

С. Н. Савдур, С. А. Понкратова

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

*Ключевые слова: сети Петри, нефтесодержащие сточные воды, биоочистка, биodeградация углеводородов.*

*Проводится системный анализ гибкого технологического модуля (ГТМ) биоочистки углеводородсодержащих стоков. Показана целесообразность использования математического аппарата теории сетей Петри при моделировании и проектировании данных ГТМ. Построена модель в виде модифицированной сети Петри и на ее основе разработан программный макет АСУТП глубокой биоочистки технологических стоков от остаточных нефтепродуктов.*

*Keywords: Petri net, oily water effluents, bioremediation, biodegradation of hydrocarbons.*

*Article considers the system analysis of the flexible technological module in treatment of oily water effluents. It shows the expediency in using mathematical Petri network when modeling and designing technological module in oily water effluents treatment. A model in the form of modified Petri network is constructed. This model has become the basis for programmed of automated control system of technological processes for deep bioremediation of water effluents.*

Традиционная схема очистки нефтесодержащих стоков различных отраслей промышленности, включая биохимическое окисление, позволяет снять в очищаемой сточной воде 80–85% исходного загрязнения. Однако остаточное содержание нефти и нефтепродуктов превышает ПДК водоемов, рыбохозяйственного назначения в десятки и несколько десятков раз. Последнее положение не обеспечивает использование очищенных вод в оборотном водоснабжении предприятий или отвода их в естественные водные объекты без ущерба их экологического состояния.

Предложен управляемый биологический метод глубокой очистки и доочистки сточных вод от нефти и нефтепродуктов на основе применения для этой цели совершенных установок (струйно-отстойного аппарата или биореакторов) с использованием в них ассоциации отселектированных групп нефте- и углеводородоокисляющих микроорганизмов.

В соответствии с принципами системного анализа биологическая очистка сточных вод представляет собой сложную биохимическую технологическую систему, включающую совокупность взаимосвязанных потоками аппаратов, каждый из которых имеет свою иерархическую структуру.

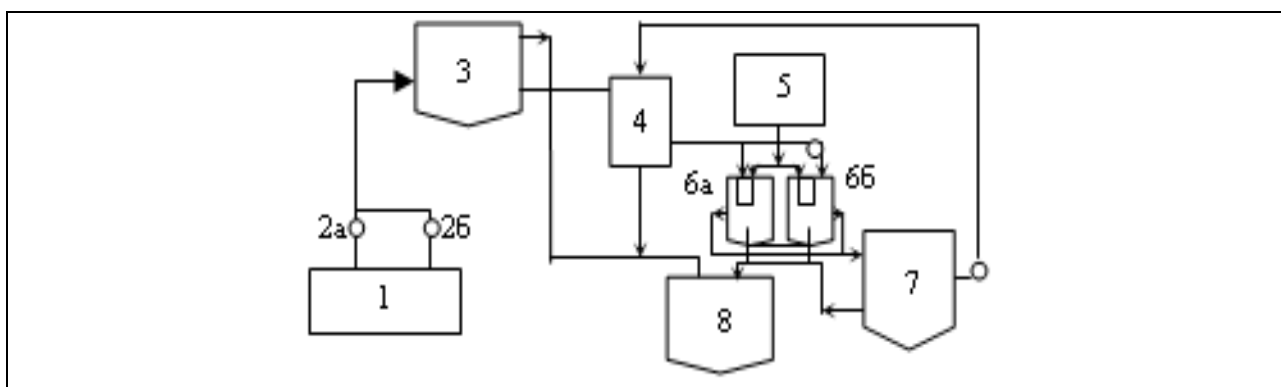
Системный подход предполагает рассмотрение процессов, происходящих в отдельном аппарате, во взаимосвязи с другими аппаратами технологической системы, а также выявление процессов, происходящих на микро – и макроуровнях оказывающих наиболее существенное влияние на конечную цель функционирования системы.

Основной метод системного подхода математическое моделирование.

Моделирование и компьютерные эксперименты с моделью – заменителем объекта исследования, являются эффективным средством, дающим возможность в рамках САПР

(система автоматизации проектных работ) создавать системы логического управления (СЛУ), позволяющие рассмотреть поведение объекта во внештатных ситуациях, оценить его структуру и законы управления, а также учесть стохастическую природу возмущающих воздействий. Моделирование в САПР систем управления позволяет передавать в производство всесторонне проверенные проекты АСУТП БХТП (биохимико-технологических производств).

При создании пилотной блочной установки биологической очистки производственных стоков был нами использован модульный принцип, позволяющий формировать из типового оборудования химических производств гибкие технологические модули переменной структуры (ГТМ) [1]. Технологический модуль биоочистки сточных вод представлен на рисунке 1.



**Рис. 1 – Технологическая схема установки: 1 – накопитель стоков; 2а и 2б – насосы; 3 – первичный отстойник; 4 – усреднитель; 5 – емкости для микроорганизмов и биостимуляторов; 6а и 6б – струйно-отстойные аппараты (СОА); 7 – вторичный отстойник; 8 – шламонакопитель**

Основой системы автоматизированного управления ГТМ очистки производственных сточных вод служит разработанная математическая модель процесса, реализуемого в аппарате биоочистки – струйно-отстойном агрегате (СОА), представляющем аппарат колонного типа с установленным в верхней его части струйным элементом, работающим как разбрызгивающее и перемешивающее устройство, и организованной в нижней его части зоной отстоя. При формализации функционирования СОА для создания адекватной модели процесса были выделены три зоны: рассеивание потока, оседания распыленного потока и отстоя. Ход процесса в первой части аппарата, рассматриваемого нами как модель реактора идеального смешения, а во второй как модель реактора идеального вытеснения, описан системой обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейностью.

В стационарном режиме окисление углеводородов нефти микроорганизмами в струйно-отстойном аппарате описано следующей системой уравнений:

*в зоне струйного элемента (зоне смешения):*

$$B^{(0)} - B^{(1)} + \tau_{cp1} q_B = 0 \quad (1)$$

$$S^{(0)} - S^{(1)} + \tau_{cp1} q_S = 0, \quad (2)$$

где  $B^{(0)}$ ,  $B^{(1)}$  – количество микроорганизмов во входном потоке и в зоне смешения соответственно;  $S^{(0)}$ ,  $S^{(1)}$  – концентрация углеводородов нефти во входном потоке и в зоне смешения;  $\tau_{cp1}$  – среднее время пребывания элемента потока в зоне смешения;  $q_B$  – скорость роста микроорганизмов;  $q_S$  – скорость окисления нефти микроорганизмами;

$$q_B = \frac{m_{\max} S^{(1)} B^{(1)}}{\left(1 + \frac{H^+}{K_1} + \frac{K_2}{H^+}\right) (K_s + S^{(1)}) \exp \left[ \frac{(t_{opt}^0 - t^0)^2}{d} \right] \left(1 + \frac{C_{kam}}{K_{kam1}} + \frac{K_{kam2}}{C_{kam}}\right)} - K_d B^{(1)} \quad (3)$$

$$q_s = -\frac{1}{Y_s} \frac{m_{\max} S^{(1)} B^{(1)}}{\left(1 + \frac{H^+}{K_1} + \frac{K_2}{H^+}\right) (K_s + S^{(1)}) \exp \left[ \frac{(t_{opt}^0 - t^0)^2}{d} \right] \left(1 + \frac{C_{kam}}{K_{kam1}} + \frac{K_{kam2}}{C_{kam}}\right)} \quad (4)$$

$m_{\max}$  – 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 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;  $t_{opt}^0$  – значение температуры, оптимальное для развития микроорганизмов;  $t^0$  – текущая температура;  $d$  – температурный диапазон;  $C_{kam}$  – концентрация биокатализирующих соединений;  $K_{kam1}$  и  $K_{kam2}$  – эффективные константы ингибирования – активации в соответствующих областях.

в зоне оседания распыленных частиц потока (зона вытеснения):

$$\frac{dB^{(2)}}{d\tau} = q_B \quad (5)$$

$$\frac{dS^{(2)}}{d\tau} = q_s, \quad (6)$$

при заданных начальных условиях:

$$\begin{aligned} \tau_{cp1} < \tau < \tau_{cp1} + \tau_{cp2}, \\ B^{(2)}|_{\tau=\tau_{cp1}} &= B^{(1)}, \\ S^{(2)}|_{\tau=\tau_{cp1}} &= S^{(1)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $B^{(2)}$  – количество микроорганизмов в зоне вытеснения;  $S^{(2)}$  – концентрация углеводородов в зоне вытеснения;  $\tau_{cp2}$  – среднее время пребывания элемента потока в зоне вытеснения.

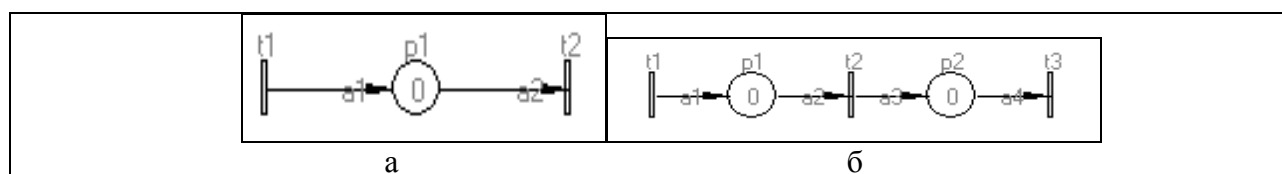
Исходя из экспериментов по периодическому культивированию нефтеокисляющих микроорганизмов для данного СОА, были установлены следующие значения входящих в нее независимых констант:

$m_{\max} = 0,7$ ;  $K_s = 10$ ;  $pK_1 = 4$ ;  $K_1 = -\lg(pK_1)$ ;  $pK_2 = 9$ ;  $K_2 = -\lg(pK_2)$ ;  $K_{kam1} = 5$ ;  $K_{kam2} = 50$ ;  $t_{opt}^0 = 28^\circ\text{C}$ ;  $d$  – от  $14^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ ;  $K_d = 0,02$ ;  $Y_s = 1$ .

Система алгебраических уравнений, описывающая процесс в зоне струйного элемента (в зоне смешения), решается аналитически. Ее решения  $B^{(1)}$  и  $S^{(1)}$  дают значения количества микроорганизмов и концентрации углеводородов на выходе зоны смешения.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процесс в зоне оседания, решается численно методом Рунге-Кутты [2].

Для управления процессом очистки нефтесодержащих сточных вод разработана математическая модель гибкой технологической схемы и программа ее реализации. Математическая модель системы управления установкой биоочистки разработана в виде модифицированной сети Петри, выполнение которой позволяет исследовать функционирование данного комплекса в условиях различных нагрузок и воздействий, а также проводить анализ управляющих алгоритмов. Сеть Петри – это двудольный, размеченный, ориентированный мультиграф. Основой для построения модели любого аппарата является фрагмент сети Петри, представленный на рисунке 2а.



**Рис. 2 – Детализация графа модели аппарата в виде сети Петри**

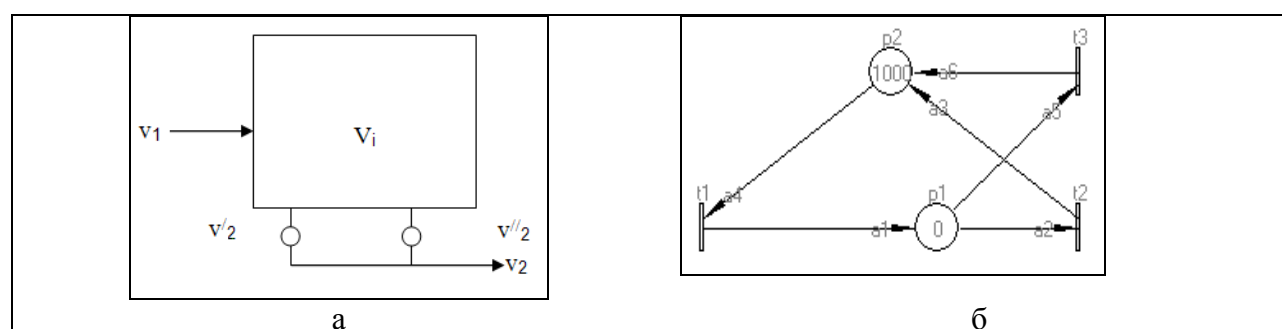
При необходимости детализации состояний аппарата позиция  $p1$  может быть представлена графом, изображенном на рисунке 2б.

В позиции сети помещают метки  $M(p_i)$ , которые естественно интерпретировать как порции полупродукта в аппаратах. Срабатывание перехода  $t1$  моделирует загрузку порций в аппарат, переход  $t2$  соответствует обработке загруженной порции, переход  $t3$  моделирует выгрузку обработанной порции. При необходимости возможна дальнейшая детализация сетевой модели.

Авторами разработана модификация сети Петри, проблемно-ориентированная на исследование дискретно-непрерывных систем – ДН-сети.

В среде САМ (система автоматизированного моделирования) были построены модели основных аппаратов, реализующих технологический процесс биоочистки:

1. *Сборник нефтесодержащих стоков* представляет собой буферную емкость, обеспечивающую сбор, хранение и непрерывную подачу обрабатываемых сточных вод в систему очистки (рис. 3, табл. 1).



**Рис. 3 – Сборник нефтесодержащих стоков: а) технологическая схема б) графическое описание в виде сети Петри**

**Таблица 1 – Описание сборника нефтесодержащих стоков**

Описание технологической схемы	Описание в терминах сети Петри
$v_1$ – интенсивность подачи сточной воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_2$ – интенсивность стока ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v'_2$ и $v''_2$ – резервный и основной насосы; $V_i$ – текущий объем ( $\text{м}^3$ ); $V_0$ – объем аппарата ( $\text{м}^3$ ); $V_i = \int_T v_{1i} d\tau - \int_T v_{2i} d\tau$ ; $V_i \leq V_0$	$p1$ – позиция информирующая о текущем объеме сточной воды в сборнике; $M(p1) = V_i$ ; $p2$ – позиция информирующая о наличии свободного места в сборнике; $M(p2) = V_0 - V_i$ ; $t1$ – переход моделирующий вход в сборник [ $v_1 d\tau$ ]; $t2$ – переход моделирующий основной насос сборника и выход нефтесодержащих стоков из сборника [ $v'_2 d\tau$ ]; $t3$ – переход моделирующий резервный насос сборника [ $v''_2 d\tau$ ];

2. *Первичный отстойник*, его функция – дефлотация крупных капель нефтепродуктов, емкость для грубой очистки нефти – расслоения капель нефти и воды (рис. 4, табл. 2).

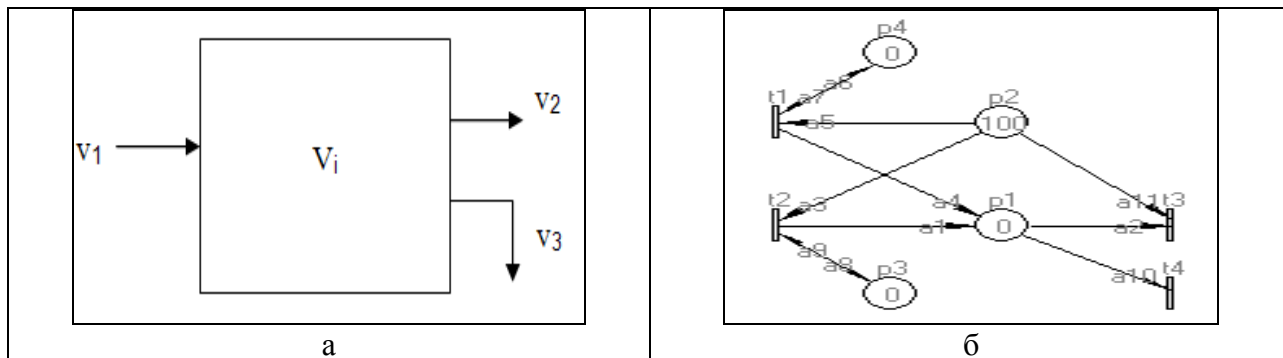


Рис. 4 – Первичный отстойник: а) технологическая схема б) графическое описание в виде сети Петри

Таблица 2 – Описание первичного отстойника

Описание технологической схемы	Описание в терминах сети Петри
$v_1$ – интенсивность подачи сточной воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_2$ – интенсивность стока ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_3$ – интенсивность стока осадка ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $V_i$ – текущий объем ( $\text{м}^3$ ); $V_0$ – объем аппарата ( $\text{м}^3$ ); $V_i = \int_T v_{1i} d\tau - \int_T v_{2i} d\tau - \int_T v_{3i} d\tau$ ; $V_i \leq V_0$ ; $v_1 = v_2 + v_3$ ;	<p><math>p_1</math> – позиция моделирующая первичный отстойник, ее маркировка информирует о количестве стоков в первичном отстойнике; <math>M(p_1) = V_i</math>;</p> <p><math>p_2</math> – позиция информирующая о наличии свободного объема.  <math>M(p_2) = V_0 - V_i</math>;</p> <p><math>t_1</math> – переход моделирующий вход в первичный отстойник от основного насоса [<math>v_1 d\tau</math>];</p> <p><math>t_2</math> – переход моделирующий вход в первичный отстойник от резервного насоса;</p> <p><math>t_3</math> – переход моделирующий выход из первичного отстойника [<math>v_2 d\tau</math>];</p> <p><math>t_4</math> – переход моделирующий вход в шламонакопитель [<math>v_3 d\tau</math>];</p>

3. *Усреднитель* – емкость для сбора эмульгированной нефтью воды (рис. 5, табл. 3).

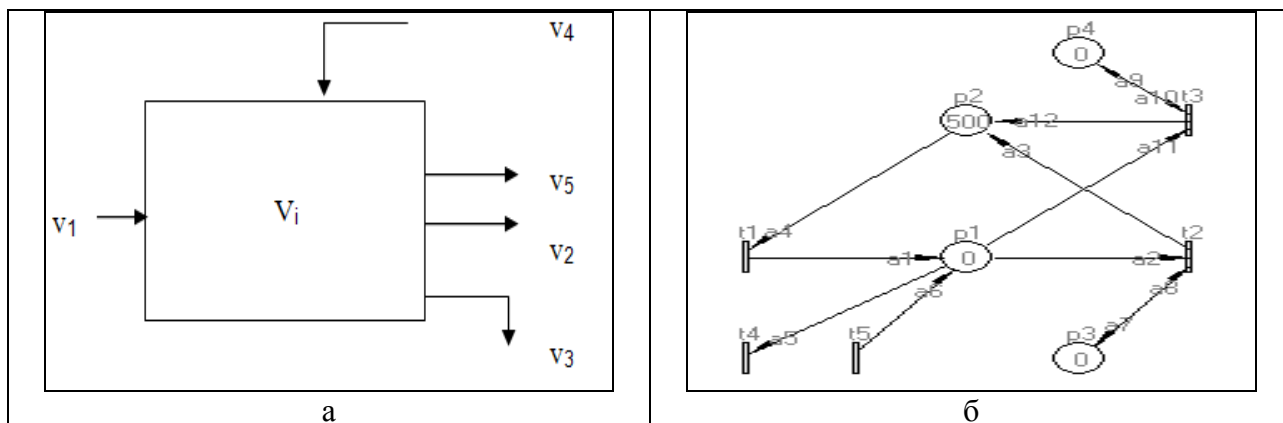


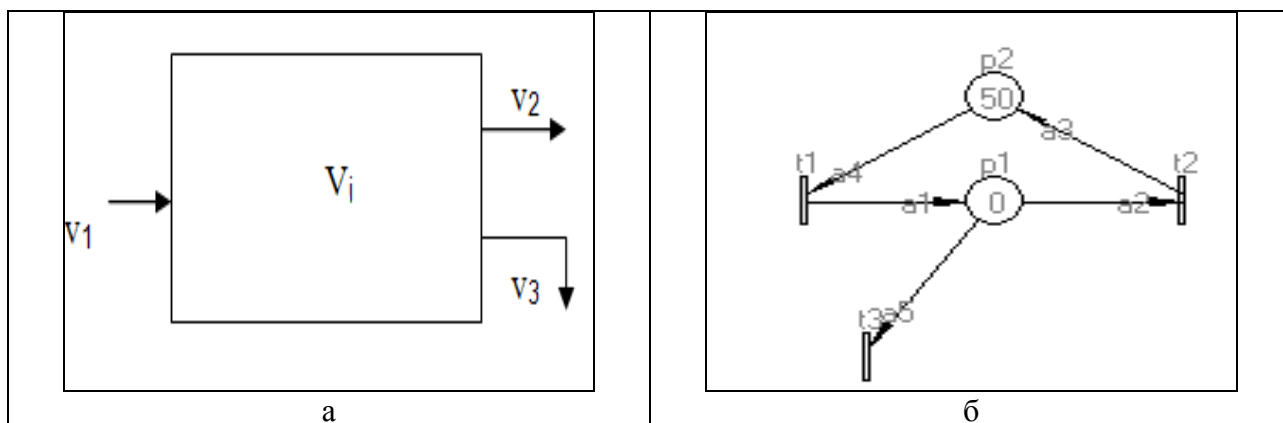
Рис. 5 – Усреднитель: а) технологическая схема б) графическое описание в виде сети Петри

**Таблица 3 – Описание усреднителя**

Описание технологической схемы	Описание в терминах сети Петри
$v_1$ – интенсивность подачи сточной воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_2$ – интенсивность стока в СОА1 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_3$ – интенсивность стока осадка ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_4$ – интенсивность подачи сточной воды из вторичного отстойника ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_5$ – интенсивность стока в СОА 2 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $V_i$ – текущий объем ( $\text{м}^3$ ); $V_0$ – объем аппарата ( $\text{м}^3$ ); $V_i = \int_T v_{1i} d\tau + \int_T v_{4i} d\tau - \int_T v_{2i} d\tau - \int_T v_{3i} d\tau - \int_T v_{5i} d\tau$ ; $V_i \leq V_0$ ; $v_1 + v_4 = v_2 + v_3 + v_5$ ;	<p><math>p1</math> – позиция информирующая о количестве стоков в усреднителе; <math>M(p1) = V_i</math>;</p> <p><math>p2</math> – позиция информирующая о наличии свободного места в усреднителе; <math>M(p2) = V_0 - V_i</math>;</p> <p><math>t1</math> – переход моделирующий подачу стоков из первичного отстойника [<math>v_1 d\tau</math>];</p> <p><math>t2</math> – переход моделирующий подачу стоков в основной СОА1 [<math>v_2 d\tau</math>];</p> <p><math>t3</math> – переход моделирующий подачу стоков в резервный аппарат (СОА2) [<math>v_5 d\tau</math>];</p> <p><math>t4</math> – переход моделирующий выход из первичного отстойника и вход в шламонакопитель [<math>v_3 d\tau</math>];</p> <p><math>t5</math> – переход моделирующий вход в усреднитель из вторичного отстойника [<math>v_4 d\tau</math>];</p>

4. *Струйно-отстойный аппарат (СОА)*. В струйно-отстойном аппарате происходит процесс очистки стоков микроорганизмами. В струйно-отстойном аппарате выделены три зоны: зона струйного элемента, зона оседания, зона отстоя (рис. 6, табл. 4). В струйном элементе создаются оптимальные условия для процесса биоочистки.

В зоне струйного элемента и зоне оседания процесс поступления стоков из усреднителя происходит непрерывно, поэтому моделируем их одним переходом  $t1$ .

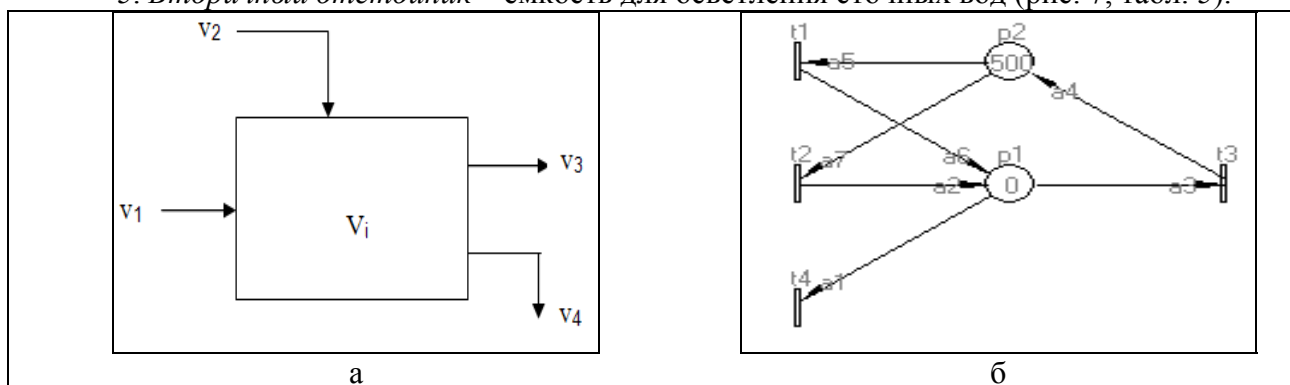


**Рис. 6 – Струйно-отстойный аппарат: а) технологическая схема б) графическое описание в виде сети Петри**

**Таблица 4 – Описание струйно-отстойного аппарата**

Описание технологической схемы	Описание в терминах сети Петри
$v_1$ – интенсивность подачи сточной воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_2$ – интенсивность стока ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_3$ – интенсивность стока осадка ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $V_i$ – текущий объем ( $\text{м}^3$ ); $V_0$ – объем аппарата ( $\text{м}^3$ ); $V_i = \int_T v_{1i} d\tau - \int_T v_{2i} d\tau - \int_T v_{3i} d\tau ;$ $V_i \leq V_0$ ; $v_1 = v_2 + v_3$ ;	<p>p1 – позиция моделирующая струйно - отстойный аппарат;  <math>M(p1) = V_i</math>;  p2 – сигнальная позиция информирующая о наличии свободного объема в струйно – отстойном аппарате;  <math>M(p2) = V_0 - V_i</math>;  t1 – переход моделирующий вход в СОА [<math>v_1 d\tau</math>];  t2 – переход моделирующий выход из СОА [<math>v_2 d\tau</math>];  t3 – переход моделирующий выход из СОА и вход в шламонакопитель [<math>v_3 d\tau</math>].</p>

5. Вторичный отстойник – емкость для осветления сточных вод (рис. 7, табл. 5).



**Рис. 7 – Вторичный отстойник: а) технологическая схема б) графическое описание в виде сети Петри**

**Таблица 5 – Описание вторичного отстойника**

Описание технологической схемы	Описание в терминах сети Петри
$v_1$ – интенсивность подачи сточной воды из СОА1 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_2$ – интенсивность подачи сточной воды из СОА2 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_3$ – интенсивность стока ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $v_4$ – интенсивность стока осадка ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); $V_i$ – текущий объем ( $\text{м}^3$ ); $V_0$ – объем аппарата ( $\text{м}^3$ ); $V_i = \int_T v_{1i} d\tau + \int_T v_{2i} d\tau - \int_T v_{3i} d\tau - \int_T v_{4i} d\tau ;$ $V_i \leq V_0$ ; $v_1 + v_2 = v_3 + v_4$ ;	<p>p1 – позиция моделирующая вторичный отстойник, его маркировка информирует о количестве стоков в аппарате;  <math>M(p1) = V_i</math>;  p2 – сигнальная позиция информирующая о наличии свободного объема во вторичном отстойнике;  <math>M(p2) = V_0 - V_i</math>;  t1 – переход моделирующий вход во вторичный отстойник (выход из СОА1) [<math>v_1 d\tau</math>];  t2 – вход во вторичный отстойник (выход из СОА2) [<math>v_2 d\tau</math>];  t3 – переход моделирующий выход из вторичного отстойника [<math>v_3 d\tau</math>];  t4 – переход моделирующий выход из вторичного отстойника в шламонакопитель [<math>v_4 d\tau</math>]</p>

Таким образом, построена СП-модель комплекса биологической очистки технологических вод от нефтепродуктов, выполнение которой позволяет исследовать функционирование данного комплекса в условиях различных нагрузок и возмущающих воздействий и проводить анализ управляющих алгоритмов.

На основе программного макета средствами SCADA-технологии ТРЕЙС-МОДЕ разработан проект АСУТП биологической очистки технологических стоков. Существенной особенностью разработанного проекта АСУТП является его способность адаптироваться к ГТМ биоочистки любой мощности, как для установки в рамках отдельной бензоколонки, или танкера так и системы водоочистки крупных производств нефтехимии.

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.

Таким образом:

1. В работе рассмотрен, с системных позиций, ГТМ биоочистки нефтесодержащих



2. Показана актуальность и практическая значимость работы.
  3. Системы биоочистки исследованы с единых позиций системного подхода, как системы связанных, иерархически организованных подсистем.
  4. Рассмотрен математический аппарат сетей Петри.
  5. Показана применимость его к моделированию систем управления технологическими объектами, с использованием сетей Петри.
  6. Построены модели типовых аппаратов ГТМ и из них систематизирована модель ГТМ.
  7. На основе модели построен программный макет ГТМ биоочистки нефтесодержащих технологических стоков.
- Существенно, что данный подход применим для широкого класса объектов.

### Литература

1. *Кафаров, В.В.* Гибкие производственные автоматизированные системы химической промышленности / В.В. Кафаров // Журнал ВХО им. Д.И.Менделеева. – 1987. – Т. 32. – № 3. – С. 252 – 258
2. *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
3. *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

---

© **С. Н. Савдур** – сотр. КГТУ; **С. А. Понкратова** - канд. техн. наук, доц. каф. химической кибернетики КГТУ, [kiberponk@front.ru](mailto:kiberponk@front.ru).