается двухуровневая модель технологической схемы установки биоочистки нефтесодержащих сточных вод.

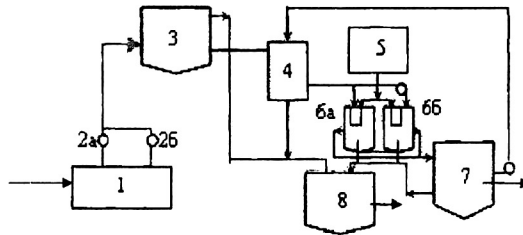


Рис. 1. Структурная схема установки

Структурная схема установки включает (рис. 1): 1 – накопитель стоков, 2а и 2б – насосы, 3 – первичный отстойник, 4 – усреднитель, 5 – емкости для микроорганизмов и биостимуляторов, 6а и 6б – струйно-отстойные аппараты, 7 – вторичный отстойник, 8 – шламонакопитель.

Нами использовался системный подход двухуровневого моделирования, состоящий из моделей на нижнем и верхнем уровнях, что логично характеризует условия анализа динамики функционирования структурно сложных объектов управления.

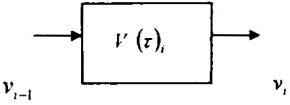
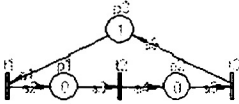
Рассматривается моделирование на нижнем уровне – процесса деструкции углеводов нефти нефтеокисляющими микроорганизмами в струйно-отстойном аппарате.

Сточная жидкость, сбалансированная на стадии подготовки по солям, биогенным элементам, биокатализирующим соединениям, рН, температуре и т.д. с нефтеокисляющими микроорганизмами подается в струйно-отстойный аппарат через струйный элемент.

Технологический процесс биологической очистки нефтесодержащих сточных вод (НСВ) осуществляется в аппарате колонного типа непрерывного действия – струйно-отстойном аппарате. Для построения математического описания структуры потоков в СОА весь объем аппарата условно разделили на три зоны (см. рис 2). 1 – верхняя часть колонны – зона смешения, в которой

реализуется основной процесс разложения углеводов. II – средняя часть аппарата – зона оседания, в которой происходит дальнейший процесс биоочистки сточных вод от загрязнений. III – нижняя часть аппарата – зона отстоя, в которой заканчивается процесс разложения углеводов.

Таблица 1

Технологическая схема аппарата	Модель аппарата в виде сети Петри
<div style="text-align: center;">  </div> <p>где <math>v_{i-1}</math>, <math>v_i</math> - объемная скорость потока на входе и выходе <math>i</math> – го аппарата (<math>\text{м}^3/\text{сек}</math>);  <math>V(t_i)</math>, <math>V_{0i}</math> – полный и текущий объем <math>i</math> – го аппарата (<math>\text{м}^3</math>).  <math>I(t_i) = v_{i-1} \Delta \tau</math>  <math>O(t_i) = v_i \Delta \tau</math>  <math>V(t_i) \leq V_{0i}</math>;</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>p1 – позиция информирующая о текущем объеме порций полупродукта в аппарате;  <math>M(p1) = V_{0i}</math>;  p2 – позиция информирующая о текущем объеме обработанной порции в аппарате;  p3 – позиция информирующая о наличии свободного места в аппарате;  <math>M(p3) = V_{0i} - V(t_i)</math>;  t1 – переход моделирующий загрузку порций полупродукта в аппарат;  t2 – переход моделирующий обработку загруженной порции;  t3 – переход моделирующий выгрузку обработанной порции.</p>

Математическая модель процесса в зоне смешения (I зона) записывается в виде модели идеального смешения:

$$V \frac{dB^{(i)}}{dt} = (B^{(0)} - B^{(i)}) * v + q_b V \tag{4}$$

$$V \frac{dS^{(i)}}{dt} = (S^{(0)} - S^{(i)}) * v - q_s V \tag{5}$$

Начальные условия:

$$B^{(0)} = const, S^{(0)} = const \tag{6}$$

где  $B^{(0)}$ ,  $S^{(0)}$  – концентрация микроорганизмов во входном потоке и в зоне

смешения, соответственно;  $S^{(0)}$ ,  $S^{(1)}$  – концентрация углеводов нефти во входном потоке и в зоне смешения;  $q_B$  – скорость роста микроорганизмов;  $q_S$  – скорость окисления нефти микроорганизмами;  $V$  – объем зоны аппарата;  $v$  – объемная скорость потока.

Кинетические характеристики (параметры) процесса  $q_B$  и  $q_S$  определяются (рассчитываются) по эмпирическим соотношениям:

$$q_B = \frac{m_{\max}SB}{(1 + H^+/K_1 + K_2/H^+)(K_S + S) \exp[(t_{\text{opt}}^0 - t^0)^2/d]} (1 + C_{\text{кам}}/K_{\text{кам1}} + K_{\text{кам2}}/C_{\text{кам}}) - K_d B \quad (7, 8)$$

$$q_S = -\frac{1}{Y_S} \frac{m_{\max}SB}{(1 + H^+/K_1 + K_2/H^+)(K_S + S) \exp[(t_{\text{opt}}^0 - t^0)^2/d]} (1 + C_{\text{кам}}/K_{\text{кам1}} + K_{\text{кам2}}/C_{\text{кам}})$$

где  $m_{\max}$  – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;  $K_d$  – константа скорости отмирания микроорганизмов;  $Y_S$  – коэффициент по субстрату, связывающий количество биомассы и количество ушедшего на ее прирост субстрата (углеводородов);  $K_S$  – константа полунасыщения (константа сродства к субстрату);  $K_1$  и  $K_2$  – константы ингибирования ионами водорода;  $K_1$  описывает ингибирование в кислой области ( $H^+ \gg K_1$ );  $K_2$  описывает ингибирование в щелочной области ( $K_2 \gg H^+$ );  $H^+$  – концентрация ионов водорода;  $t_{\text{opt}}^0$  – значение температуры, оптимальное для развития микроорганизмов;  $t^0$  – текущая температура;  $d$  – температурный диапазон;  $C_{\text{кам}}$  – концентрация биокатализирующих соединений;  $K_{\text{кам1}}$  и  $K_{\text{кам2}}$  – эффективные константы ингибирования – активации в соответствующих областях,  $pK_1$  и  $pK_2$  – константы диссоциации.

Идентификация кинетических параметров скорости реакций  $q_B$  и  $q_S$  осуществлялось на основе обработки данных полученных в лаборатории биотехнологии КГПУ:

$m_{\max} = 0,7$ ;  $K_S = 10$ ;  $pK_1 = 4$ ;  $K_1 = -\lg(pK_1)$ ;  $pK_2 = 9$ ;  $K_2 = -\lg(pK_2)$ ;  $K_{\text{кам1}} = 5$ ;  $K_{\text{кам2}} = 50$ ;  $t_{\text{opt}}^0 = 28^{\circ}\text{C}$ ;  $d$  – от  $14^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ ;  $K_d = 0,02$ ;  $Y_S = 1$ .

Система уравнений (4, 5) решается совместно с уравнениями кинетики биохимического превращения (7, 8) методом Рунге - Кутты.

Математическая модель очистки нефтесодержащих сточных вод во II зоне - зоне оседания, определена условием, что биопроцесс сопровождается постепенным осаждением распыленных частиц потока и предоставляется возможность записи процесса в виде однопараметрической диффузионной модели:

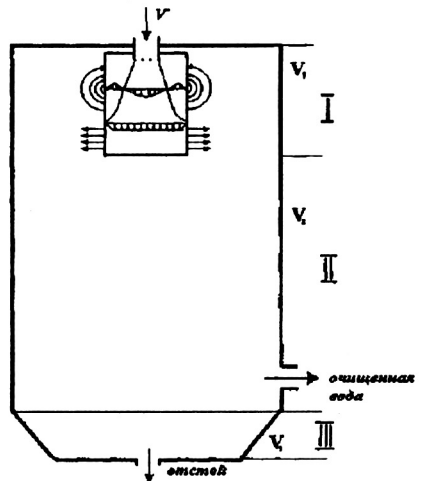


Рис. 2. Струйно-отстойный аппарат

$$f \frac{\partial B^{(2)}}{\partial \tau} = -v \frac{\partial B^{(2)}}{\partial x} + fD_L \frac{\partial^2 B^{(2)}}{\partial x^2} + q_B f, \quad (9)$$

$$f \frac{\partial S^{(2)}}{\partial \tau} = -v \frac{\partial S^{(2)}}{\partial x} + fD_L \frac{\partial^2 S^{(2)}}{\partial x^2} + q_S f, \quad (10)$$

где  $B^{(2)}$  – концентрация микроорганизмов в зоне вытеснения;  $S^{(2)}$  – концентрация углеводов в зоне вытеснения;  $\tau_{cp2}$  – среднее время пребывания элемента потока в зоне вытеснения;  $D_L$  – коэффициент продольного перемешивания в процессе осаждения распыленных частиц потока;  $l$  – длина зоны осаждения;  $v$  – объемная скорость потока НСВ;  $f$  – сечение аппарата.

Сформулируем для данной системы уравнений в области изменения переменных начальные и граничные условия:

$$\tau \in [\tau_{cp1}; \tau_{cp1} + \tau_{cp2}] \quad x \in [0; l],$$

начальные условия:

$$\tau_{cp1} < \tau < \tau_{cp1} + \tau_{cp2}, \\ B^{(2)}|_{\tau=\tau_{cp1}} = B^{(1)}, \quad S^{(2)}|_{\tau=\tau_{cp1}} = S^{(1)}, \quad (11)$$

граничные условия:

$$B^{(2)}(0; \tau) = B^{(1)} \quad S^{(2)}(0; \tau) = S^{(1)} \quad (12) \\ \frac{\partial B}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \quad S^{(2)}(l; \tau) = S^{(2)пл}$$

Коэффициент продольного перемешивания  $D_L$  в безразмерной форме записывается через критерий Пекле:  $P = \frac{D_L}{wL}$ , значение которого эквивалентно пересчитывается через число ступеней ячеечной модели  $m$ :

$$2 \frac{D_L}{wL} = \frac{1}{m}, \quad (13)$$

где  $w$  – линейная скорость;  $L$  – определяющий линейный размер системы.

Экспериментально установлено, что в СОА значение  $m$  соответствует пределу  $m = 20 \div 50$ , тогда:

$$D_L = \frac{2wL}{m} \quad (14)$$

В расчетах кинетики процесса биохимической очистки сточных вод в СОА значение коэффициента  $D_L$  в уравнении однопараметрической диффузионной модели задаем в пределах  $D_L = 10^{-5} \div 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.

Система уравнений (9, 10) решается совместно с уравнениями кинетики биохимического превращения (7, 8). Данная система дифференциальных уравнений, описывающих процесс в зоне оседания, нами была решена методом конечных разностей по неявной схеме.

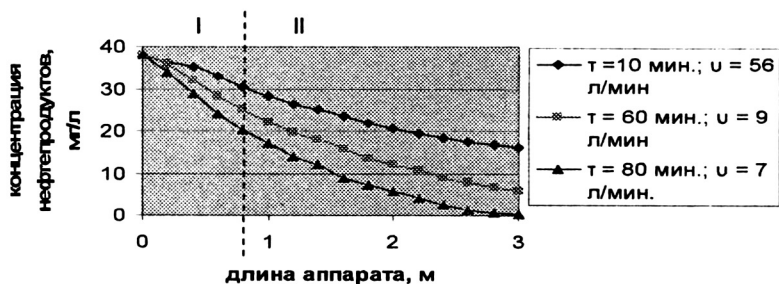
Результаты расчетов по модели представлены на рис. 3, 4.

На рис. 3 представлены расчетные данные кинетики процесса биохимической очистки нефтесодержащих сточных вод при различных скоростях потока. Расчеты показывают, что допустимая степень очистки достигается при скоростях потока в пределах 7 л/мин. При скоростях потока в пределах 7 л/мин увеличивается количество микроорганизмов в 2 раза (рис. 4), что повышает эффективность процесса биоокисления в СОА.

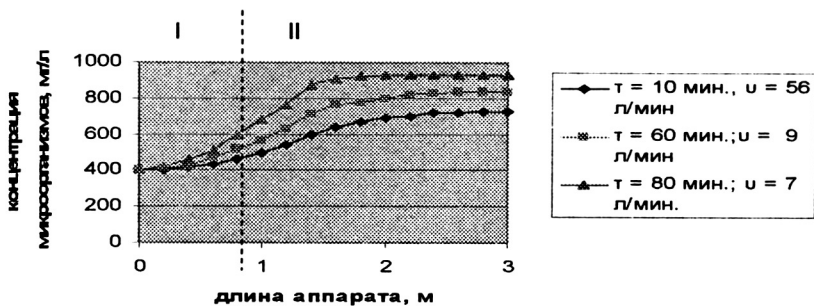
Результаты идентификации математической модели процесса в СОА биохимической очистки сточных вод представлены в таблице 2, рис. 5.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5. показывают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

При  $m_{\max}=0,7$  значение среднеквадратичного отклонения экспериментальных данных от расчетных принимает минимальное значение.



**Рис. 3. Изменение концентрации нефтепродуктов по длине аппарата**



**Рис. 4. Изменение концентрации микроорганизмов по длине аппарата**

Для управления процессом очистки нефтесодержащих сточных вод разработана математическая модель технологической схемы и ее программная реализация.



**Рис. 5. Изменение концентрации нефтепродуктов по длине аппарата**

Математическая модель системы биоочистки нефтесодержащих сточных вод разработана в виде модифицированной сети Петри, выполнение которой позволяет исследовать системные связи и законы функционирования установки в целом.

Были построены модели основных аппаратов, реализующих технологический процесс биоочистки. Из СП моделей типовых аппаратов была синтезирована модель всей установки, граф ее представлен на рис. 6.

С использованием СП-модели нами разработан программный комплекс системы технологического модуля биоочистки нефтесодержащих сточных вод, имитирующей функционирование биоочистки в виртуальном времени.

Средствами SCADA-технологии TRACE MODE разработан программный комплекс системы управления технологическим процессом биологической очистки нефтесодержащих стоков. Существенной особенностью разработанного программного комплекса системы управления технологическим процессом является его способность адаптироваться к технологическому модулю биоочистки любой мощности, как для установки в рамках отдельной бензоколонки или танкера, так и системы водоочистки крупных производств нефтехимии.

На представленной (рис.7) основной экранной форме системы управления БОСВ отображены основные элементы комплекса биоочистки. Система управления технологическим процессом позволяет выполнять следующие действия:

1. диспетчерский контроль основных элементов системы управления (уровень сточных вод, длительность процесса и т. д.);
2. при необходимости остановка системы биоочистки;
3. анализ состояния системы биоочистки в целом и прогнозирование развития внештатных ситуаций.

Работа установки при внештатных ситуациях.

Для надежности устанавливают несколько аппаратов, т.е. если пойдут ливневые стоки, то подключают эти аппараты. В нашем случае два аппарата. В СОА1 происходит окончательная очистка стоков от нефти и получается на выходе чистая вода.

При переполнении сборника в работу включается резервный насос, который отключается при достижении в сборнике нормального объема. При переполнении усреднителя в работу включается СОА2, который также отключается при достижении нормального уровня в усреднителе.

Возможна ситуация когда концентрация нефти недопустимо высока в усреднителе и бактерии не смогут очистить стоки, тогда включается насос для перекачивания оборотного потока и жидкость в усреднителе разбавляется чистой водой.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения концентрации нефтепродуктов

Время, мин	Экспериментальные значения концентрации нефтепродуктов, мг/л	Расчетные значения концентрации нефтепродуктов, мг/л, при $m_{\max}=0,7$
0		38,0
10	26,7	28,5
20		20,2
30	14,4	13,5
40		9,0
50	7,0	6,0
60		2,4
70	1,25	1,2
80		0,2

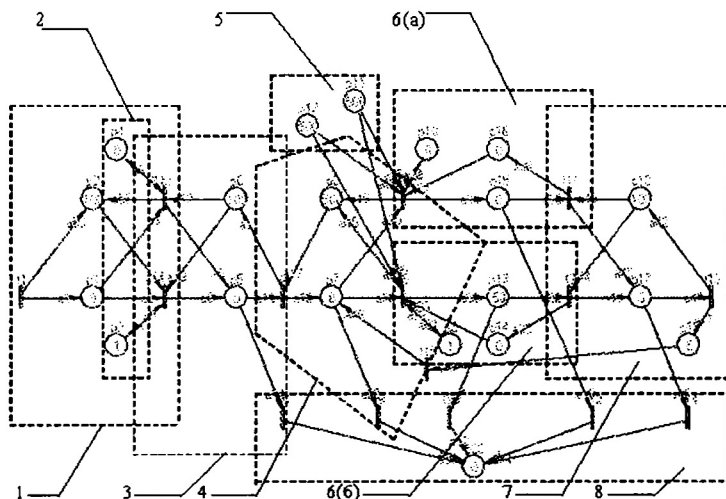


Рис. 6. Модель технологического модуля в виде МСП

Модель технологического модуля в виде модифицированной сети Петри включает: 1 – накопитель стоков, 2 – насосы, 3 – первичный отстойник, 4 – усреднитель, 5 – емкости для микроорганизмов и биостимуляторов, 6а и 6б – струйно-отстойные аппараты, 7 – вторичный отстойник, 8 – шламонакопитель.

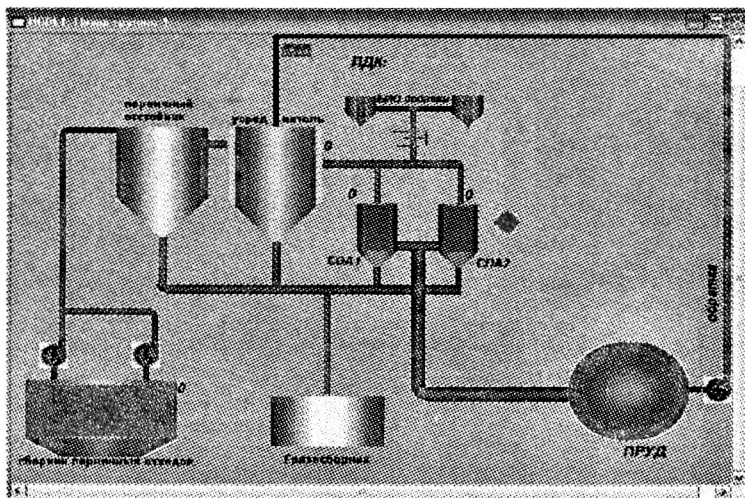


Рис. 7. Основная экранная форма проекта системы управления БОСВ

**В третьей главе** рассматривается процесс биохимической очистки технологических стоков полимерных производств, содержащих органические соединения (рис. 8). Проведен анализ и построены модели в виде сетей Петри (СП-модели) всех основных элементов комплекса биохимической очистки и из них синтезирована общая модель узла биоочистки.

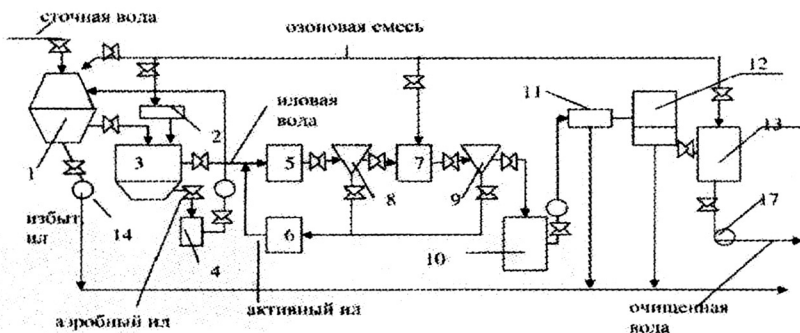


Рис. 8. Принципиальная технологическая схема очистки сточной воды:

1 – реактор-метантенк; 2 – озонатор; 3 – отстойник-осветлитель; 4 – емкость; 5 – аэротенк 1 ступени; 6 – регенератор; 7 – аэротенк 2 ступени; 8 – отстойник первичный; 9 – отстойник вторичный; 10 – резервуар приемный; 11 – микрофильтр; 12 – фильтр с зернистой загрузкой; 13 – резервуар контактный; 14-17 – насосы.

Общая сеть Петри установки биохимической очистки сточных вод полимерных производств представлена на рис. 9.

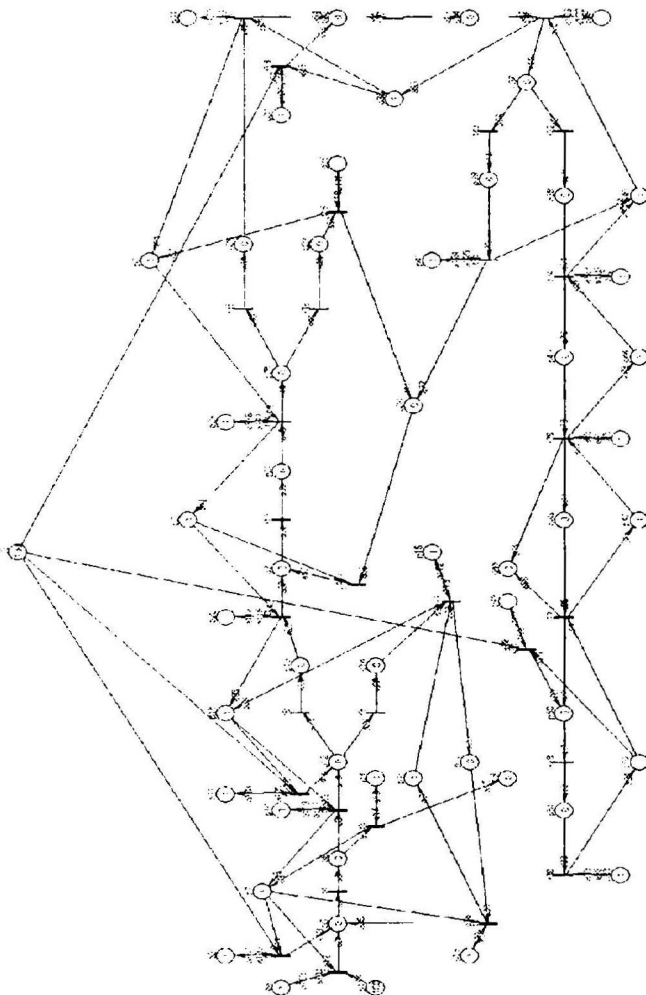


Рис. 9. Общая сеть Петри установки биохимической очистки сточных вод полимерных производств

Таким образом, построена СП-модель комплекса биохимической очистки сточных вод производства полимерного продукта, выполнение которой позволяет исследовать функционирование данного комплекса в условиях различных нагрузок и воздействий, а также проводить анализ управляющих алгоритмов.

С использованием СП-модели был создан программный комплекс системы технологического модуля биоочистки полимерного продукта, имитирующей функционирование гибкого технологического модуля биоочистки в виртуальном времени.

Разработанный программный комплекс апробирован на примере технологического процесса, показав при этом свою эффективность.

**Четвертая глава** содержит описание комплекса программ, позволяющего на базе построенных моделей исследовать функционирование системы биологической очистки сточных вод в условиях различных нагрузок и при различных возмущающих воздействиях.

Программный комплекс состоит из следующих частей:

1. проекта в системе TRACE MODE, реализующего графическое представление состояния системы;
2. программы-эмулятора системы биохимической очистки.

Эмулятор установки биохимической очистки построен на основе сетей Петри. Эмулятор производит пересчёт сети и получает новое состояние установки, находящееся в вершинах сети. По окончании пересчёта значения вершин записываются в файл W0.txt, находящийся в директории проекта. TRACE MODE постоянно сканирует этот файл и отображает в наглядном виде пользователю.

Программа-эмулятор написана на языке программирования «Object Pascal» в визуальной среде программирования Delphi 7.0.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. На основе проведенного обзора основных методов моделирования дискретно-непрерывных биохимико-технологических систем обоснована целесообразность использования аппарата теории сетей Петри для моделирования процессов биохимической очистки сточных вод нефтехимических производств.

2. Предложено использовать модификацию сетей Петри, ориентированную на моделирование и анализ дискретно-непрерывных БХТС, путем включения приоритетных переходов, времени задержки меток в позициях и переходах.

3. Предложена методика двухуровневого системного моделирования технологического процесса биохимической очистки нефтесодержащих сточных вод, определяющая возможность проведения анализа функционирования промышленных установок биоочистки в условиях динамически изменяющихся параметров процесса.

4. Разработана математическая модель процесса биоочистки нефтесодержащих сточных вод в струйно-отстойном аппарате, определяющая функционирование установки очистки нефтесодержащих сточных вод с эффективностью обезвреживания нефтепродуктов до предельно допустимой

концентрации за 1,2 часа очистки, что позволяет интенсифицировать процесс по временному параметру.

5. Построены математические модели функционирования систем биоочистки нефтесодержащих сточных вод и технологических стоков полимерных производств, реализованные в виде модифицированной сети Петри, позволяющие исследовать системные связи и законы функционирования установки в целом. Модели использованы для разработки программных средств, позволяющих анализировать процессы биоочистки ряда производств для обеспечения устойчивого функционирования установок очистки сточных вод.

6. Разработан программный комплекс систем биохимической очистки сточных вод рассмотренных производств, позволяющий анализировать состояния системы биоочистки в целом и прогнозировать развитие внештатных ситуаций.

7. Эффективность предложенной методики апробирована на пилотной установке в цехе нейтрализации и очистки производственных сточных вод ОАО «Казаньоргсинтез», работа которой показала возможность обеспечения очистки сточных вод до норм оборотного водоснабжения и отвода в водные объекты без ущерба их экологического состояния.

#### **Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях**

##### Публикации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Савдур С. Н. Технологический модуль очистки нефтесодержащих сточных вод / С.Н. Савдур, Ю.И. Азимов // Известия КазГАСУ. – Казань: КГАСУ, 2009. № 2 (12). С. 227 – 232.

2. Савдур С.Н., Понкратова С.А. Системный подход в моделировании технологического процесса очистки нефтесодержащих сточных вод. // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КГТУ, 2010. № 7. С. 218 – 226.

##### Прочие публикации по теме научного исследования:

3. Савдур С.Н. Биотехнологические схемы глубокой очистки и доочистки углеводородсодержащих стоков химических, нефтехимических и других отраслей производства на основе применения индуцибельных соединений / С.Н. Савдур, Н.В. Морозов, К.Ш. Давлетгараев // Ученые записки. – Казань: КГФЭИ, 2004. № 17. С. 216 -221.

4. Савдур С.Н. Оборотное водоснабжение на промышленном предприятии // Ученые записки. – Казань: КГФЭИ, 2010. № 20. С. 86 – 89.

5. Савдур С.Н. Об одном подходе к биоочистке технологических стоков // Материалы докладов итоговой научно – практической конференции «Социально – экономические проблемы становления и развития рыночной экономики». - Казань, 2009. - Т. 1. - С. 119 – 122.

6. Савдур С.Н. Оценка эффективности оборотного водоснабжения промышленного предприятия // Материалы докладов итоговой научно – практической конференции « Социально – экономические проблемы становления и развития рыночной экономики». - Казань, 2008. – С. 97 – 99.

7. Савдур С.Н., Морозов Н.В. Системный подход в управляемой очистке и доочистке нефтесодержащих сточных вод с элементами математического

моделирования процесса // Материалы ежегодной научно – практической конференции « Инновации РАН – 2010». - Казань, 2010. - С. 65 – 68.

8. Савдур С.Н. Моделирование и программная реализация управления блочными установками очистки сточных вод // Материалы V Международной научно – практической конференции « Наука в информационном пространстве». - Днепропетровск, 2009. - Т. 1. - С. 13 -16.

9. Азимов Ю.И., Басыров И.Р., Савдур С.Н. Технические, технологические, информационные системы управления эффективностью природоохранной биотехнологии // Сборник научных статей «Природоохранные биотехнологии в XXI веке». – Казань: ТГГПУ, 2010. - С. 50 – 58.

10. Савдур С.Н. Проект АСУТП в производстве полимерных продуктов // XI Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». - Казань, 2010. - С. 169 – 174.

11. Савдур С.Н. Моделирование систем управления биологической очисткой промышленных сточных вод // Материалы докладов итоговой научно – практической конференции « Социально – экономические проблемы становления и развития рыночной экономики». - Казань: КГФЭИ, 2010. – С. 139 – 142.

12. Савдур С.Н. Моделирование системы функционирование аппарата очистки нефтесодержащих сточных вод// Материалы Международной научно – практической конференции «Инновационные, ресурсосберегающие технологии и оборудования систем водоснабжения и водоотведения». - Казань, 2011. – 76 – 79.

13. Савдур С.Н. Региональные проблемы обеспечения оборотного водоснабжения промышленных предприятий// Материалы II Всероссийской научно - практической конференции «Проблемы анализа и моделирования, региональных социально – экономических процессов». - Казань: КГФЭИ, 2011. - С. 273 – 276.

14. Савдур С.Н. Моделирование систем управления биологической очисткой промышленных сточных вод// Материалы итоговой научно – практической конференции «Социально – экономические проблемы становления и развития рыночной экономики». - Казань: КГФЭИ, 2011. – С. 104 – 107.

15. Савдур С.Н. Моделирование системы функционирование опытно – промышленной установки очистки сточных вод нефтехимических производств// Материалы докладов итоговой научно – практической конференции «Современные проблемы глобализации мирового хозяйства и социально – культурного развития человека». - Казань: ИЭиФ КФУ, 2012. - С. 97 – 99.

Подписано к печати 20.04.2012. Формат 60x84 1/16.  
Объем 1,25 п.л. Заказ № 5. Тираж 100 экз.

---

Участок ризографической печати Издательства КФУ.  
420012. Казань, ул. Бутлерова, 4.

