

УДК 628.35:665.6

**С. В. Анаников, С. Н. Савдур, Д. И. Басырова**

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРОВ

*Ключевые слова: сеть Петри, биоочистка, сточные воды.*

*Рассматривается технологический модуль биоочистки сточных вод производства полимеров. Показана целесообразность использования математического аппарата теории сетей Петри при моделировании и проектировании данного технологического модуля. Построена модель в виде модифицированной сети Петри и на ее основе разработан программный комплекс системы управления биоочистки сточных вод производства полимеров.*

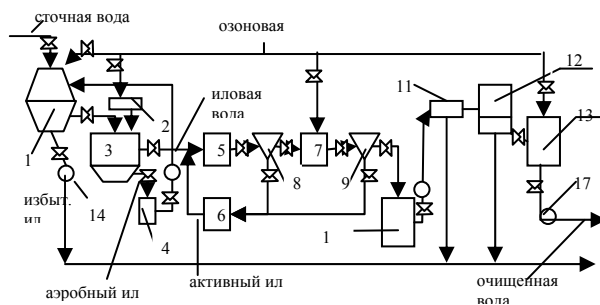
**Keywords:** Petri net, bioremediation, wastewater.

*The article considers flexible technological module of bioremediation wastewater of the polymer product production. 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 of bioremediation wastewater of the polymer product production.*

Технологический процесс производства полимеров сопряжен с образованием значительных количеств сточных вод, которые представляют собой многокомпонентную систему, содержащую растворенные неорганические (например, сульфат натрия) и органические (клей мездровый, декстрин, нитросоединения) вещества. Характер действия соединений на окружающую среду и организм человека различен: от яда, вызывающего изменения в нервной системе, до веществ, оказывающих слабое раздражающее действие. Такие сточные воды не могут сбрасываться без очистки в водоем за периметр предприятия. Обязательным условием сохранения экологического равновесия окружающей среды является их глубокая очистка.

Сточные воды производства полимеров обычно очищаются от содержащихся в них компонентов в ловушках, отстойниках, лабиринтах, фильтрах, а затем сбрасываются как условно — чистые. Особо токсичные вещества подвергаются термическим и химическим методам уничтожения. Однако применяемые в настоящее время установки и методы не всегда эффективны.

Биохимическая очистка является наиболее экономичной и надежной очисткой сточных вод, ведущую роль в которой выполняют живые организмы (бактерии, микроорганизмы, простейшие и др.). В процессе своей жизнедеятельности они используют различные соединения, содержащиеся в сточной воде, окисляя или восстанавливая их. При этом получаются более простые и менее опасные для человека и водных организмов вещества. Хотя способ биохимической очистки уже более ста лет используется для очистки хозяйственно – бытовых сточных вод [1], в производстве полимеров он прошел только промышленную апробацию. Технологическая схема биохимической очистки сточных вод производства полимеров представлена на рис. 1.



**Рис. 1 - 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**

Процесс биохимической очистки протекает в 3 стадии:

- анаэробное восстановление сульфата натрия до сульфида железа и частичное окисление органических примесей;
- аэробное окисление органических примесей;
- доочистка осветленной воды для увеличения степени окисления органических примесей.

Первая стадия протекает в реакторе-метантенке 1, в котором сточная вода перемешивается с активным илом. Параметры процесса: температура 33 – 35<sup>0</sup>C, РН среды 8,0 – 8,5, удельный расход ила 0,07 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> воды. Активный ил представлен классом коловраток, сувоек, ресничными инфузориями. Иловая смесь, выходящая из метантенка, направляется в отстойник - осветлитель 3 для разделения. В отстойнике иловая смесь

обрабатывается озонородушной смесью и разделяется на аэробный ил и иловую воду. Аэробный ил частично возвращается в реактор - метантенк, а избыточный ил выводится из системы и направляется на совместную переработку с осадком из первичных отстойников механической очистки бытовых или заводских сточных вод. Иловая вода направляется на дальнейшую аэробную очистку. Параметры процесса отстаивания: удельный расход озона – воздушной смеси  $0,11 \text{ м}^3/\text{м}^3$  воды, концентрация озона  $0,19 \text{ мг}/\text{дм}^3$ , продолжительность отстаивания 2 ч.

Вторая стадия (аэробная очистка) протекает в две ступени и заключается в аэрации, протекающей через аэротенки смеси сточной воды и активного ила. Аэрация обеспечивает смешивание с кислородом и поддерживает ил во взвешенном состоянии. После аэрации иловая смесь из аэротенка первой ступени 5 направляется в первичный отстойник первой ступени 8. Из отстойника осажженный активный ил через регенератор 6 возвращается эрлифтом в аэротенк первой ступени 5, а осветленная вода поступает в аэротенк второй ступени 7, где смешивается с новой порцией активного ила. Выходящая из аэротенка второй ступени 7 иловая вода направляется во вторичный отстойник второй ступени 9, откуда активный ил через регенератор направляется в аэротенк первой ступени, а очищенная и осветленная вода - на доочистку для увеличения степени окисления органических примесей. В аэротенке второй ступени предусмотрено озонирование иловой смеси.

Для удаления взвешенных частиц активного ила, выносимого из вторичных отстойников, проводится доочистка биохимически очищенных сточных вод на микрофильтрах 11 и в фильтрах с зернистой загрузкой 12. После фильтрации сточные воды направляют в контактные резервуары 13 для обеззараживания воды и подавления развития биохимических обрастаний в системах оборотного водоснабжения. Обработку стоков производят озонородушной смесью. Количественный состав очищенных вод показывает принципиальную возможность использования биохимической очистки в производстве полимеров, а воду – в системе оборотного водоснабжения [2, 3].

Учитывая, вышеизложенное, был разработан математический аппарат системы управления технологическим процессом очистки сточных вод, необходимый в условиях серийного производства продукции, этим обусловлена цель работы.

Система управления всем агрегатом смоделирована с использованием математического аппарата модифицированных сетей Петри. В качестве среды для создания системы управления была выбрана SCADA-система ТРЕЙС МОУД 5.10.

Предлагается подход, основанный на компьютерном моделировании функционирования системы управления. Имитация может строиться на различных математических принципах: алгоритмические модели, теория конечных автоматов, сетевые модели и т.п. Из сравнительного анализа методов моделирования дискретных динамических

систем, к которым относятся производства полимеров, следует, что для моделирования целесообразно использовать математический аппарат теории сетей Петри (СП) [4]. Кстати, аналогичный подход применен в работе [5] при моделировании технологического процесса очистки нефтесодержащих сточных вод.

Как известно, сеть Петри это двудольный ориентированный размеченный граф, аналитически задаваемый кортежем  $S = \langle P, T, I, O, M \rangle$  где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  - множество позиций;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  - множество переходов,  $I$  - входная функция и  $O$  - выходная функция описывающие структуру мультиграфа. Динамические свойства сети Петри определяет вектор  $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  - маркировка СП, изменяемая срабатыванием разрешенных переходов по правилам, задаваемым функциями  $I$  и  $O$ .

С целью усиления моделирующих возможностей сетей Петри была предложена модификация СП (МСП) - расширение проблемно ориентированное на моделирование дискретно-непрерывных химико-технологических систем (ДНХТС).

Модификацией СП - назовем кортеж  $S = \langle P, T, I, O, M, L, F, t_1, t_2 \rangle$ , где

$P = \{p_1, \dots, p_n\}$  - множество позиций, моделирующих элементы ДНХТС (аппараты, буферные хранилища и т.п.).

$T = \{t_1 i_1, t_2 i_2, \dots, t_m i_m\}$  - множество приоритетных переходов, моделирующих связи ДНХТС. Приоритеты определяют технологические маршруты, оптимальные по выбранному критерию.

Маркировка МСП задается как  $M = (M_1, L)$ , где

$M_1: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\} \cup M_1(p)$  - вектор маркировки МСП, элементы которого задаются константой или маркировкой некоторой позиции;

$L = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  - множество цветов меток маркировки.

Метки интерпретируются как дискретные потоки (энергетические, материальные или информационные), множество цветов сети Петри характеризует номенклатуру (ассортимент) выпускаемой продукции, разноцветные метки интерпретируются как различные по физическим свойствам потоки. При функционировании МСП цвет меток может меняться с изменением текущего состояния полупродукта и особенностей технологического маршрута. Конечный цвет метки в позиции-стоке определяет марку продукта.

Входная функция  $I$  и выходная функция  $O$ , определяют структуру МСП, а значит, и структуру моделируемой ДНХТС.

$I = (I, I_c)$  - входная функция, где

$I: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2\} \cup M_1(p)$  - функция, определяющая кратность входных дуг, интерпретируемую как порционность дискретных потоков полупродукта;

$I_c: P \times T \rightarrow N$  - функция раскраски входных дуг; определяющая множество цветов, совместимых с данной дугой. Раскраска дуг выступает как система ограничений - по раскрашенной дуге разрешен

переход лишь тех меток, цвет которых моделирует марку заданного конечного продукта и в аппарат может поступать лишь тот полупродукт, для обработки которого он предназначен. Наличие в одной позиции меток разных цветов будет означать совмещение в отдельном аппарате ДНХТС продуктов различной номенклатуры, что, естественно, недопустимо регламентом.

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

$F: T \rightarrow P$  - функция инцидентности ингибиторных дуг, позволяющих реализовать проверку на ноль. Они связывают только позиции с переходами, на графе их изображают дугами, заканчивающимися маленькими кружочками. Кратность ингибиторной дуги всегда равна 1. Проверка на ноль интерпретируется как анализ состояния аппарата: свободен – ( $F(t)=0$ ) или занят полупродуктом – ( $F(t)=1$ ).

$t1: T \rightarrow N$  - время задержки в переходе интерпретируемые как время перемещения полупродукта из аппарата в аппарат и как время обработки полупродукта в аппарате соответственно.

$t2: P \rightarrow N$  - время задержки в позиции, интерпретируемое как межоперационный простой (ожидание загрузки или разгрузки).

Динамика выполнения МСП реализуется следующими правилами:

Переход  $t$  является разрешенным, если во 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. Из входных позиций удаляются метки, цвет  $c_j$  которых совпадает с раскраской входных дуг  $cI$   $Ic(t)$ , количество их определяется кратностью дуг  $I(t)$ . В выходные позиции помещаются метки в количестве, определяемом кратностью выходных дуг  $O(t)$ , при этом формируются результирующие цвета меток  $cI$   $O_c(t)$  в выходных позициях перехода  $t$ .

Кратность дуг, задаваемая маркировкой позиции  $M(p)$  может модифицироваться в зависимости от изменения маркировки позиции. Если  $M(p)=0$ , то дуга отсутствует.

Таким образом, построена СП-модель комплекса биохимической очистки сточных вод производства полимеров, выполнение которой позволяет исследовать функционирование данной установки в условиях различных нагрузок и воздействий, а также проводить анализ управляющих алгоритмов. Разработан комплекс программ системы управления.

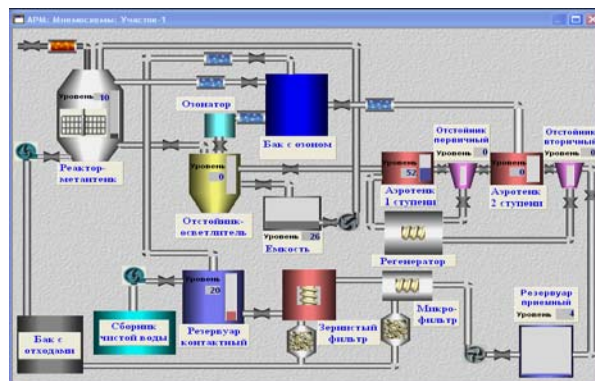
Программный комплекс состоит из следующих частей:

1. проекта в системе Трейс Моуд, реализующего графическое представление состояния системы;

2. программы-эмулятора системы биохимической очистки.

Эмулятор установки биохимической очистки построен на основе сетей Петри. Эмулятор

производит пересчет сети и получает новое состояние установки, находящееся в вершинах сети. По окончании пересчета значения вершин записываются в файл, находящийся в директории проекта. Трейс Моуд постоянно сканирует этот файл и отображает в наглядном виде пользователю. Основная экранная форма системы управления в среде Трейс-моуд представлена на рис. 2.



**Рис. 2 - Основная экранная форма системы управления биоочистки**

Программа позволяет выполнять следующие основные и часто выполняемые действия, вследствие чего, эти действия вынесены на главную форму программы:

1. Остановка и запуск установки.
2. Остановка и запуск пересчета эмулятора.
3. Просмотр отчета о выполненных действиях установки.

## Выводы

1. Показана эффективность использования математического аппарата сетей Петри при моделировании процесса биохимической очистки сточных вод производства полимеров.
2. Разработана математическая модель системы управления процессом биохимической очистки сточных вод, реализованная в виде сети Петри.
3. На основе полученных данных в среде Trace Mode 5.10 разработан проект системы управления комплекса биохимической очистки.
4. Полученные результаты имеют общий характер и могут быть использованы применительно к аналогичным процессам очистки производственных стоков.
5. Разработанный программный комплекс апробирован на примере конкретного технологического процесса, показав при этом свою эффективность.

## Литература

1. Кузнецов С.И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность / С.И. Кузнецов. – Л.: Наука, 1970. – 440 с.
2. Алферова Л.А. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов /

- Л.А. Алферова, А.П. Нечаев. - М.: Стройиздат, 1984. – 154 с.
3. Кочановский А. М. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / А.М. Кочановский, М. А. Клименко. - : Химия, 1983. – 64 с.
4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. - М.: Мир, 1984. – 32 с.
5. Савдур С.Н. Системный подход в моделировании технологического процесса очистки нефтесодержащих сточных вод /С.Н. Савдур, С.А. Понкратава // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2010. - № 7. – С. 218 – 226.

---

© **С. В. Анаников** – д-р техн. наук, проф. каф. химической кибернетики КНИТУ; **С. Н. Савдур** – асс. каф. статистики, эконометрики и естествознания К(П)ФУ, [savdur.svetlana@yandex.ru](mailto:savdur.svetlana@yandex.ru); **Д. И. Басырова** - асп. каф. химии и технологии высокомолекулярных соединений КНИТУ.