

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

БАКЕР Адель Халиль

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЗОНИРОВАНИЯ
ОКРАШЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В БАРБОТАЖНОМ
РЕАКТОРЕ**

Специальность **05.23.04** - Водоснабжение, канализация.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КИЕВ - 1996



00376318 (S)

28.1
28.2
Работа выполнена в Киевском государственном институте строительства и архитектуры

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
ЗИМА С.В.

Официальные оппоненты - Доктор технических наук, профессор
Терновшев В.Е.

- старший научный сотрудник, кандидат
технический наук ГОРЧЕВ В.Ф.

Ведущая организация - проектный институт легкой промышленности
АО ПИИ-5

Защита состоится 14 февраля 1996 г. в 13 ч. на заседании
специализированного Совета Д 01.18.09 при Киевском государственном
техническом университете строительства и архитектуры по адресу: 252037,
Киев - 37, Воздухофлотский проспект, 31, ауд. 466

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУСиА.

Автореферат разослан "5" января 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета

Молчан } В.А.Потапов

46.33.789

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

В технологии обработки питьевых и сточных вод широко применяются различные окислители, в том числе и озон. Являясь одним из самых эффективных из них, он в то же время обладает существенным недостатком: его применение связано со сравнительно большими капитальными и эксплуатационными затратами.

В процессе получения и применения озона входит смешение его с водой и последующая реакция его с загрязнениями. От конструктивного решения установки по смешению зависит эффективность и экономичность процесса озонирования. В практике озонирования широко применяются барботажные реакторы озонирования колонного типа из-за простоты и эффективности их работы.

Для описания механизма и выбора оптимальных режимов озонирования широко используется математическое моделирование процессов смешения и взаимодействия разных фаз и разработка на его основе методов расчета реакторов озонирования.

Имеющиеся в литературе модели довольно упрощенно учитывают реальные процессы озонирования. Большинство существующих моделей основаны на довольно простых балансовых соотношениях, и только в последнее время начали разрабатываться более сложные модели, учитывающие в той или иной степени конвективно-диффузионный перенос веществ в потоке, различные кинетики фазовых обменов и реакции. Первые весьма приблизительно описывают происходящие процессы, применяемые обычно для конкретных условий и требуют довольно обстоятельной экспериментальной проверки. Вторые модели довольно сложны в реализации и требуют существенного усовершенствования, связанного с учетом и оценкой влияния отдельных факторов на сложный процесс озонирования. Кроме того, построение и реализация таких моделей имеет определенные трудности, связанные, прежде всего, с определением и выбором различных констант и коэффициентов, входящих в уравнения модели.

Выполненный анализ показывает, что в настоящее время не существует универсальной математической модели, достаточно полно учитывающей процессы, происходящие в реакторе озонирования барботажного типа, и позволяющей моделировать процесс озонирования в различных условиях: в чистой воде и сточных водах, при проточном или без ее протока.

При определении оптимальных режимов ведения процесса большое значение также имеет выбор места подачи сточных вод в реактор, т.е. создание в реакторах режима противотока и прямотока фаз. Не получили должного отражения при моделировании процесса озонирования влияние температуры и pH раствора, продольного перемешивания, а также взаимодействие не только исходных веществ, реагирующих

с озоном, но и продуктов их реакции с озоном. Поэтому изучение и анализ влияния указанных и других факторов на процессы озонирования, разработка численных и аналитических методов их расчета на основе построенных математических моделей определяют важность и актуальность работы.

Цель работы:

Изучение, анализ процесса озонирования и разработка математических моделей озонирования чистой воды и окрашенных сточных вод в барботажном реакторе и создание на их основе инженерного метода расчета.

Основные задачи исследований:

1. Выбор режимов обработки озоном концентрированных сточных вод, содержащих синтетические красители, в реакторе барботажного типа.

2. Построение математической модели насыщения озоном чистой воды в реакторе барботажного типа при его растворении из газовых пузырей.

3. Построение математической модели озонирования окрашенных сточных вод в реакторе барботажного типа при различных режимах обработки.

4. Учет влияния температуры, рН, продольного перемешивания и продуктов реакции красителей с озоном на эффективность процесса озонирования окрашенных сточных вод.

5. Применение разработанных математических моделей для решения различных инженерных задач, в том числе для создания методов расчета барботажных реакторов для озонирования чистой воды и окрашенных сточных вод.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель насыщения озоном чистой воды в реакторе барботажного типа с учетом влияния температуры, рН раствора и массообменных процессов, происходящих при всплытии пузырей газа.

2. Изучен механизм и построена математическая модель озонирования окрашенных сточных вод в реакторе барботажного типа в следующих режимах: без протока жидкости, при прямоточном и противоточном движении фаз.

3. Разработана математическая модель озонирования окрашенных сточных вод, учитывающая одновременное окисление озоном красителей и продуктов реакции.

4. Создание методов инженерного расчета реакторов озонирования на основе математических моделей и проведенных экспериментальных исследований.

Практическая ценность:

Создан и проверен в реальных условиях инженерный метод расчета барботажных реакторов озонирования чистой воды и окрашенных сточ-

ных вод на основе предложенных математических моделей озонирования. Метод позволяет по заданным параметрам, установленным экспериментально или расчетным путем, осуществлять расчет режима насыщения озоном воды или обработки сточных вод. Предложенный алгоритм расчета позволяет с высокой степенью достоверности рассчитать реальный процесс озонирования.

Апробация работы:

Основные положения работы доложены на 54 и 55 конференциях Киевского государственного технического университета строительства и архитектуры (1993, 1994 гг.), на международном симпозиуме "Применение озона для обработки питьевых и сточных вод", Варшава, май 1994 г., а также на заседании кафедры гидравлики и водотведения КГТУСиА, где соискатель обучался в аспирантуре.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ:

На защиту выносятся следующие научные положения:

- математическая модель насыщения озоном чистой воды в реакторе барботажного типа;
- математическая модель озонирования окрашенных сточных вод в следующих режимах: без протока жидкости, при протоке в прямоточном и противоточном режимах движения фаз;
- математическая модель озонирования окрашенных сточных вод с учетом взаимодействия озона с продуктами его реакции с красителями;
- результаты реализации соответствующих моделей в условиях лабораторных экспериментов;
- алгоритм инженерного расчета барботажных реакторов озонирования чистой воды и окрашенных сточных вод на основе предложенных математических моделей.

Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка использованной литературы из 66 наименований, 70 рисунков и 3 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризовано современное состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, показана их новизна и актуальность.

В первой главе изложены технологические основы процесса озонирования и приведен анализ научной информации, касающейся проблемы обесцвечивания озоном сточных вод. На основании обзора литературы установлено, что наибольшее распространение в практике водообработки получили барботажные реакторы колонного типа. Их широкое применение обусловлено рядом преимуществ по сравнению с другими аппаратами из-за простоты конструкции, низких эксплуатационных и капитальных затрат, хорошей регулируемости и высокой надежности осуществления процесса.

Среди многочисленных колонных аппаратов простейшим вариантом барботажных реакторов является одноступенчатая колонна без рециркуляции потока жидкости с прямоточным и противоточным движением газовой и жидкой фазы.

Наиболее важным технологическим параметром, характеризующим эффективность работы барботажных колонн, является коэффициент массообмена между фазами. В литературе механизм газожидкостного процесса озонирования в реакторах описан, как состоящий из нескольких этапов. В него входит: диффузия озона через газовую фазу к пограничному слою, диффузия через пограничный слой газовой фазы к границе раздела фаз, перенос озона из газовой фазы в жидкую фазу через границу раздела фаз, диффузия озона в жидкостной пленке и далее в жидкости.

Существующие модели реакторов озонирования можно разделить на две группы по уровню адекватности описания процессов. К первой группе относятся зависимости, полученные на основе балансовых уравнений для реагирующих веществ. Большинство этих моделей носят эмпирический характер и описывают лишь процессы в конкретных условиях. Примером этих моделей является уравнение Sheffer S., Ester-son G., определяющее скорость массовой подачи озона, необходимого для окисления вещества. На основании балансовых зависимостей модели Xu F., Ziu C. можно получить необходимые технологические осредненные параметры процесса озонирования, такие, как количество переданного озона за определенный период времени, поданную дозу озона и поглощенную дозу озона.

Уравнения, полученные Gurol M.D. позволяют определить основные требуемые технологические средние показатели озонирования: общее удаление вещества в ходе озонирования, концентрацию озона в воде и степень использования озона в воде.

Ко второй группе относятся модели, построенные на основе дифференциальных уравнений. Эти модели точнее описывают реальные процессы. Примером их является уравнение, полученное Retezan A., которое, однако, учитывает диффузию и реакцию озона только в условии стационарного режима.

Yurteri C., Gurol M. создали более общую модель озонирования воды в трубчатом реакторе с противоточным газожидкостным течением. Однако, она не учитывает таких процессов, как перенос озона из газовой фазы в жидкую, а также процесс взаимодействия озона с загрязнениями воды. Marinis B. дополнил эту модель уравнением, описывающим указанные процессы в стационарных условиях. Модель Marinis наиболее полно описывает процесс растворения озона с учетом всех процессов, происходящих в воде, однако, процесс окисления озоном находящихся в воде веществ в этой модели не рассматривался.

Таким образом, известные модели и зависимости позволяют определять только основные технологические параметры процесса озони-

рования для конкретных условий, но они не позволяют исследовать динамику процесса озонирования по высоте реактора, с учетом влияния различных факторов. Нет единого мнения об эффективности протекания процесса в зависимости от принятого режима обработки сточных вод. Отсутствуют сведения о моделировании кинетики сложных химических реакций, учитывающих продукты реакций красителей с озоном, при излучении озонирования окрашенных сточных вод.

Во второй главе обоснована методика исследований и приведено описание опытной установки, состоящей из лабораторного озонатора, компрессора, блока подготовки воздуха и реакционной колонки барботажного типа. В качестве реакционной колонки использовали стеклянную трубу с внутренним диаметром 0,057 м, разным объемом (0,006; 0,002; 0,00075 м³). В качестве диспергирующего устройства применяли фильтр Шотта со средними размерами пор 100 мк.

Концентрация озона в газе на входе в реакторе и на выходе из него определялась озономером типа "Циклон - реверс", расход газа - газовым счетчиком ГСБ-3. Эффект обесцвечивания определялся путем измерения оптической плотности исходных и обработанных растворов фотоэлектроколориметром КФК-2 по кривым поглощения света раствором красителя в диапазоне длин волн от 360 до 750 нм.

Для реализации моделей озонирования чистой воды необходимо было установить количественные значения следующих констант и параметров: n , a , u_b , D_1 , $D_{\text{оил}}$, τ_r , γ .

Параметры a и u_b определялись фотографическим методом при различных расходах газа; их полученные значения лежат в пределах $a \approx (0,5 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м, $u_b \approx (0,2 - 0,3) \cdot 10^{-3}$ м/с, $\gamma \approx (0,36 - 0,24)$.

Значения D_1 и τ_r приняты на основании литературных источников: $D_1 \approx 2 \cdot 10^{-9}$ м²·с⁻¹; $\tau_r \approx 5 - 30$ мин.

Коэффициент $D_{\text{оил}}$ определялся экспериментальным путем по известной методике и составил $D_{\text{оил}} = (1 - 5) \cdot 10^{-3}$ м²·с⁻¹.

Определяющими физико-химическими процессами в рассматриваемой модели озонирования для чистой воды являются:

- растворение озона в воде путем массопереноса из озono-воздушных пузырей, выходящих из пористого дна реактора и движущихся примерно с постоянной скоростью c по поверхности воды;
- продольное перемешивание растворенного озона, вызванное поднимающимися газовыми пузырями;
- саморазложение озона при характерном времени распада τ_r .

Отличие предложенной модели от предыдущих, представленных в литературе, является то, что растворение озона в воде описывается функцией, входящей в общее дифференциальное уравнение, которое записано относительно концентрации растворенного озона $C_0(z,t)$, и при отсутствии протока жидкости в реакторе озонирование имеет вид:

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = D_{\text{оил}} \frac{\partial^2 C_0}{\partial z^2} + J_g F(t, C_0^* - C_0) - \frac{C_0}{\tau_r} \quad (1)$$

где $J_g F(t_1, C_o^* - C_o)$ - функция скорости растворения озона из газовых пузырей в жидкости. Остальные обозначения величин, входящие в уравнение (1) и дальше по тексту, приведены выше.

Краевые условия для уравнения (1) будут:

$$\left. \frac{\partial C_o}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial C_o}{\partial z} \right|_{z=h} = 0; \quad C_o \Big|_{t=0} = 0$$

Для определения функции $J_g F(t_1, C_o^* - C_o)$, было использовано известное уравнение массопереноса, учитывающее растворение газа по мере всплытия газового пузыря в жидкости:

$$\frac{\partial C_g}{\partial t_1} = - \frac{k_1 \cdot S_b}{w_b} (\gamma \cdot C_g - C_o) \quad (2)$$

где

$$k_1 \cdot S_b = 8 \cdot \left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{D_1 \cdot u_b}{a} \right)^{1/2} \cdot a^2 \quad (3)$$

Решение уравнения (2) в пространственных переменных при $C_g(0) = C_o^0$ имеет вид;

$$C_g(z) = e^{-\beta y z} \cdot \left\{ \int_0^z \beta [C_o(\xi)] e^{\beta y \xi} \cdot d\xi + C_o^0 \right\} \quad (4)$$

где $\beta = \frac{k_1 S_b}{w_b u_b}$, $z = t_1 \cdot u_b$.

Тогда функция растворения озона из всех пузырей n может быть представлена следующим образом:

$$J_g F(t_1, C_o^* - C_o) = n \cdot k_1 \cdot S_b \left[\gamma \cdot e^{-\beta y z} \cdot \left\{ \int_0^z \beta [C_o(\xi)] e^{\beta y \xi} \cdot d\xi + C_o^0 \right\} + C_o \right] \quad (5)$$

Для решения уравнения (1) был использован численный метод Gear; программа составлена на языке ФОРТРАН.

Уравнение (1) позволяет реализовать процесс при различных условиях, и при различных параметрах не только по газу (расходах и концентрации в нем озона), но и по жидкости (объёму реактора, температуре и pH раствора), о чем свидетельствуют результаты сопоставления расчетных и опытных данных, приведенных на рис. 1. Кроме того, можно произвести оценку отдельных членов уравнения (1), что позволяет его упростить, получить точное решение и уточнить входящие в него параметры.

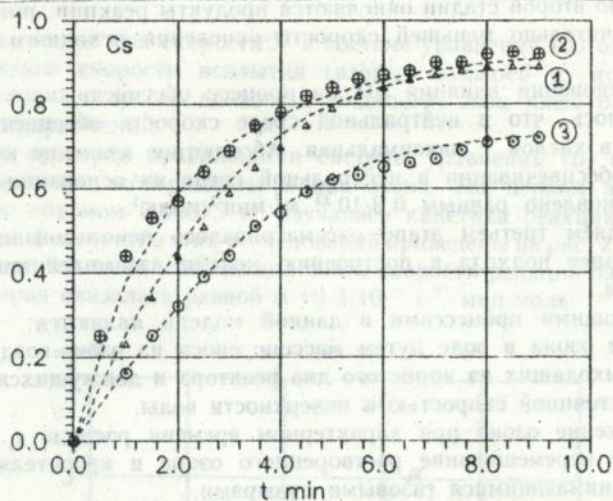


Рис. 1. Зависимость концентрации озона $C_s = f(t)$ в газе на выходе из реактора высотой 2,35 м при расходах газа для всех кривых $Q = 2,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и pH = 7 (1), pH = 3 (2), и pH = 10 (3). Пунктирная кривая – расчетная зависимость, точки – опытные данные.

В третьей главе приведены результаты исследований обработки озонем окрашенных сточных вод, которые проводились в несколько этапов. На первом этапе на основе проведенных экспериментов были выбраны четыре характерных режима обработки сточных вод:

1. В статических условиях без протока жидкости и без принудительного перемещения раствора.
2. В режиме полного смешения без протока жидкости.
3. В проточном режиме при противоточном движении газовой и жидкой фаз.
4. В проточном режиме при прямоточном движении газовой и жидкой фаз.

Результаты исследований показали преимущества обработки кон-

центрированных сточных вод без циркуляции раствора при прямоточном движении фаз для аппарата, приближенного к реактору полного вытеснения.

На втором этапе лабораторных исследований определялись константы скорости обесцвечивания озонм красителей. При продолжительном озонировании выяснилась более сложная кинетика обесцвечивания красителей, чем предполагалось вначале. Это связано с тем, что в начальной стадии происходит окисление исходной структуры красителя с образованием более трудноокисляемых, но окрашенных продуктов реакции. Во второй стадии окисляются продукты реакции, причем со скоростью значительно меньшей скорости окисления исходного красителя.

При исследовании влияния pH на процесс обесцвечивания красителей выяснилось, что в нейтральной среде скорость обесцвечивания минимальная, в кислой — максимальная. Абсолютное значение константы скорости обесцвечивания в нейтральной среде на основании экспериментов установлено равным $0,3 \cdot 10^{23} \text{ м}^3 \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$.

На последнем третьем этапе рассматривалось использование разработанного ранее подхода к построению модели взаимодействия озона и красителя.

Определяющими процессами в данной модели являются:

1. Растворение озона в воде путем массопереноса из озоно-воздушных пузырей, выходящих из пористого дна реактора и движущихся примерно с постоянной скоростью к поверхности воды.
2. Саморазложение озона при характерном времени распада τ_1 .
3. Продольное перемешивание растворенного озона и красителя, вызванное поднимающимися газовыми пузырями.
4. Взаимодействие красителя и растворенного озона вследствие бимолекулярной реакции с константой скорости реакции α .
5. Движение растворенного озона и красителя, вызванное течением жидкости со скоростью V .

Эта модель не учитывает реакцию озона с продуктами окисления красителя.

Согласно приведенному механизму озонирования раствора красителя система уравнений материального баланса для растворенного озона и красителя, записанная относительно концентраций озона C_o и C_d , имеет вид:

$$\frac{\partial C_o}{\partial t} \pm V \frac{\partial C_o}{\partial z} = D_{\text{oll}} \frac{\partial^2 C_o}{\partial z^2} + J_g F(t_1; C_o^* - C_o) - \alpha C_d \cdot C_o - \frac{C_o}{\tau_1} \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_d}{\partial t} \pm V \frac{\partial C_d}{\partial z} = D_{\text{all}} \frac{\partial^2 C_d}{\partial z^2} - \alpha C_d \cdot C_o$$

Решение системы уравнений (6) выполняется при следующих краевых условиях задачи:

$$C_d(z,0)=0; \quad C_o(z,0)=0$$

$$C_d(-\infty,t)=0; \quad C_o(-\infty,t)=0$$

$$\left. \frac{\partial C_o}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad C_d(z=h,t)=C_d^0.$$

Знак минус при скорости V в системе уравнений (6) означает то, что направление скорости всплытия газовых пузырей u_b противоположно направлению скорости движения жидкости, знак плюс означает совпадение направлений.

Для проверки правильности системы уравнений (6) были проведены модельные эксперименты в два этапа. На первом этапе в малом реакторе объемом $0,00075 \text{ м}^3$ изучалась кинетика реакции озона с красителями. Результаты этих исследований приведены на рис. 2. На основании экспериментов была найдена константа скорости реакции озона и красителя, которая оказалась равной $\alpha = 0.3 \cdot 10^{23} \text{ м}^3/\text{мин} \cdot \text{моль}$.

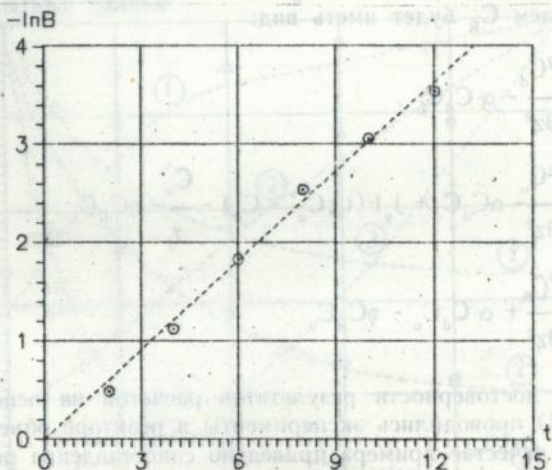


Рис. 2. Вспомогательный график зависимости $B=f(t)$ для определения константы α : пунктирная прямая - расчетная зависимость; точки - опытные данные.

На втором этапе эксперименты проводились в реакторе объемом $0,006 \text{ м}^3$ и высотой $2,35 \text{ м}$ и изучалось пространственно-временное изменение концентрации красителя. Анализ данных, полученных в этом реакторе, показывает, что расчетные значения распределения концен-

трации красителя при времени контакта с озоном больше 15 мин. начинают существенно отличаться от опытных данных и поэтому процесс не может быть описан с достаточной точностью в рамках предложенной модели. Качественная оценка этих данных свидетельствует о резком уменьшении скорости реакции озона и красителя, особенно в области, близкой к месту подачи озона в реактор.

Эксперименты, выполненные для продолжительности контакта более 15 мин, подтверждают предположение об изменении характера взаимодействия реагирующих веществ. Можно сделать вывод, что это изменение вызвано реакцией озона с продуктами окисления красителя, что не учитывается в приведенной выше модели (6).

Схема такой реакции может быть следующей. В начальный момент времени озон O_3 реагирует преимущественно с красителем Kp по схеме $O_3 + Kp \rightarrow R$. По мере окисления красителя в растворе происходит увеличение концентрации продуктов реакции R , поэтому во второй стадии с озоном реагирует как исходный краситель, так и продукты его реакций: т.е. $O_3 + Kp \rightarrow R$, $O_3 + R \rightarrow R_1$, где R_1 - конечные продукты озонирования, практически не реагирующие с озоном. На последней стадии озон реагирует в основном с продуктами реакции.

Система уравнений, описывающих пространственно-временное изменение концентрации красителя C_d , озона C_o и продуктов реакции озона с красителем C_R будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_d}{\partial t} &= D_{dl} \frac{\partial^2 C_d}{\partial z^2} - \alpha \cdot C_d C_o, \\ \frac{\partial C_o}{\partial t} &= D_{ol} \frac{\partial^2 C_o}{\partial z^2} - \alpha C_d C_o + J_g F(t_1; C_o^* - C_o) - \frac{C_o}{\tau_r} - \eta C_R C_o, \\ \frac{\partial C_R}{\partial t} &= D_{Rl} \frac{\partial^2 C_R}{\partial z^2} + \alpha \cdot C_d C_o - \eta C_R C_o. \end{aligned} \quad (7)$$

Для оценки достоверности результатов расчетов на основе системы уравнений (7) проводились эксперименты в реакторе объемом 0,006 м³. На рис. 3 в качестве примера приведено сопоставление результатов численных расчетов по уравнениям (7) с опытными данными. Расчетные данные хорошо согласуются с опытными.

На последнем этапе проводились оценка модели и анализ результатов для стационарных условий задачи. Как показывают эксперименты (рис. 4), результаты теоретических расчетов, полученные на основе уравнений (6) при $\partial C_d / \partial t = \partial C_o / \partial t = 0$, удовлетворительно согласуются с опытными данными.

Таким образом, предложенные модели, основанные на полученной

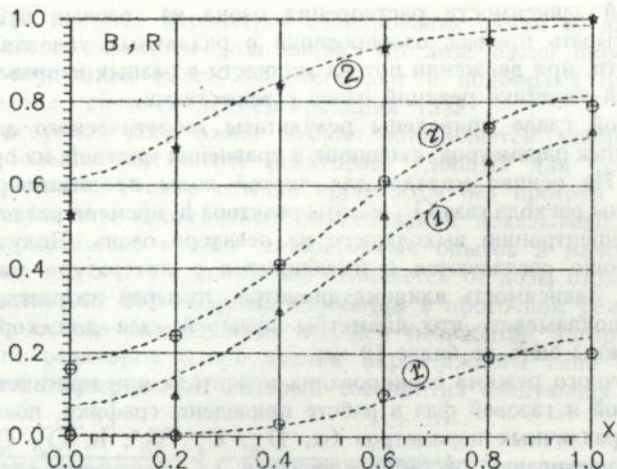


Рис. 3. График изменения концентрации красителя В активного ярко-красного 6С (1) и продуктов реакции $R=C_R/C_d^0$ (2) по высоте реактора озонирования x при $t' = 24,8$ мин, $t = 9,4$ мин: пунктирная кривая - расчетная зависимость; точки - опытные данные.

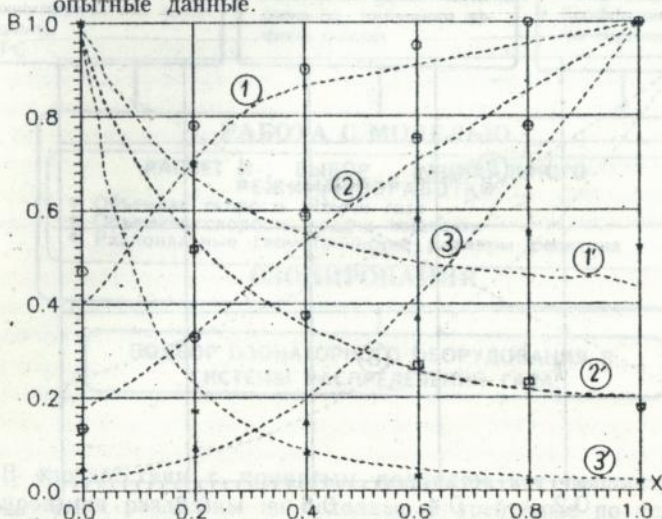


Рис. 4. График изменения концентрации красителя В активного ярко-красного 6С по высоте реактора x в проточном режиме: прямоток при $t = 10$ мин (1), $t = 20$ (2) и $t = 40$ (3); противоток при $t = 10$ мин (1'), $t = 25$ (2') и $t = 40$ (3'). Пунктирная кривая - расчетная зависимость, точки - опытные данные.

функциональной зависимости растворения озона из газовых пузырей, позволяют описывать процесс озонирования в различных условиях: без протока жидкости, при движении потока жидкости в разных направлениях и при различной кинетике реакций озона с веществами.

В четвертой главе приведены результаты теоретического анализа влияния различных параметров, входящих в уравнения моделей, на процесс озонирования. На основе модели для чистой воды проанализировано влияние величины расхода газа Q_g , высоты реактора h , времени разложения озона τ_p на концентрацию выходящего из реактора озона. Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными других авторов. Зависимость влияния диаметра пузырей на растворение озона в воде показывает, что диаметры пузырей газа для хорошего насыщения должны быть не более 10 мм.

Для проточного режима озонирования красителя при противоточном движении жидкой и газовой фаз в работе приведены графики, показывающие влияние различных параметров (α , $D_{ол}$, C_d^o , C_o^o , h , Q_g , $Q_ж$) на активность обесцвечивания раствора красителя.

Таким образом, разработанные математические модели и на их основе численные методы расчета позволяют оценить влияние основных факторов на процесс озонирования и рационально запроектировать основные технологические параметры озонирования.

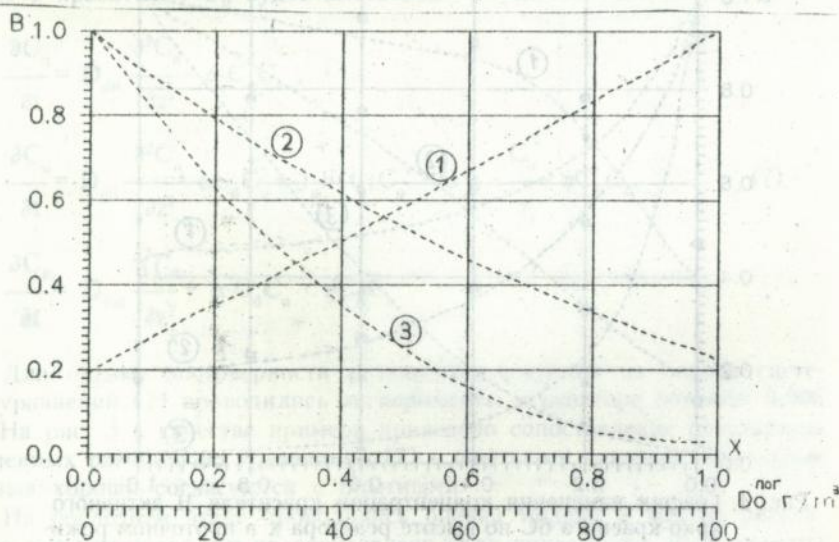


Рис. 5. Теоретические зависимости изменения концентрации B по высоте реактора x при проточных режимах обработки (1 - прямоточный, 2 - противоточный) и от поглощенной дозы озона D_0 (г·м⁻³) в непроточном режиме (3).

При расчетах параметров озонирования одним из наиболее важных показателей является доза озона. По дозе озона определяют расход озон-воздушной смеси, рассчитывают и подбирают озонаторное оборудование, систему диспергирования газа.

Требуемая доза озона обычно определяется лабораторным путем на небольших по высоте реакторах, удобных для проведения таких исследований. Опыты обычно проводятся без протока жидкости.

Результаты проведенных исследований показывают, что доза озона, определенная в ходе лабораторных опытов в малом реакторе без протока жидкости, существенно отличается от дозы озона, которая идет на достижение 80% эффекта обработки в проточном режиме (рис. 5).

На основе приведенных моделей разработан алгоритм численного расчета реакторов озонирования барботажного типа с применением моделей озонирования, который состоит из следующих основных блоков:



В соответствии с принятым подходом все параметры процесса озонирования разделены на исходные и требуемые по условиям задачи, экспериментально определенные в лабораторных условиях, задаваемые на основе известных процессов, и расчетные параметры.

Программа расчета составлена на языке "Фортран". Решение системы дифференциальных уравнений выполнено по методу Gear.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Изучен механизм и особенности озонирования питьевых и окрашенных сточных вод в барботажном реакторе, что предопределило использование математических моделей при исследовании процесса озонирования.
2. Разработана и реализована математическая модель насыщения озоном чистой воды, основанная на происходящих при всплытии пузырей газа массообменных процессах. Оценены количественно наиболее важные параметры процесса и их влияние на общую эффективность насыщения воды озоном.
3. Учтено влияние на процесс озонирования температуры, pH раствора, продольного перемешивания. Теоретически и экспериментально определены константы и коэффициенты, входящие в уравнение модели.
4. Экспериментальным путем оценена эффективность различных режимов обработки озоном окрашенных сточных вод. Показано, что наибольшую эффективность имеет противоточный реактор озонирования, который приближается к реактору полного вытеснения.
5. Разработана и реализована математическая модель озонирования растворов синтетических органических красителей в нескольких режимах: без протока жидкой фазы и в проточных (прямо- и противоточных) режимах.
6. Приведенные математические модели позволяют количественно определить влияние различных параметров на эффективность процесса озонирования растворов красителей в барботажном режиме, определить влияние кинетических и технологических параметров на эффективность процесса.
7. Изучена кинетика взаимодействия озона с красителем в условиях образования продуктов реакции, придающих воде окраску и взаимодействующих с озоном. Введение в модель дополнительного уравнения для продуктов реакции позволяет описать более сложную природу взаимодействия при математическом моделировании.
8. Разработаны алгоритмы и программа численного расчета барботажных реакторов озонирования чистой воды и окрашенных сточных вод на основе предложенных математических моделей.
9. Технико-экономическое сравнение приведенного метода расчета реактора барботажного типа с традиционными методами позволило получить существенный экономический эффект при внедрении установки озонирования сточных вод на Киевской текстильно-галантерейной фабрике.

Основные положения диссертации изложены в следующих печатных работах:

1. Зима С.В., Бакер А.Х. Выбор типа реактора и режима озонирования концентрированных сточных вод - "Химия и технология воды", 1994,

т. 16, №1, с. 48-51.

2. Математическая модель озонирования водопроводной воды. - "Химия и технология воды", 1994, т. 16, №5, с. 488-494 (в соавторстве).

3. Математическая модель озонирования водных растворов красителей. - "Химия и технология воды", 1994, т. 16, №5, с. 494-501 (в соавторстве).

4. Математическая модель озонирования растворов красителей и продуктов их окисления. - "Химия и технология воды", 1994, т. 16, №6, с. 579-585 (в соавторстве).

5. S. Zima, A. Baker and A. Kondrachuk. "Mathematical model of water and wastewater ozonation. - PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL OZONE SYMPOSIUM "Application of ozone in water and wastewater treatment", - WARSAW, POLAND May 26-27, 1994, с. 314-323.

6. Влияние обработки озонем водных растворов активных красителей // Тези доповідей XI української школи-семинару "Спектроскопія молекул та кристалів", Харків, 10-16 травня 1993 р, с. 212 (в соавторстве).

Условные обозначения

C_d - текущая концентрация красителя в водном растворе, моль/м³;

C_{d0} - начальная концентрация красителя в водном растворе, моль/м³;

C_o - текущая концентрация растворенного озона в жидкости, моль/м³;

C_{o0} - начальная концентрация озона в озono-воздушной смеси, моль/м³;

C_{o*} - концентрация растворенного озона при насыщении, моль/м³;

C_g - концентрация озона в газовом пузыре в момент времени t после его появления в реакторе, моль/м³;

$C=C_o/C_{o*}$ - относительная концентрация растворенного озона в водном растворе;

$V=C_d/C_{d0}$ - относительная концентрация красителя в водном растворе;

$C_g=C_g/C_{o*}$ - относительная концентрация озона в газе на выходе из реактора озонирования;

V - линейная скорость потока жидкости, м/с;

k_1 - коэффициент массопереноса озона со стороны жидкой фазы, м·с⁻¹;

D_{dl} - коэффициент продольного перемешивания красителя в растворе, м²/с;

D_{dl} - коэффициент продольного перемешивания растворенного озона, м²·с⁻¹;

τ - время полного разложения озона в воде и растворе красителя, мин;

α - константа скорости бимолекулярной реакции озона и красителя, м³/с·моль;

η - константа скорости бимолекулярной реакции озона и продуктов окисления красителя, м³/с·моль;

h - высота реактора озонирования, м;

W - объем реактора озонирования, м³;

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

- Q_g - расход газа, подаваемый в реактор озонирования, $\text{м}^3/\text{с}$.
 u_b - средняя скорость всплытия пузырей газа в воде и водном растворе, $\text{м}/\text{с}$;
 a' - средний радиус пузырей газа, м ;
 w_b - объем газового пузыря, м^3 ;
 S_b - площадь поверхности газового пузыря, м^2 ;
 n - количество пузырей газа в жидкости;
 D - коэффициент молекулярной диффузии озона в воде и растворе, $\text{м}^2/\text{с}$;
 t_1 - среднее время подъема пузырей газа в реакторе озонирования, с ;
 J_g - константа скорости выхода озона из пузыря, с^{-1} ;
 y - коэффициент, связывающий концентрации озона в газовой фазе и в жидкости при насыщении;
 $z, x=z/h$ - абсолютная и относительная координаты в одномерной системе координат, м ;
 $t, \tau=J_g \cdot t$ - абсолютное и относительное время озонирования, с ;
 ξ - переменная интегрирования.

Анотація

Бакер Адель Халіль. Математична модель озонування окрашених стічних вод в борботажному реакторі. Дисертація - рукопис на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.23.04 "Водопостачання, каналізація", Київський державний університет будівництва та архітектури, Київ, 1995 р.

Проведено математичне моделювання і лабораторні дослідження процесу озонування забруднених краскою і чистих вод в борботажному реакторі з врахуванням різних механізмів взаємодії озону з красителями і гідродинамічних умов його роботи. На підставі розроблених математичних моделей і аналізу дослідних даних запропоновані методи розрахунку технологічних і конструктивних параметрів реакторів озонування.

Ключові слова: реактор, математична модель, озонування, стічна вода, реакція, краситель.

Summary

Baker Adel Halil. Mathematical model of sewage and dyed waters ozonation in bubble column reactor. Dissertation is the manuscript for receiving of scientific degree of candidate of technical sciences on speciality 05.23.04 "Water supply, sewerage", Kiev State University of Building and Architecture, Kiev, 1995.

The mathematical modelling and laboratory investigations of ozonation process of wastewater and pure water in bubble column reactor has been executed with taking into consideration various mechanisms of interaction of ozone with dyes and hydrodynamics conditions of his work. The calculation methods of technological and structural parameters of ozonation reactors has been suggested on the basis of elaborated mathematical models and analysis of experimental data.

Principal words: reactor, mathematical model, ozonation, sewage, reaction, dye.

Шлп. до друку 26/2, 95 Формат 60×84¹/₁₆. Папір
друк. № 2 Друк офсетний. Умови друк. арк. 10
Умови фарбо-відб. 10 Облік-вид. арк. 10
Тираж 100 Зам. № 5-5409

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

288 796

AB 33.789

AB 33.789