



УДК 628.35:665.6

**С.Н. Савдур** – ассистент

**Ю.И. Азимов** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой естественных наук

Тел.: 89047647578

**Казанский государственный финансово-экономический институт (КГФЭИ)**

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается гибкий технологический модуль (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.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сеть Петри, нефтесодержащие сточные воды, биоочистка, биодegradация углеводородов.

**S.N. Savdur** – assistant

**Yu.I. Azimov** – doctor of technical science, professor, head of Natural Science department;

Tel.: 89047647578

**Kazan State Finance and Economics Institute (KSEI)**

## TECHNOLOGICAL MODULE IN TREATMENT OF OILY WATER EFFLUENTS

### ABSTRACT

The article considers 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.

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

### Введение

Нефть и нефтепродукты на современном этапе являются основными загрязнителями внутренних водоемов, вод и морей мирового океана. Попадая в водоемы, они создают разные формы загрязнения: плавающую на воде нефтяную пленку, растворенные или эмульгированные в воде нефтепродукты, осевшие на дно тяжелые фракции и т.д. При этом уменьшается количество кислорода, появляются вредные органические вещества, вода приобретает токсические свойства и представляет угрозу не только для человека. 12 г нефти делают непригодной для употребления тонну воды.

В настоящее время большинство очистных сооружений лишь частично решают проблему обезвреживания технологических стоков. Одним из перспективных направлений водоочистки является управляемая биодegradация углеводородов с использованием индуцибельных соединений. Этим обусловлена актуальность работы.

### Основная часть

На принципе биодegradации базируется технологический модуль биоочистки углеводородсодержащих сточных вод, созданный в НПО “Биотехнология”. При ее создании использовалось переформирование типового оборудования химических производств в технологические модули. Соединяя последовательно и/или параллельно технологические модули, можно построить ГТМ переменной структуры и любой мощности [1]. Технологический модуль биоочистки сточных вод представлен на рис. 1.

Данный комплекс биоочистки состоит из следующих основных элементов:

- накопитель технологических нефтесодержащих стоков (1);
- насосы, подающие нефтесодержащие стоки на биоочистку (2а и 2б);
- первичный отстойник (3), в нем происходит отстаивание, удаление всплывших нефтеотходов;

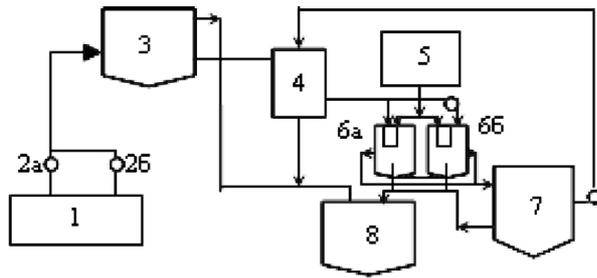


Рис. 1. Технологическая схема установки

- усреднитель (4) – аппарат смешения, в данном аппарате концентрация углеводородов равномерно распределяется по объему;
- емкости для микроорганизмов и биостимуляторов (5);
- струйно-отстойные аппараты (СОА) (6а и 6б);
- вторичный отстойник (7);
- шлакоотстойник (8).

Из усреднителя вода с эмульгированными в ней углеводородными соединениями непрерывно подается в СОА на струйный элемент. Параллельно в этот же поток подаются биогенные элементы из биодезакторов и микроорганизмы. В зоне струйного элемента (зоне смешения) СОА создаются оптимальные условия для биоочистки. Оседая, взвесь переходит в зону вытеснения, где происходит дальнейшее поглощение микроорганизмами углеводородных соединений.

Стоки из аппарата биоочистки сбрасываются во вторичный отстойник. Затем очищенную воду можно использовать в замкнутом контуре как промышленную воду или отводить в водоемы [2].

Системы управления объектами биоочистки сточных вод относятся к классу динамических систем с дискретной и непрерывной составляющей. Для их моделирования и исследования предлагается использовать математический аппарат модифицированных сетей Петри.

Сеть Петри – это двудольный, размеченный, ориентированный мультиграф. Основой для построения модели любого аппарата является фрагмент сети Петри, представленный на рис. 2а.

При необходимости детализации состояний аппарата позиция  $p_1$  может быть представлена графом, изображенным на рисунке 2б.

В позиции сети помещают метки, которые естественно интерпретировать как порции полупродукта в аппаратах. Срабатывание перехода  $t_1$  моделирует загрузку порций в аппарат, переход  $t_2$  соответствует обработке загруженной порции, переход  $t_3$  моделирует выгрузку обработанной порции. При необходимости возможна дальнейшая детализация сетевой модели.

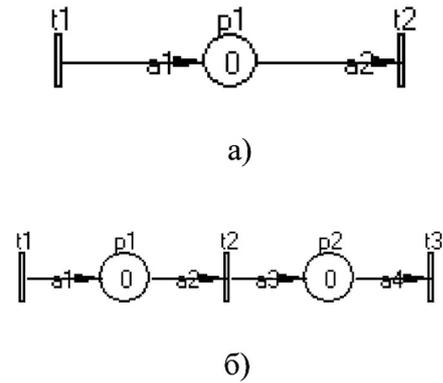


Рис. 2. Детализация графа модели АПД в виде сети Петри

В силу условия неразрывности технологического цикла переход  $t_1$  не должен сработать до срабатывания перехода  $t_3$ . Для реализации данной особенности введем позицию  $p_3$  и дуги из  $p_3$  в  $t_1$  и из  $t_3$  в  $p_3$  (см. табл. 1).

Метка в позиции  $p_3$  реализует условие готовности аппарата к новому технологическому циклу.

Таким образом, построена модель аппарата периодического действия, обрабатывающего одну порцию полупродукта. Срабатывание переходов  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  моделирует технологический цикл аппарата. Аппарат занят, если  $M(p_3) = 0$ ; аппарат готов начать технологический цикл, если  $M(p_3) = 1$ . По графическому описанию строятся матричное и аналитическое описание (см. табл. 1).

Графическое и аналитическое описания СП более наглядны для сетей большой размерности, а матричное описание удобно при программной реализации СП.

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

ДН-сети – модификация сети Петри следующего вида  $C = \langle P, T, I, O, M, L, \tau_1, \tau_2 \rangle$ .

Здесь  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  – множество позиций, моделирующих элементы ГТМ биоочистки: аппараты, агрегаты (или их состояние), буферные емкости, датчики и т.д.

$T = \{t_1^{i1}, t_2^{i2}, \dots, t_m^{il}\}$  – множество приоритетных переходов, моделирующих связи в ГТМ. Переходы в ДН-сети, как правило, моделируют агрегаты непрерывного действия и транспортный конвейер (систему нефтепроводов, трубопроводов, транспортеров и т.д.), связывающий элементы ГТМ.

$M = (M_1, L)$  – вектор маркировки ДН-сети, элементы вектора задаются константой или маркировкой некоторой позиции  $M_1: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\} \cup M_1(p)$ .

Метки интерпретируются как дискретные потоки (энергетические, материальные или информационные).

$L = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  – множество цветов меток маркировки ДН-сети. Цвет метки  $c_j = (e_1, e_2, \dots, e_k)$ ,  $e_i \in E = \{0, 1\}$  – вектор, компоненты которого характеризуют наличие одного из признаков или



Таблица 1

Описание сети Петри

Графическое задание	Аналитическое задание	Матричное задание
	$C0 = \langle P, T, I, O, M0 \rangle$ $P = (p1, p2, p3)$ $T = (t1, t2, t3)$ $I(t1) = \{p3\}$ $O(t1) = \{p1\}$ $I(t2) = \{p1\}$ $O(t2) = \{p2\}$ $I(t3) = \{p2\}$ $O(t3) = \{p3\}$ $M = (0 0 1)$	$\begin{matrix} & & 0 & 0 & 1 \\ I(p, t) = & 1 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 \\ O(p, t) = & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \\ M = & (0 & 0 & 1) \\ M1 = M - I(t1) + O(t1) = & (001) - \\ & (001) + (100) = (100) \end{matrix}$

параметров у метки. «Результирующий» цвет метки в конечной позиции определяет вид потока.

Входная функция I и выходная функция O определяют структуру ДН-сети, а значит, и структуру моделируемой ГТМ.

$I = (I, Ia)$  – входная функция, где

$I: PxT \rightarrow \{0, 1, 2\} \cup M(p)$  – функция, определяющая кратность входных дуг,

$Ia: PxT \rightarrow E$  – функция раскраски входных дуг.

Аналогично определяется выходная функция  $O = (O, Oa)$ .

$\tau1: T \rightarrow N$  – время задержки в переходе и  $\tau2: P \rightarrow N$  – время задержки в позиции, интерпретируемые как время перемещения полупродукта в аппарат и как время обработки полупродукта в аппарате соответственно.

Динамика выполнения ДН-сети определяется движением меток, моделирующих движение дискретных потоков полупродуктов, и реализуется следующими правилами: переход  $t$  является разрешенным, если во всех входных позициях перехода  $t$ , количество цветных меток не меньше, чем кратность входных дуг  $I(t)$  соответствующей данному цвету раскраски  $Ic(t)$ . При срабатывании перехода  $t$  маркировка  $M$  изменяется по следующим правилам: 1) из входных позиций удаляются метки, цвет  $cj = (e1, e2, \dots, el)$  которых совпадает с раскраской входных дуг  $Ia(t) cl$ , количество их определяется кратностью дуг  $I(t)$ ; 2) в выходные позиции помещаются метки в количестве определяемом кратностью выходных дуг  $O(t)$ , при этом операцией логического умножения векторов  $cj = (e1, e2, \dots, el)$  и  $Oa(t)$  формируются результирующие цвета меток в выходных позициях перехода  $t$ ; 3) интерпретация срабатывания перехода проста: в выходные аппараты, определяемые выходными позициями, помещаются полупродукты различных марок, задающиеся цветностью и кратностью выходных дуг [3].

При такой интерпретации ДН-сети выполнение её имитирует функционирование моделируемого ГТМ.

Модель крупного производства может содержать несколько сотен позиций и переходов. Создание ее и отладка модели – чрезвычайно трудная задача. Авторами разработаны методика автоматизированного синтеза /МАС/ моделей производственных систем и инструментарий, существенно ускоряющий процесс моделирования ГТМ – система автоматизированного моделирования (САМ), позволяющая реализовать модель в виде ДН-сети в графическом интерфейсе. Результатом работы САМ являются графическое, аналитическое, а также компьютерно-ориентированное описание ДН-сети, удобное для последующего использования в программном обеспечении АСУ ГТМ.

В среде САМ были построены модели основных аппаратов, реализующих техпроцесс биоочистки.

Первым в цепочке аппаратов находится **сборник технологических стоков**, который представлен в табл. 2а. Сборник представляет собой буферную емкость, обеспечивающую сбор, хранение и непрерывную подачу обрабатываемых сточных вод в систему очистки.

Формализуем функционирование сборника в терминах теории СП:

$r1$  – позиция, информирующая о наличии свободного места в резервуаре;

$r2$  – позиция, информирующая о текущем объеме полупродукта в сборнике;

$t1$  – вход в сборник.

Поскольку выход сборника и насос – дискретно-непрерывные устройства, то рассматриваем их как единый агрегат «сборник-насос». В модели:  $t2$  – основной насос сборника,  $t3$  – резервный насос сборника.

Следующий аппарат ГТМ – **первичный отстаивник** (данный аппарат представлен в табл. 2в), его функция – дефлорация крупных капель нефтепродуктов, емкость для грубой очистки нефти – расслоения капель нефти и воды.

Модели основных элементов ГТМ

Графическое описание моделей основных элементов ГТМ	
<p>а) Сборник технологических стоков</p>	<p>б) Насос</p>
<p>в) Первичный отстойник</p>	<p>г) Усреднитель</p>
<p>д) Струйно-отстойный аппарат</p>	<p>е) Вторичный отстойник</p>

Интерпретируем элементы модели.

Позиция  $p1$  – моделирует сам аппарат, его маркировка информирует о количестве стоков в первичном накопителе.

Позиция  $p2$  – позиция, информирующая о наличии свободного объема.

Переход  $t1$  моделирует вход в первичный накопитель (выход основного насоса).

Переход  $t2$  моделирует вход в первичный накопитель от резервного насоса.

Переход  $t3$  моделирует связь аппарата со следующим в цепочке – усреднителем.

Переход  $t4$  моделирует вход в сборник неочищаемых отходов.

**Усреднитель** – емкость для сбора эмульгированной нефтью воды.

Поскольку функции этих аппаратов одинаковы, решено было объединить их в единый агрегат – усреднитель. Из усреднителя происходит непрерывная подача первично очищенных технологических стоков в СОА.

Построенная модель усреднителя представлена в табл. 2г. Интерпретация элементов модели следующая:

$p1$  – позиция, информирующая о количестве стоков в резервуарах агрегата;



р2 – позиция, информирующая о количестве свободного места в резервуаре.

Переход t1 моделирует подачу стоков из первичного отстойника.

Переход t2 моделирует подачу стоков в основной СОА (СОА1).

Переход t3 моделирует подачу стоков в резервный аппарат (СОА2).

Переход t4 моделирует выход из первичного отстойника и вход в грязесборник.

Переход t5 моделирует вход в усреднитель из вторичного отстойника.

**Основной аппарат ГТМ – СОА.**

В струйно-отстойном аппарате происходит процесс очистки стоков микроорганизмами. Модель СОА представлена в табл. 2д. В струйно-отстойном аппарате выделены три зоны: зона струйного элемента, зона оседания, зона отстоя. 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.

Позиция р1 моделирует зону отстоя и определяет текущее заполнение СОА.

Позиция р2 определяет текущую вместимость зоны отстоя.

Переход t2 моделирует выход из СОА, через который периодически выгружается очищенная вода.

Переход t3 моделирует выход из первичного отстойника и вход в грязесборник.

Вторичный отстойник представлен в табл. 2е.

Позиция р1 моделирует сам аппарат, его маркировка информирует о количестве стоков в первичном накопителе.

Позиция р2 – сигнальная позиция, информирующая о наличии свободного объема в первичном отстойнике.

Переход t1 моделирует вход во вторичный отстойник (выход из СОА1).

Переход t2 моделирует вход во вторичный отстойник (выход из СОА2).

Переход t3 моделирует выход из вторичного отстойника.

Переход t4 моделирует вход в сборник неочищаемых отходов.

Дуги a1 .....a2 определяют порционность потоков из аппарата в аппарат.

Из СП моделей типовых аппаратов была синтезирована модель всей установки, граф ее представлен на рис. 3.

Переход t1 моделирует вход в сборник загрязнённой нефтепродуктами воды.

Позиция р1 моделирует резервуар для сбора загрязнённой нефтепродуктами воды.

Позиция р2 показывает количество свободного места в резервуаре для сбора загрязнённой нефтепродуктами воды.

Петли (t2 р3) и (t3 р4) моделируют насосы.

Переходы t2 и t3 – выходы из резервуара и входы в первичный отстойник.

Позиция р5 моделирует первичный отстойник и степень его заполнения.

Позиция р6 показывает количество свободного места в первичном отстойнике.

Переход t4 моделирует выход из первичного отстойника и вход в усреднитель.

Переход t5 моделирует выход из первичного отстойника и вход в грязесборник.

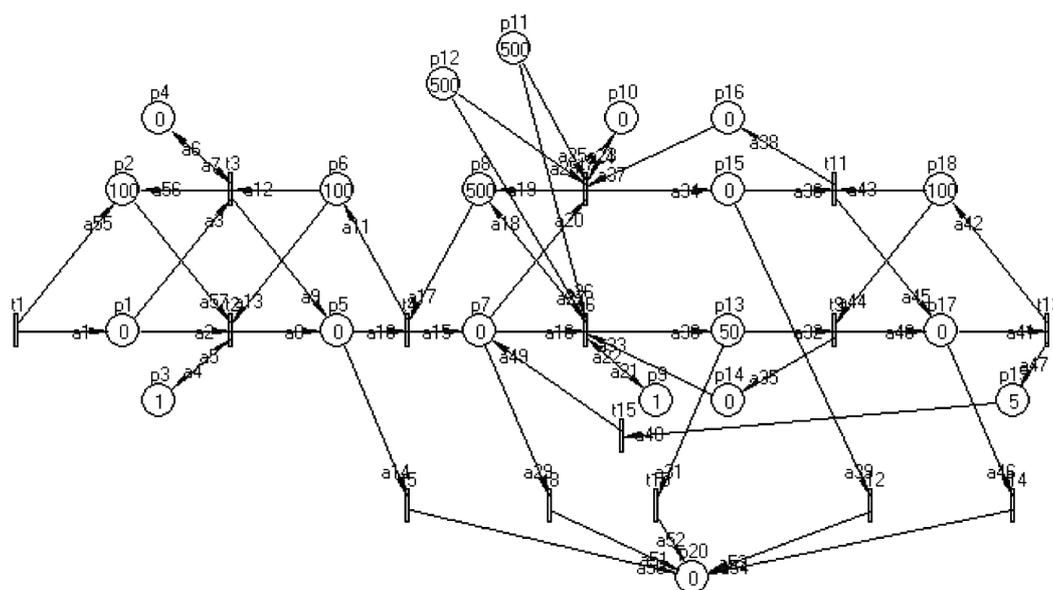


Рис. 3. Модель ГТМ в виде ДН-сети



Позиция р7 моделирует усреднитель и степень его заполнения.

Позиция р8 – позиция, которая показывает свободный объем.

Петли (t6 р9) и (t7 р10) моделируют запорную арматуру.

Переход t6 моделирует выход из усреднителя и вход в СОА1.

Переход t7 моделирует выход из усреднителя и вход в СОА2.

Переход t8 моделирует выход из усреднителя и вход в грязесборник.

Позиция р11 моделирует биодозаторы, добавляемые в СОА1 и СОА2.

Позиция р12 моделируют биостимуляторы, добавляемые в СОА1 и СОА2.

Позиция р13 моделирует СОА1.

Позиция р14 моделирует СОА1 в состоянии ожидания загрузки.

Позиция р15 моделирует СОА2.

Позиция р16 моделирует СОА2 в состоянии ожидания загрузки.

Переход t9 моделирует выход из СОА1 и вход во вторичный отстойник.

Переход t10 моделирует выход из СОА1 и вход в грязесборник.

Переход t11 моделирует выход из СОА2 и вход во вторичный отстойник.

Переход t12 моделирует выход из СОА2 и вход в грязесборник.

Позиция р17 моделирует вторичный отстойник и степень его заполненности.

Позиция р18 – сигнальная позиция, которая показывает количество свободного места во вторичном отстойнике.

Переход t13 – выход из вторичного отстойника.

Переход t14 – выход из вторичного отстойника и вход в грязесборник.

Позиция р19 – насос, который качает воду из вторичного отстойника в усреднитель.

Переход t15 – выход из насоса и вход в усреднитель.

Позиция р20 – грязесборник.

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.

С использованием СП-модели был создан программный макет системы управления гибкого технологического модуля биоочистки, имитирующей функционирование ГТМ биоочистки в виртуальном времени.

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.

При наличии технического обеспечения (устройств связи с объектом и их драйверов) АСУТП может быть использован для управления ГТМ. Таким образом, на конкретном примере показана эффективность использования математического аппарата ДН-сетей, метода программного макетирования и компьютерной имитации при создании программного обеспечения АСУТП биоочистки нефтесодержащих стоков.

### Заключение

1. Таким образом, в работе рассмотрен, с системных позиций, ГТМ биоочистки нефтесодержащих технологических стоков.

2. Показана актуальность и практическая значимость работы.

3. Рассмотрен математический аппарат сетей Петри.

4. Показана применимость его к моделированию систем управления технологическими объектами с использованием сетей Петри.

5. Построены модели типовых аппаратов ГТМ и из них систематизирована модель ГТМ.

6. 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 // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева, 1987, т. 32, № 3. – С. 252-258.
2. Савдур С.Н., Морозов Н.В., Давлетгараев К.Ш. Биотехнологические схемы глубокой очистки и доочистки углеводородсодержащих стоков химических, нефтехимических и других отраслей производства на основе применения индуцибельных соединений // Ученые записки. – Казань: КГФЭИ, 2004, № 17. – С. 216-221.
3. Басыров И.Р. Расширение сетей Петри проблемно ориентированные на моделирование многоассортиментных производственных систем // Ученые записки. – Казань: КГФЭИ, 2001, № 16. – С. 177-182.