

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ

ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрена управляемая технология, основанная на усовершенствованных окислительных процессах, направленная на решение экологических проблем, связанных с антропогенным воздействием промышленных вод, загрязненных фенолами, на водные объекты. Исследованы механизмы физико-химических процессов, приводящих к деструкции органического загрязнителя в водной среде. Определено достаточное количество источников излучения, обеспечивающих полное окисление загрязнителя.

Введение

Проблема очистки промышленных вод, содержащих трудно окисляемые органические соединения, является одной из острых проблем для большинства производственных комплексов России. В технологических схемах очистки промышленных вод от фенольных и других органических загрязнителей, реализованных на многих предприятиях химической, металлургической, горнодобывающей, фармацевтической, целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности, используется обработка стоков коагулянтами и флокулянтами. Это приводит к объемному образованию осадков, солевого содержания, а также не обеспечивает доведение уровня органических загрязнителей до предельно допустимого (ПДК), что определяет высокую степень риска загрязнения водных объектов при сбросе неочищенных вод [1, 2]. Создание эффективных, экономически рациональных и ресурсосберегающих технологий очистки промышленных стоков от трудно окисляемых органических соединений продиктовано требованием к обеспечению экологической безопасности поверхностных и подземных водных объектов. Современным и высокоэффективным методом удаления органических загрязнителей, содержащихся в промстоках, являются процессы, основанные на использовании свободных радикалов в качестве окислителей,

Э.М. Соколов*,

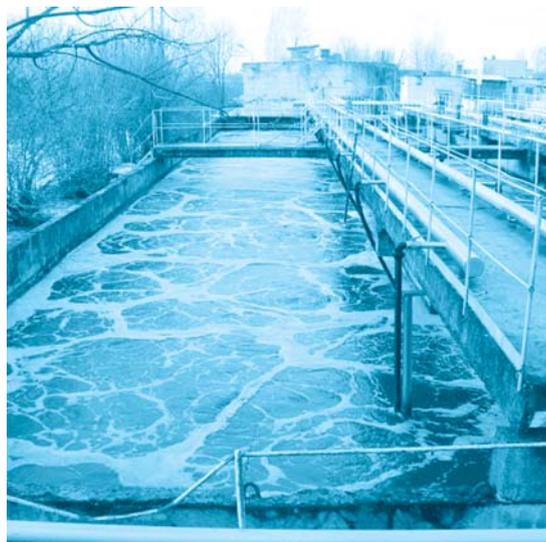
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Аэрология, охрана труда и окружающей среды», ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Л.Э. Шейнкман,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Аэрология, охрана труда и окружающей среды», ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Д.В. Дергунов,

магистр техники и технологии, аспирант кафедры «Аэрология, охрана труда и окружающей среды», ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»



получившие название усовершенствованных окислительных процессов (Advanced Oxidation Processes – AOP) [3]. Технология очистки, основанная на AOP процессах, представляет собой управляемую систему оптимального дозирования окислителей в зону окисления.

Материалы и методы исследования

Определение параметров AOP процессов основывается на экспериментальных исследованиях по выявлению механизма воздействия окислителей – перекиси водорода и хлорида железа (III) в присутствии ультрафиолетовой активации на уровень снижения концентрации фенольного загрязнителя (бисфенол-А, ВРА) в модельных растворах с применением жидкостной и газовой хроматографии, атомной абсорбции и других методов. При проведении экспериментов был использован фотохимический реактор, состоящий из стеклянного цилиндра и УФ лампы ($\lambda=365$ нм). Концентрации

* Адрес для корреспонденции: eliard@yandex.ru

ВРА измерялись жидкостным хроматографом LC-MS/MS, продукты полураспада определялись с помощью газового хроматографа GS-MS [4]. ВРА представляет собой кристаллическое вещество белого цвета, обладает всеми химическими свойствами фенолов, токсичен. Эмпирическая формула $C_{15}H_{16}O_2$. ПДК в водоемах 0,01 мг/л [5, 6].

В процессе проведения эксперимента, осуществляемого в соответствии с построенной матрицей оптимального планирования (табл. 1) [7], сравнивалось воздействие УФ-излучения и окислителей на интенсивность разложения органического загрязнителя в модельном растворе при различных концентрациях ВРА – x_1 (50 мкг/л, 100 мкг/л); перекиси водорода H_2O_2 – x_2 (100 мг/л, 200 мг/л) и хлорида железа (III) (1; 2 г/л) – x_3 . Пробы отбирались через 1 и 2 ч после облучения (время облучения $t - x_4$), и измерялась остаточная концентрация ВРА (переменная состояния – y).

Результаты и их обсуждение

Анализ экспериментальных данных, проводимый в программной среде Statistica v.6.1, позволил идентифицировать модель вида (1):

$$C_{ост} = \exp \left(\begin{array}{l} -0,080788 + 0,971642 \ln C_{ВРА} - 0,069869 \ln C_{H_2O_2} - \\ -0,156662 \ln C_A - 0,203063 \ln t \end{array} \right), \quad (1)$$

где: $C_{ост}(t)$ и C_0 – остаточная и начальная концентрации фенольного загрязнителя, соответственно, мг/л; $C_{H_2O_2}$ – концентрация перекиси водорода, мг/л; CA – концентрация хлорида железа (III), г/л; t – время, ч.

Значения скорректированного коэффициента детерминации, близкого к единице ($R^2_{корр} = 0,999$), а также коэффициента множественной корреляции ($R = 0,99981$) показывают, что вариация факторов на 99,9 % объясняет вариацию остаточной концентрации ВРА. Значимость коэффициента детерминации подтверждается с 99 %-ной вероятностью, поскольку критическое значение критерия Фишера $F_{кр}$ не превышает расчетного значения для регрессионной модели ($F_{кр}(0,01;4,11) = 5,67 < F = 7292,13$). На основе t -критерия Стьюдента установлена значимость оценок параметров модели (1) на уровне $\alpha = 0,01$, свободного члена на уровне $\alpha = 0,05$ (модули t -критерия $t_1 = 164,7$; $t_2 = 11,8$; $t_3 = 26,6$; $t_4 = 34,4$ превышают критическое значение $t(0,99;11) = 2,72$, а модуль t -критерия для свободного члена $t_0 = 2,4 > t(0,95;11) = 1,79$). О 99 %-й достоверности модели (1) экспериментальным данным свидетельствует при-

надлежность оценки дисперсии ошибок наблюдений 99 %-му доверительному интервалу ($S_2 = 6,7 \cdot 10^{-5} \in (2,75 \cdot 10^{-5}; 28,25 \cdot 10^{-5})$). Статистика Дарбина-Уотсона $DW = 2,02$ и сериальная корреляция остатков $\rho_{кор} = -0,092$, подтверждают высокую степень адекватности модели (1) результатам эксперимента [8]. Поиск оптимальных значений ингредиентов окислителей, необходимых для очистки воды, представляет собой задачу нелинейного программирования вида (2-4) [9]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i \quad (i = \overline{1, m}), \quad (3)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, n}), \quad (4)$$

где: f – функция зависимости концентрации фенольного соединения (1) от параметров процесса (целевая функция);

x_1, x_2, \dots, x_n – параметры процесса (переменные);

b_i – удельный уровень затрат, выделяемый на очистку;

g_i – функция затрат, представляющая двухноменклатурную модель затрат, связанную с запасом перекиси водорода и хлорида железа (III) (функция ограничения) (5) [10]:

$$Z(c_2, c_3) = k_2 \cdot \frac{c_2^2 \cdot I_1}{2A} + k_3 \cdot \frac{c_3^2 \cdot I_2}{2A} + c_2 \cdot I_1 + c_3 \cdot I_2, \quad (5)$$

$$A = m_1 \cdot k_2 + m_2 \cdot k_3; \quad I_1 = i_1 \cdot k_2; \quad I_2 = i_2 \cdot k_3,$$

Таблица 1

Матрица планирования

Опыты	Планирование									Переменная состояния у
	z ₀	кодированный масштаб				натуральный масштаб				
		z ₁	z ₂	z ₃	z ₄	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	
1	+1	-1	-1	-1	-1	0,05	100	1	1	0,036
2	+1	+1	-1	-1	-1	0,1	100	1	1	0,071
3	+1	-1	+1	-1	-1	0,05	200	1	1	0,035
4	+1	+1	+1	-1	-1	0,1	200	1	1	0,068
5	+1	-1	-1	+1	-1	0,05	100	2	1	0,033
6	+1	+1	-1	+1	-1	0,1	100	2	1	0,064
7	+1	-1	+1	+1	-1	0,05	200	2	1	0,031
8	+1	+1	+1	+1	-1	0,1	200	2	1	0,061
9	+1	-1	-1	-1	+1	0,05	100	1	2	0,032
10	+1	+1	-1	-1	+1	0,1	100	1	2	0,062
11	+1	-1	+1	-1	+1	0,05	200	1	2	0,03
12	+1	+1	+1	-1	+1	0,1	200	1	2	0,059
13	+1	-1	-1	+1	+1	0,05	100	2	2	0,028
14	+1	+1	-1	+1	+1	0,1	100	2	2	0,056
15	+1	-1	+1	+1	+1	0,05	200	2	2	0,027
16	+1	+1	+1	+1	+1	0,1	200	2	2	0,053



где: $Z(c_2, c_3)$ – удельные суммарные затраты, связанные с запасом, руб.;

k_2, k_3 – удельная закупочная цена единицы запаса перекиси водорода (руб./мг) и хлорида железа (III) (руб./г), соответственно;

c_2 – удельное потребление перекиси водорода, мг/л;

c_3 – удельное потребление хлорида железа, г/л;

I_1, I_2 – удельные тарифы затрат на хранение перекиси водорода и хлорида железа (III), соответственно, руб.;

A – удельные накладные затраты одной общей поставки, руб.;

m_1, m_2 – доля цены продукции, приходящаяся на затраты на выполнение одного заказа по перекиси водорода и хлориду железа (III), соответственно;

i_1, i_2 – доля цены продукции, приходящаяся на затраты на содержание запаса по перекиси водорода и хлориду железа (III), соответственно.

Установлено, что целевая функция концентрации (1) и функция затрат (5), определяющая область допустимых решений, являются выпуклыми и непрерывно дифференцируемыми, что характеризует задачу (2-4), как задачу выпуклого программирования [9, 11]. Для решения (2-4) вводится набор переменных $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, называемых *множителями Лагранжа*, составляется *функция Лагранжа*:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i [g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - b_i],$$

находятся частные производные,

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} \left(j = \overline{1, n} \right) \text{ и } \frac{\partial F}{\partial \lambda_i} \left(i = \overline{1, m} \right)$$

рассматривается система $n + m$ уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} = 0 \left(j = \overline{1, n} \right); \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_i} = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - b_i = 0 \left(i = \overline{1, m} \right); \end{cases} \quad (6)$$

с $n + m$ неизвестными $x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$. Всякое решение системы уравнений (6) определяет точку, в которой может иметь место экстремум функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. При соблюдении условий Куна-Таккера (7.1-7.6) точка $(X^*, \Lambda^*) = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*, \lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_m^*)$ является седловой точкой функции Лагранжа, т.е. найденное решение задачи (2-4) оптимально [9, 11]:

$$\frac{\partial F^*}{\partial x_j} \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (7.1)$$

$$x_j^* \frac{\partial F^*}{\partial x_j} = 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (7.2)$$

$$x_j^* \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (7.3)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial \lambda_i} \leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (7.4)$$

$$\lambda_i^* \frac{\partial F^*}{\partial \lambda_i} = 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (7.5)$$

$$\lambda_i^* \geq 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (7.6)$$

Решая задачу (2-4) при следующих значениях технико-экономических параметров $C_0 = 0,006$ мг/л; $t = 120$ ч; $b = 4 \cdot 10^{-2}$ руб./л; $k_2 = 24,5 \cdot 10^{-6}$ руб/мг, $k_3 = 37,5 \cdot 10^{-3}$ руб/г; $i_1 = 10\%$, $i_2 = 12\%$; $m_1 = 5\%$, $m_2 = 7\%$, в программной среде MathCad 14.0 получаем точку $(c_2^*, c_3^*, \lambda^*)$ с координатами (945,96; 0,857; $4,714 \cdot 10^{-3}$). В соответствии с выполнением условий (7.1-7.6) данное решение является оптимальным.

Таким образом при удельном уровне затрат на очистку $4 \cdot 10^{-2}$ руб./л, используя технологию усовершенствованных окислительных процессов, уровень фенольного соединения при оптимальных удельных уровнях расхода перекиси водорода и хлорида железа (III), в качестве активатора, равных, соответственно, 945,96 мг/л и 0,857 г/л составит 1,54 ПДК при начальном уровне 6 ПДК. В случае увеличения времени УФ обработки воды и удельных затрат, выделяемых на очистку, начальный уровень фенольных соединений, сбрасываемых в составе промстоков, может быть снижен до уровня, не превышающего предельно допустимый.

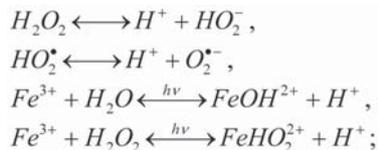
В результате экспериментов, проведенных на основе оптимального планирования, исследовано влияние реактива Раффа ($Fe^{3+} - H_2O_2$) на деструкцию ВРА под действием УФ облучения. Графики на *рис. 1* отражают динамику разложения ВРА.

Процесс фотокаталитического разложения перекиси водорода генерирует высоко реакционно-способные гидроксильные радикалы, направленные на окисление молекулы

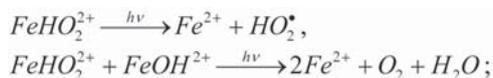
фенольного соединения. При обработке раствора, содержащего ионы железа (III), УФ светом длиной волны $\lambda=365$ нм происходит образование $Fe(OH)^{2+}$ частиц и вызывает реакцию фото-Фентон:

$Fe(OH)^{2+} + h\nu \rightarrow Fe^{2+} + \cdot OH$ с окислительно-восстановительным циклом $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$, подтверждающим существование стадий одноэлектронного переноса. Разложение H_2O_2 аква-ионами Fe^{3+} протекает по радикально-цепному механизму [12, 13]:

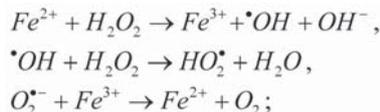
◆ кислотно-основные равновесия



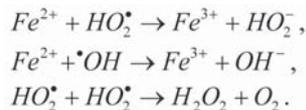
◆ инициирование



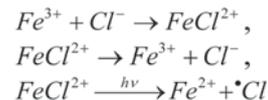
◆ продолжение цепи



◆ обрыв цепи



Механизм фотолиза с участием свободного атома хлора может быть описан следующим образом [14]:



Для уточнения механизма деструкции фенольного соединения определялся квантовый выход фотокаталитической реакции. Скорость реакции окисления ВРА ($-dC_0/dt$) прямо пропорциональна скорости образования окислительных радикалов (dC_{OH}/dt) [15]:

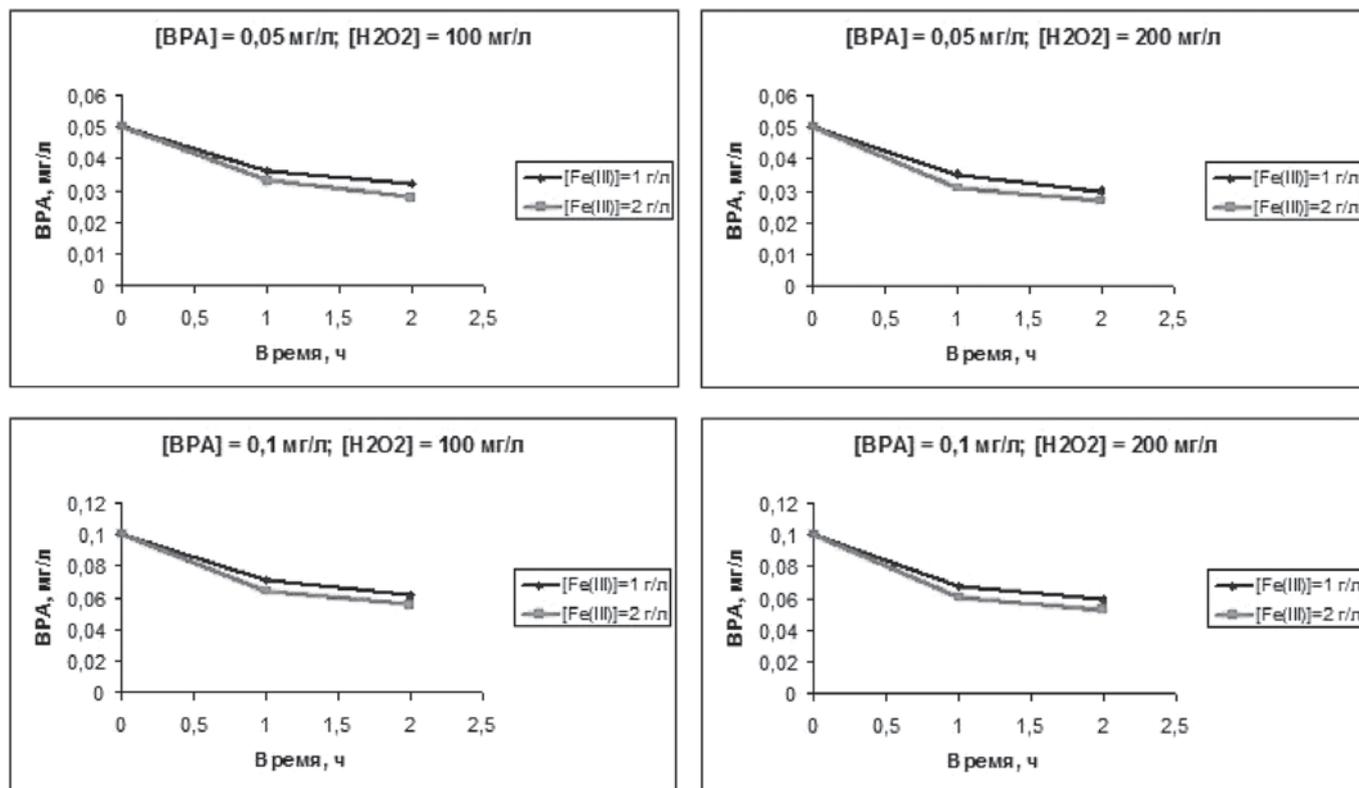
$$-dC_0/dt = dC_{OH}/dt = \phi E_{\text{полг.}}$$

Поглощенная средой энергия за время t определяется как:

$$E_{\text{полг.}} = I_{\text{полг.}} \cdot S \cdot t = I_0 \cdot (1 - 10^{-\epsilon c l}) \cdot S \cdot t,$$

где: $E_{\text{полг.}}$ – поглощенная средой энергия за время t , Дж; $I_{\text{полг.}}$ – поглощенная интенсивность светового потока, Вт/см²; I_0 – начальная интенсивность светового потока, Вт/см²; ϵ – коэффициент молярного поглощения среды, л/(моль·см); c – молярная концентрация поглощающего свет вещества, моль/л; l – длина слоя поглощения, см; S – площадь

↓ Рис. 1. Кинетика деградации ВРА.



облучаемой поверхности, см²; t – время облучения, с.

При длине волны ультрафиолетового излучения, равной 365 нм в системе «ВРА – хлорид железа (III) – перекись водорода – вода» происходит прямой фотолиз комплекса Fe(OH)²⁺ с коэффициентом молярного поглощения $\epsilon \approx 250$ л/(моль·см) [16] ($\epsilon_{\lambda=365\text{nm}}$ (ВРА) = 0 [6]; $\epsilon_{\lambda=365\text{nm}}$ (H₂O₂) = 0 [17]).

В фотохимической реакции квантовый выход окисления ВРА гидроксильными •ОН радикалами, источником образования которых являлся распад перекиси водорода, катализируемый прямым фотолизом комплекса Fe(OH)²⁺, определялся по формуле (8) [18]:

$$\varphi = \frac{(C_0 - C)N_A V}{(E_{\text{полл}} / E_{\text{h\nu}})} \quad , \quad (8)$$

где: φ – квантовый выход; C₀ и C – молярная концентрация ВРА до и после облучения, моль/л; N_A – число Авагадро; V – облучаемый объем, л; E_{полл} – поглощенная энергия, Дж; E_{hν} – энергия кванта, Дж.

Квантовый выход, определяемый для реакций окисления ВРА (8), осуществленных в результате эксперимента (табл. 1), варьируется в диапазоне $4,679 \cdot 10^{-4} - 2,024 \cdot 10^{-3}$ со средним значением $\varphi_{\text{ср}} = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Полученное значение квантового выхода определяет многостадийный процесс разложения молекулы ВРА и промежуточных продуктов её распада, осуществляемый «атаками» окислительных •ОН радикалов, генерирование которых должно осуществляться по схемам разложения перекиси водорода, катализируемого фотолизом железосодержащих комплексов, обеспечивающих образование их в значительных количествах.

Ключевой ступенью очистки в АОР технологии с оптимальной системой дозирования

Ключевые слова:

промышленные воды,
фенол,
загрязнение, очистка

реагентов окислителей, является УФ реактор с погруженными источниками излучения, обеспечивающими необходимый ультрафиолетовый поток для полной детоксикации фенольных загрязнителей. При использовании кварцевой разрядной ртутной трубчатой лампы ДРТ-12000-1 с параметрами P = 12 кВт; $\lambda = 365$ нм; EUV = 720 Вт в качестве источника излучения, в соответствии с методикой [19] определялось количество фенольного соединения, окисляемого системой фото-Фентона (Раффа).

Частота излучения фотонов лампой определяется по формуле (9):

$$\nu_{\text{UV}} = E_{\text{UV}} / E_{\text{h\nu}} \quad , \quad (9)$$

где: ν_{UV} – частота излучения фотонов лампой, с⁻¹; E_{UV} – энергетический поток лампы, Вт (Дж/с); E_{hν} – энергия фотона, Дж.

Таким образом, частота излучения фотонов лампой ДРТ-12000-1, рассчитанная по (9), составляет $13,211 \cdot 10^{20}$ с⁻¹.

Определим количество молекул фенольного соединения, деструктурирующих в единицу времени (10):

$$N_{\text{ph}} = \nu_{\text{UV}} \cdot \varphi \quad , \quad (10)$$

где: N_{ph} – количество деструктурирующих молекул фенольного соединения; ν_{UV} – частота излучения фотонов источником облучения, с⁻¹; φ – квантовый выход фотохимической реакции окисления фенольного соединения.

Учитывая, что значение квантового выхода составляет $\varphi = 1,11 \cdot 10^{-3}$, то количество окисленных молекул в единицу времени, определяемое по (10) – $N_{\text{ph}} = 14,532 \cdot 10^{17}$ с⁻¹ ($2,413 \cdot 10^{-6}$ моль/с).



Для определения количества вещества, разлагаемого в единицу времени используем (11):

$$N_{\text{destr}} = Q \cdot P \cdot CM / 100, \quad (11)$$

где: N_{destr} – количество вещества, разлагаемого в единицу времени, моль/с; Q – расход, м³/с; P – уровень снижения концентрации, %; CM – молярная концентрация загрязнителя, моль/м³.

Концентрацию фенола $C = 0,006$ мг/л ($CM = 6,376 \cdot 10^{-5}$ моль/м³), содержащегося в промышленных стоках, расходом $Q = 300$ м³/ч ($0,0833$ м³/с), необходимо понизить до предельно-допустимого уровня ($0,001$ мг/л), т.е. обезвредить с эффективностью $83,33$ %. Количество вещества, разлагаемое в единицу времени, определенное по (11), составляет $44,258 \cdot 10^{-7}$ моль/с. Следовательно, для детоксикации загрязнителя необходимо использовать рассчитываемое число ламп:

$$N_{\text{lamps}} = \frac{N_{\text{destr}}}{N_{\text{ph}}} = \frac{44,258 \cdot 10^{-7}}{2,413 \cdot 10^{-6}} = 1,834 \approx 2 \text{ шт.}$$

Учитывая, что в фотореакторе коэффициенты поглощения лучей слоем воды и отражателем принимаются равными $0,9$ [20], то поправочное число ламп ДРЛ-12000-1, обеспечивающих необходимый УФ-поток для деструкции органического загрязнителя, составит 4 шт.

Заключение

На основе экономико-математического моделирования предложен метод определения оптимальных параметров управляемой технологии на базе усовершенствованных окислительных процессов, которая направлена на решение экологических проблем, связанных с антропогенным воздействием промышленных вод, содержащих фенолы и трудно растворимые органические соединения на водные объекты.

Исследование механизмов деструкции фенольного соединения в водной среде под действием физико-химических факторов позволило обосновать использование в системе очистки необходимого количества источников излучения, обеспечивающих энергетический поток, достаточный для полного окисления фенольных соединений.

Управляемая технология очистки промышленных вод послужит механизмом повышения экологической безопасности поверхностных водных объектов рыбохозяйственного значения, а также подземных вод питьевых



горизонтов от антропогенного воздействия, вызванного деятельностью промышленных предприятий.

Литература

1. Алексеев Е.В. Физико-химическая очистка сточных вод: учебное пособие. М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2007. 248 с.
2. Серпокровлов Н.С. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами / Н.С. Серпокровлов, Е.В. Вильсон, С.В. Гетманцев, А.А. Марочкин. М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2009. 264 с.
3. Моисеев И.И. Окислительные методы в технологии очистки воды и воздуха // Изв. АН. Сер. хим. 1995. № 3. С. 578–588.
4. Чернова М.В. Исследование процесса очистки водных систем от фенольных соединений под действием физико-химических факторов. Дис. ... канд. техн. наук. Калуга-Тула, 2009. 118 с.
5. Химическая энциклопедия: В 5 т. / Под ред. И.Л. Кнунянца. М.: Сов. энцикл., 1990. Т. 2: Даффа-Меди. 671 с..
6. Верховская З.Н. Дифенилолпропан. М.: Химия, 1971. 196 с..
7. ГОСТ Р 50.1.040-2002. Статистические методы. Планирование экспериментов. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2002. 36 с.
8. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ, 3-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. 912 с.
9. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: Учебное пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Изд. «Лань», 2009. 352 с.
10. Стерлигова А.Н. Управление запасами в цепях поставок: Учебник. М.: ИНФРА-М, 2009. 430 с.
11. Соколов А.В. Методы оптимальных решений. Общие положения. Математи-

ческое программирование / А.В. Соколов, В.В. Токарев. Учеб. пособ. для ВУЗов: В 2 т. М.: Физматлит, 2010. Т. 1. 564 с.

12. Сычев А.Я. Соединения железа и механизмы гомогенного катализа активации O_2 , H_2O_2 и окисления органических субстратов / А.Я. Сычев, В.Г. Исак // Успехи химии. 1995. Т. 64 (12). С. 1183–1209.

13. Daphne Hermosilla. Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes / Daphne Hermosilla, Manuel Cortijo, Chin Pao Huang // Science of the Total Environment 2009. V. 407. P. 3473–3481.

14. Поздняков И.П. Природа и реакции промежуточных частиц в фотохимии водных растворов комплексов трехвалентного железа с гидроксид-ионом и сульфосалициловой кислотой. Дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2004. 114 с.

15. Самсоны-Тодоров А.О. Фотокаталитическая деструкция фенола в воде в присутствии гидропероксида церия / А.О. Самсоны-Тодоров, Е.А. Роля, В.М. Кочкодан, В.В. Гончарук // Химия и технология воды, 2008. Т. 30. № 3. С. 278–286.

16. Pozdnyakov P. Photodegradation of organic pollutants in aqueous solutions caused by $Fe(OH)_2+aq$ photolysis: Evidence of OH radical formation / Pozdnyakov P., Sosedova Yu. A., Plyusnin V.F., Glebov E.M., Grivin V.P., Vorobyev D. Yu., Bazhin N.M. // International Journal of Photoenergy. 2004. V. 6. P. 89–93.

17. Advanced Photochemical Oxidation Processes: Handbook // United States Environmental Protection Agency, Washington. 1998. 97 p.

18. Майер Г.В. Электронно-возбужденные состояния и фотохимия органических соединений / Г.В. Майер, В.Я. Артюхов, О.К. Базыль [и др.]. Новосибирск: Наука. СО РАН, 1997. 232 с.

19. Кувыкин Н.А. Плазменная деструкция фенола в растворах, моделирующих природные и сточные воды. Дис. ... канд. хим. наук. Иваново, 2000. 172 с.

20. Соколов В.Ф. Обеззараживание воды бактерицидными лучами. М.: Стройиздат, 1964. 233 с.



E.M. Sokolov, L.E. Sheynkman, D.V. Dergunov

INDUSTRIAL WASTE WATER TREATMENT FROM PHENOL COMPOUNDS

Fine technology of control oxidation processes aimed at environmental problem solving has been studied. It concerns industrial waters polluted with phenols and their impact on water

subjects. The mechanisms of physical and chemical processes that lead to the destruction of organic pollutants in water have been analyzed. A sufficient number of radiation sources that

determines complete oxidation of pollutants was found out.

Key words: industrial water, phenol, pollution, cleaning