УДК 628.35: 667.6

Р. К. Закиров, С. Н. Савдур

СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА

БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЛАКОКРАСОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: сеть Петри, очистка сточных вод.

Рассматривается технологический комплекс биологической очистки сточных вод (БОСВ) лакокрасочного производства. Предложено использовать модификацию сетей Петри (МСП), ориентированную на моделирование и анализ дискретно-непрерывных БХТС, путем включения приоритетных переходов, времени задержки меток в позициях и переходах. Построены модели основных аппаратов, реализующих технологический процесс БОСВ.

Keywords: Petri net, wastewater treatment.

The technological complex of biological wastewater treatment (BWWT) paint products. Proposed to use a modification of Petri nets that focuses on modeling and analysis of discrete-continuous BITS, by including priority crossings, the delay time of the labels in the positions and transitions. Built models of the main devices that implement the BWWT-process

Экологическая безопасность является одной из необходимых задач при обеспечении функционирования и дальнейшего развития промышленности лакокрасочного производства, дающего до 10% общего количества промышленных загрязнений, в частности, особенно, если оно расположено вблизи жилых районов. Сточные воды, образующиеся в производственном цикле и при мойке, содержат примеси сырья, соединений, выделяющихся при производстве (например, акролеин), полупродукта и конечного продукта: растворители (кетоны, сложные эфиры, сольвенты, растворители на основе нефтепродуктов), пластификаторы (например, малеиновый и фталевый ангидрид, бутанол), пеногасители, ПАВ (жирные кислоты), консерванты (формальдегид), пигменты, сиккативы, антикоррозионные добавки (тяжелые металлы, например, свинец и марганец), и другие наполнители. ХПК стоков лакокрасочного производства достигает 10 тыс. мг/дм³. Все это приводит к риску токсического поражения (раздражение слизистых оболочек, наркотическое действие), а также вызову канцерогенных и мутагенных эффектов [1].

В связи с разнообразием выпускаемой продукции стоки даже одного лакокрасочного предприятия могут сильно различаться по составу компонентов, что приводит к разнообразию возможных способов их очистки, таких как отстаивание, нейтрализация кислотами, коагуляция, снижение температуры, высокое давление, использование магнитного поля, электролиз, ультразвук, озонирование. Но наиболее выгодным с точки зрения надежности очистки и экономии является биологический метод, который опирается на использование природных закономерностей биохимической и физиологической очистки водных ресурсов. Загрязняющие вещества, находящиеся в сточных водах, используются выведенными селекцией микроорганизмами в качестве источника энергии и конструктивного материала для роста биомассы, при этом происходит распад сложных органических соединений до более простых и менее опасных веществ [1].

Современные лакокрасочные производства ориентированы на модернизацию и внедрение автоматизированных, ресурсо- и энергосберегающих технологий, учитывающих экологические требования, во все стадии производства, включая стадию очистки сточных вод. Создание многоуровневых технологических схем является необходимым для повышения качества и эффективности очистки концентрированных сточных вод. Детальный анализ технологических, биохимических и гидродинамических процессов, протекающих при функционировании очистных комплексов, необходимый для оптимизации работы, улучшения конструкций очистных сооружений, длительной и безопасной эксплуатации, требует адекватного описания изучаемой структуры, которая может рассматриваться как сложная кибернетическая система [2].

Применение методов системного анализа определяет процедуру разработки системы управления установки биологической очистки сточных вод лакокрасочного производства, которая предусматривает составление математической модели на основе сетей Петри (СП) [3], что обеспечивает управление потоками в установке.

Технологическая схема рассматриваемой в данной статье установки биологической очистки сточных вод лакокрасочного производства представлена на рис.1 [1].

Рассматриваемый биотехнологический процесс совмещает анаэробный и аэробный методы. Технологическая схема процесса состоит из нескольких последовательных стадий: на первой физикохимической стадии сточные воды проходят флотационную очистку для выделения твердых частиц и коллоидных взвесей, после чего начинается ступень биоочистки. На второй стадии проходит предварительная подготовка стоков путем анаэробного окисления органических загрязнений высокой концентрации специально культивируемыми бактериями. В рассматриваемом процессе используются денитрифицирующие и десульфатирующие бактерии, соответственно использующие нитрат и сульфат в процессе анаэробного метаболизма в качестве конечно-

го акцептора электронов, здесь происходит деструкция органических веществ и химическое связывание ионов тяжелых металлов. Для окислительной реакции в процессе анаэробного дыхания через промежуточную емкость вносятся нитраты калия и аммония. Эта стадия протекает в трех анаэробных биореакторах суммарным объемом 750 м³, отходы которых в виде осадка активного ила, содержащего нерастворимые сульфиды тяжелых металлов собираются в шламонакопители и подаются на флотацию. При общем объеме стоков предприятия, поступающих на очистку, доходящем до 2000 м³ в сутки продолжительность этой стадии составляет 9 часов. Применение ступени анаэробной очистки служит для энергоэффективности и экономичности процесса. Дальше сточные воды поступают на более качественную и глубокую аэробную очистку, в два последовательно подключенных биореактора интенсивного обмена объемом по 250 м³. Необходимая аэрация проводится через воздуходувку воздухом, обогащенным техническим кислородом. Также для повышения скорости процесса, надежности очистки, устойчивости к токсикантам, метаболической активности, уменьшения прироста биомассы, уменьшения размеров биореакторов в конструкции биореакторов используются волокнистые насадки, к которым прикрепляются микроорганизмы-деструкторы. Носители иммобилизованных микроорганизмов варьируются в зависимости от вида загрязняющих веществ и служат для защиты микроорганизмов от резкой смены абиотических факторов, таких как температура, рН, влияющих на протекание процесса. Через 4 часа обрабатываемые воды поступают на аэробную доочистку в биореакторы того же суммарного объема, расположенные параллельно. Многосекционность служит для повышения массообмена. Затем вся масса воды поступает в биореактор с олиготрофными микроорганизмами, завершающими минерализацию органических соединений в условиях их низкой концентрации. Последняя стадия – это отстаивание в резервуаре очищенной воды, объем которого составляет 600 м³, после чего идет сброс воды, удовлетворяющей после проведенной очистки нормам ПДК, в канализационную систему [1].

Техпроцесс в рассматриваемом комплексе биологической очистки стоков лакокрасочного предприятия может быть представлен временными и раскрашенными сетями Петри, которые являются удобным, адекватным и наглядным инструментом анализа эффективности эксплуатации комплекса, его контроля и дальнейшего усовершенствования.

Для поддержки оптимального режима протекания процесса биохимической очистки сточных вод лакокрасочного производства и возможности оперативного реагирования при различных видах нарушений разработана математическая модель установки в виде МСП и ее программная реализация, результатом которой является принятие решений об осуществлении управляющих воздействий на основе поступающей информации о состоянии моделируемого комплекса биоочистки [4]. Построены также модели основных компонентов установки (табл. 1). Из СП-моделей отдельных биореакторов и аппаратов была составлена общая модель установки (рис. 2), которая в свою очередь может быть интегрирована в качестве готового модуля в схему работы всего производства.

Аналитическое описание общей сети Петри (рис.

```
P = (p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8, p9, p10, p11, p12,
p13, p14, p15, p16 p17, p18, p19, p20, p21, p22, p23,
p24, p25, p26, p27)
```

T = (t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9, t10, t11, t12, t13,t14, t15, t16, t17)

```
O(t1) = \{ p1*1 \}
O(t2)=\{ p2*1 p3*1 \}
O(t3) = \{ p4*1 p5*1 \}
O(t4) = \{ p6*1 p7*1 \}
O(t5)=\{ p8*1 p9*1 \}
O(t6) = \{ p10*1 p11*1 \}
O(t7) = \{ p12*1 p13*1 \}
O(t8) = \{ p14*1 p15*1 \}
O(t9) = \{ p14*1 p17*1 \}
O(t10) = \{ p14*1 p21*1 \}
O(t11) = \{ p14*1 p19*1 \}
O(t12) = \{ p16*1 p23*1 \}
O(t13) = \{ p18*1 p23*1 \}
O(t14) = \{ p20*1 p23*1 \}
O(t15) = \{ p22*1 p23*1 \}
O(t16) = \{ p24*1 p25*1 \}
O(t17) = \{ p26*1 \}
I(t1) = \{ p2*1 \}
I(t2)=\{ p1*1 p4*1 \}
I(t3)=\{ p3*1 p6*1 \}
I(t4)=\{ p5*1 p8*1 \}
I(t5)=\{ p7*1 p10*1 \}
I(t6)=\{ p9*1 p12*1 p27*1 \}
I(t7)=\{ p11*1 p14*1 p27*1 \}
I(t8)=\{ p13*1 p16*1 p27*1 \}
I(t9) = \{ p13*1 p18*1 p27*1 \}
I(t10) = \{ p13*1 p22*1 p27*1 \}
I(t11)=\{ p13*1 p20*1 p27*1 \}
I(t12)=\{ p15*1 p24*1 p27*1 \}
I(t13)=\{ p17*1 p24*1 \}
I(t14)=\{ p19*1 p24*1 \}
I(t15)=\{ p21*1 p24*1 \}
I(t16)=\{ p26*1 p23*1 \}
I(t17)=\{ p25*1 \}
```

где $T = \{t_i\}$ – 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: PxT → {0, 1} – входная функция, которая для каждого перехода t_i задает множество его позиций p_i $\in I(t_i)$.

О: РхТ→ {0, 1} – выходная функция, которая отображает переход в множество выходных позиций $p_i \in O(t_i)$.

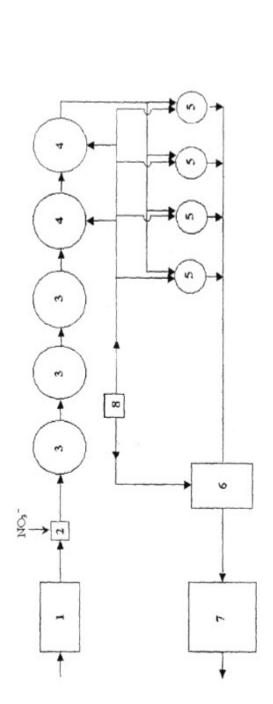


Рис. 1 - Технологическая схема установки биологической очистки сточных вод лакокрасочного производства: 1 - флотатор, 2 – промежуточная емкость, 3 – анаэробные реакторы, 4 – аэробные биореакторы I ступени, 5 – аэробные биореакторы II ступени, 6 – зоореактор, 7 – накопитель очищенной воды, 8 –

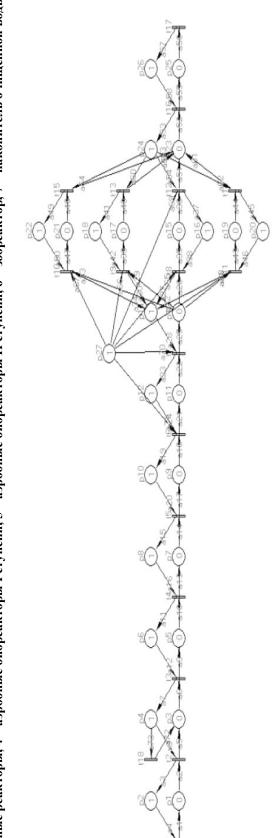


Рис. 2 - Модель технологического модуля биологической очистки сточных вод лакокрасочного производства в виде МСП

М: $P \to \{1, 2, 3...\}$ - 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 [5].

На основе СП-модели, а также с помощью SCADA-технологии TRACE MODE авторами разработан программный комплекс, моделирующий в режиме виртуального времени работу рассматриваемой установки и позволяющий управлять техпроцессом очистки стоков лакокрасочного производства [6].

Использование программного продукта позволяет диспетчеру контролировать основные элементы системы управления, останавливать комплекс по биологической очистке сточных вод лакокрасочного производства и анализировать его состояние как в процессе текущей эксплуатации, так и в целях предотвращения возникновения внештатных ситуаций [7]. К возможным видам нарушений при работе комплекса, отслеживаемым системой управления, относятся плохое осветление стоков при неправильной дозировке коагулянта во флотаторе; отсутствие воздушных пузырьков во флотаторе, недостаточная концентрация кислорода в аэробном биореакторе при нарушении подачи воздуха; повышенное содержание метана, выделяемого в процессе анаэробного дыхания; чрезмерное повышение температуры и избыточная биомасса активного ила при аэробном процессе; превышение нормы загрязнений вследствие увеличенного расхода сточных вод, вынос активного ила с очищенной водой, переполнение аппаратов.

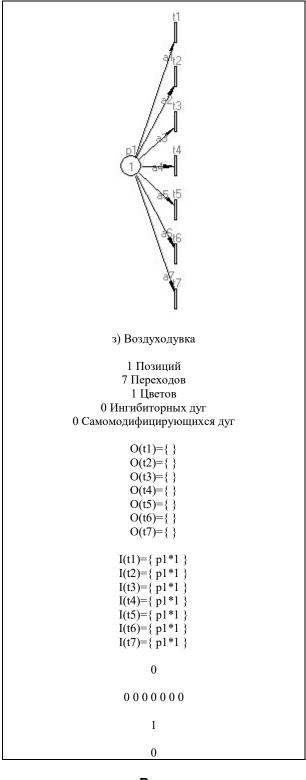
Таблица 1 - Модели основных элементов технологического модуля

Графическое описание моделей основных элементов		
технологического модуля		
p2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 2 1 2 3 1 2 3 1 3 1		
2 Позиций 2 Переходов 1 Цветов 0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирующихся дуг O(t1)={ p1*1 } O(t2)={ p2*1 }	б) Промежуточная емкость 2 Позиций 3 Переходов 1 Цветов 0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирующихся дуг	
$I(t1) = \{ p2*1 \} $ $I(t2) = \{ p1*1 \} $ $0 0$	O(t1)={ p1*1 } O(t2)={ p2*1 } O(t3)={ p1*1 }	
0 0	$I(t1)=\{ p2*1 \}$ $I(t2)=\{ p1*1 \}$	

0 1	I(t3)={ p2*1 }
0 0	0 0
	0 0 0
	0 1
	0 0
в) Анаэробные реакторы	p2 1 1 2 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
2 Позиций 2 Переходов 1 Цветов	г) Аэробные биореакторы I ступени (1)
0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирую- щихся дуг O(t1)={ p1*1 } O(t2)={ p2*1 }	2 Позиций 3 Переходов 1 Цветов 0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирующихся
$I(t1) = \{ p2*1 \}$ $I(t2) = \{ p1*1 \}$ $0 0$	дуг $O(t1) = \{ p1*1 \}$ $O(t2) = \{ p2*1 \}$ $O(t3) = \{ p1*1 \}$
0 0 0 1	$I(t1) = \{ p2*1 \}$ $I(t2) = \{ p1*1 \}$ $I(t3) = \{ p2*1 \}$
0.0	0 0
	0 0 0
	0 1
	0 0
p2 1 -8 14 1 -8 12 1 -8 12 1 -8 12 1 -8 15	е) Аэробные биореакторы II
д) Аэробные биореакторы I ступени (2) 2 Позиций 6 Переходов	ступени 2 Позиций 3 Переходов 1 Цветов 0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирующихся
1 Цветов 0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирую- щихся дуг	O(t1)={ p1*1 } O(t2)={ p2*1 } O(t3)={ p1*1 }

O(t1)={ p1*1 } O(t2)={ p2*1 } O(t3)={ p1*1 } O(t4)={ p2*1 } O(t5)={ p2*1 } O(t6)={ p2*1 } I(t1)={ p2*1 } I(t2)={ p1*1 } I(t3)={ p2*1 } I(t4)={ p1*1 } I(t5)={ p1*1 } I(t6)={ p1*1 } O 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	I(t1)={ p2*1 } I(t2)={ p1*1 } I(t3)={ p2*1 } 0 0 0 0 0 0 1 0 0
ë) Зоореактор 2 Позиций 6 Переходов 1 Цветов О(t1)={ p1*1 } О(t2)={ p2*1 } О(t3)={ p1*1 } О(t6)={ p1*1 } I(t1)={ p2*1 } I(t2)={ p1*1 } I(t2)={ p1*1 } I(t3)={ p2*1 } I(t4)={ p2*1 } I(t5)={ p2*1 } I(t6)={ p2*1 } I(t7)={ p2*1 } I(t8)={ p2*1 } I(t8	ж) Накопитель очищенной воды 2 Позиций 2 Переходов 1 Цветов 0 Ингибиторных дуг 0 Самомодифицирующихся дуг O(t1)={ p1*1 } O(t2)={ p2*1 } I(t1)={ p2*1 } I(t2)={ p1*1 } 0 0 0 0 0 1 0 0

0 0



Выводы

- 1. Построена математическая модель технологического процесса биологической очистки сточных вод лакокрасочного производства, реализованная в виде модифицированной сети Петри, позволяющая проводить анализ влияния внешних параметров и внутренних взаимосвязей на эффективность функционирования установки.
- 2. Разработан программный комплекс, имитирующий работу установки биологической очистки сточных вод лакокрасочного производства, для анализа и оптимизации штатного режима работы установки и оперативного проведения корректировок с

целью недопущения развития внештатных ситуаций.

Литература

- 1. Долина Л.Ф. Современная технология и сооружения для очистки нефтесодержащих сточных вод: Монография / Л.Ф Долина. Днепропетровск: Континент, 2005. 296с.
- 2. 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.
- 3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. М.: Мир, 1984. 32 с.
- Савдур С.Н., Понкратова С.А. Системный подход в моделировании технологического процесса очистки

- нефтесодержащих сточных вод. Вестник технологического университета 2010; 7:218 226.
- 5. Анаников С.В., Савдур С. Н., Басырова Д.И. Технологический модуль очистки сточных вод производства полимеров. Вестник Казанского технологического университета, Т. 15, № 6, 2012, С. 121 125.
- Закиров Р.К., Савдур С. Н. Сетевое моделирование комплекса биохимической очистки сточных вод предприятий химической промышленности производства акриловой кислоты и ее производных. Вестник технологического университета, Т. 18, № 10, 2015, С. 199 - 202.
- 7. Анаников С.В., Азимов Ю.И., Савдур С. Н. Разработка систем управления оборотного водоснабжения в нефтехимических производствах. Вестник Казанского технологического университета, Т. 16, № 2, 2013, С. 136 130

[©] Р. К. Закиров – канд. техн. наук, доцент каф. промышленной биотехнологии КНИТУ; С. Н. Савдур – канд. техн. наук, доцент каф. экономико-математического моделирования Института управления, экономики и финансов К(П)ФУ, savdur.svetlana@yandex.ru.

[©] R. K. Zakirov – PhD, KNRTU; S. N. Savdur – PhD, KFU, savdur.svetlana@yandex.ru.