

А.О. Самсоны-Тодоров, В.В. Гончарук

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЖНЫХ ФОТОРЕАКТОРОВ
С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ВОДООЧИСТКИ**

Институт коллоидной химии и химии воды
им. А.В. Думанского НАН Украины, г. Киев

Показана функциональная связь между значениями мощности лампы погружного фотореактора (световой поток), энергетической экспозиции, производительности реактора, оптической плотности жидкости, заполняющей его, и эффективного (оптимального) параметра радиуса реактора. Проведена оценка косвенных ошибок определения эффективных радиусов погружных реакторов и показана их зависимость от длины лампы, используемой для УФ-излучения, и оптической плотности жидкости. Доказано, что при одинаковых значениях энергетической экспозиции радиус эффективного слоя в концентрических реакторах будет на 10 % меньшим, чем в лотковых реакторах (в которых световой поток распространяется параллельным пучком).

Ключевые слова: облученность, оптическая плотность жидкости, световой поток, энергетическая экспозиция, эффективный радиус фотореактора.

Введение. Традиционные методы очистки воды в существующих схемах водоподготовки, включающих стадию хлорирования, способствуют образованию в питьевой воде чрезвычайно токсических и канцерогенных хлорорганических производных [1]. Как правило, основные органические примеси природных вод – гумусовые вещества (ГВ) недостаточно полно удаляются при использовании традиционных методов очистки воды, включая коагулирование и флотацию [2], что обуславливает актуальность поиска новых эффективных методов очистки воды.

Одним из таких методов является фотокатализ, эффективное применение которого зависит от качества воды, подбора соответствующего типа кислородсодержащего окислителя, применяемого для очистки (озон, пероксид водорода, кислород, сама вода), источника УФ-излучения, технологических параметров процесса окисления и др.

Оптимальные режимы очистки и обеззараживания модельных и природных вод фотокаталитическим способом сильно зависят от геометрии

ческих параметров фотореактора, подачи реагентов и катализаторов, подбора спектров облучения и рационального использования реактора [3].

Несмотря на многочисленные исследования, посвященные моделированию систем фотокаталитического окисления, в литературе недостаточно освещен факт довольно существенного влияния вакуумного ультрафиолетового излучения на процессы, протекающие в реакторе. В то же время с развитием новых источников света (эксимерные, ксеноновые источники света, новое поколение кварцевых ламп типа ДРБ) задача использования вакуумного излучения становится технически выполнимой.

Цель данной работы – разработка модели расчета эффективных параметров облученности и энергетической экспозиции как функции оптической плотности обрабатываемой жидкости и радиуса реактора с погружными источниками света.

Модель установки с погружными источниками облучения (рисунок) можно представить в виде коаксиальных цилиндров длиной L (длина УФ-лампы) и радиусами r, R_1, R , где r – радиус УФ-лампы; R_1 – радиус защитного кожуха УФ-лампы; R – радиус концентрического слоя обрабатываемой воды, R_0 – радиус реактора, см.

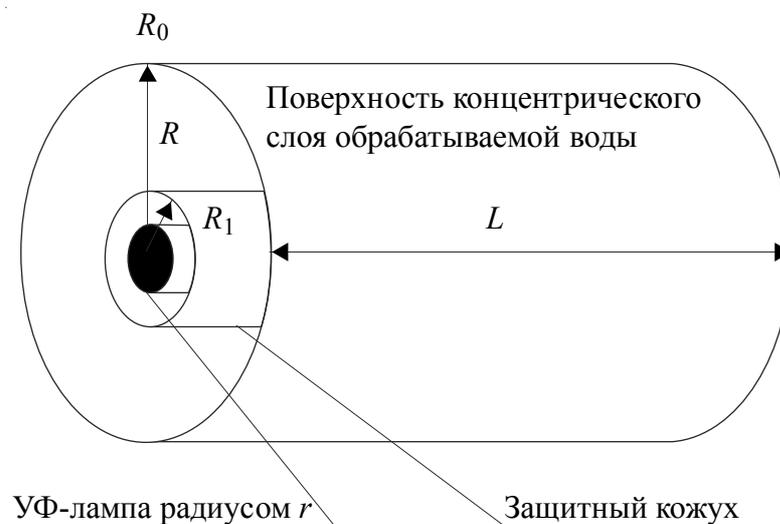


Схема установки с погружными источниками УФ-излучения.

В соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера облученность пучка монохроматического света по мере прохождения через слой воды изменяется следующим образом:

$$E_{\lambda_i} = E_{0\lambda_i} \exp(-A_{\lambda_i} X) = E_{0\lambda_i} \exp(-A_{\lambda_i} (R - R_1)), \quad (1)$$

где $E_{0\lambda i}$ – величина облученности света при длине волны λi на внешней поверхности кожуха R_1 , Вт; $E_{\lambda i}$ – облученность в слое X , Вт см^{-2} ; $X = R_0 - R_1$ – толщина облучаемого слоя, см; $A_{\lambda i}$ – коэффициент поглощения раствора при длине волны λi , см^{-1} .

Уравнение (1) применимо при условии малого изменения поверхности концентрических слоев среды, окружающей кожух лампы, когда пучок света можно считать параллельным, т.е. при условии

$$\frac{R - R_1}{R} \ll 1 \quad (2)$$

Учитывая изменения поверхности концентрических слоев среды, окружающей кожух лампы, вследствие рассеивания света линейных источников изменение облученности при λi описывается выражением

$$E^{\lambda i} = E_0^{\lambda i} \frac{R_1 \exp(-A_{\lambda i}(R - R_1))}{R} \quad (3)$$

а среднее значение облученности $E_{\text{cp}}^{\lambda i}$ при заданной толщине концентрического слоя обрабатываемой воды $R_0 - R_1$ можно рассчитать по уравнению [4]

$$E_{\text{cp}}^{\lambda i} = \frac{2R_1 E_0^{\lambda i} \left[1 - \exp(-A_{\lambda i}(R_0 - R_1)) \right]}{A_{\lambda i}(R_0^2 - R_1^2)}, \quad (4)$$

где $E_0^{\lambda i}$ – величина облученности света при длине волны λi ; $E_{\text{cp}}^{\lambda i}$ – среднее значение облученности света при длине волны λi , Вт $\cdot \text{см}^{-2}$.

Общий световой поток монохроматического света $I_0^{\lambda i}$, Вт с длиной волны λi , прошедший через защитный кожух радиусом R_1 , равен произведению облученности $E_0^{\lambda i}$ на величину его площади S_1 :

$$I_0^{\lambda i} = E_0^{\lambda i} S_1 = 2\pi R_1 L E_0^{\lambda i}, \quad (5)$$

где L – расстояние, которое проходит вода под облучением, равное длине источника облучения, см.

С учетом (5) уравнение для среднего значения облученности E_{cp} принимает вид:

$$E_{\text{cp}}^{\lambda i} = I_0^{\lambda i} \frac{[1 - \exp(-A_{\lambda i}(R_0 - R_1))]}{\pi L A_{\lambda i} (R_0^2 - R_1^2)}, \quad (6)$$

или в единицах оптической плотности $A_{\lambda i} = 2,303D_{\lambda i}$:

$$E_{\text{cp}}^{\lambda i} = I_0^{\lambda i} \frac{(1 - 10^{-D_{\lambda i}(R_0 - R_1)})}{2,303\pi L D_{\lambda i} (R_0^2 - R_1^2)}, \quad (7)$$

где $D_{\lambda i}$ – оптическая плотность раствора при длине волны λi , см^{-1} .

Величину светового потока $I_0^{\lambda i}$, прошедшего через защитный кожух с коэффициентом пропускания k_1 , можно описать как

$$I_0^{\lambda i} = I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1, \quad (8)$$

где $I_{\text{об.пов}}^{\lambda i}$ – общий световой поток с длиной волны λi , падающий на внешнюю поверхность защитного кожуха.

В качестве материала для защитного кожуха, как правило, используют кварцевое стекло марок КУ и КВ-Р с коэффициентом пропускания $k_1 \geq 0,8$ для ультрафиолетового света в диапазоне длин волн 250 – 400 нм, а в случае применения кварца марки КУ-1 или супрасила (зарубежный аналог кварца марки КУ-1) – $k_1 \geq 0,8$ в диапазоне длин волн 180 – 400 нм [5]. Следует учитывать, что коэффициент k_1 включает в себя коэффициент пропускания кварцевого стекла, а также коэффициент отражения от внутренней поверхности кварцевого чехла.

Величина светового потока, падающего на поверхность защитного кожуха лампы, функционально зависит от зазора между поверхностями лампы и кожуха. Если потерями от отражения, светорассеивания и люминесценции пренебрегают, то функции изменения освещенности и светового потока считаются идентичными [6], т.е.

$$\frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i}}{I_{\text{об}}^{\lambda i}} = \frac{E_{\text{об.пов}}^{\lambda i}}{E_{\text{об}}^{\lambda i}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{об}}^{\lambda i}$ – общий световой поток полосы излучения лампы при длине волны λi , Вт; $E_{\text{об}}^{\lambda i}$ и $E_{\text{об.пов}}^{\lambda i}$ – облученность света при длине волны λi на поверхности лампы и на внутренней поверхности защитного кожуха, Вт·см⁻².

Тогда, согласно (3), выражение для светового потока, падающего на внешнюю поверхность защитного кожуха, имеет вид:

$$I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} = I_{\text{об}}^{\lambda i} \frac{r \cdot \exp(-A_{\lambda i}^r (R_1 - r))}{R_1} = I_{\text{об}}^{\lambda i} \frac{r \cdot 10^{-D_{\lambda i}^r (R_1 - r)}}{R_1}, \quad (10)$$

где $A_{\lambda i}^r$ – коэффициент поглощения; $D_{\lambda i}^r$ – оптическая плотность раствора или газа в зазоре между лампой и кожухом, см⁻¹.

Из (10) следует, что, варьируя газовым или жидкостным наполнением зазора между лампой и поверхностью кожуха, можно использовать его в качестве светофильтра, а также для получения озона при излучении лампы светом при длине волны 210 нм.

При минимальном зазоре между лампой и защитным кожухом $R_1 \approx r$ выражение для величины общего светового потока на внешней поверхности защитного кожуха запишем следующим образом:

$$I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} = I_{\text{об}}^{\lambda i}, \quad (11)$$

$$I_0^{\lambda i} = I_{\text{об}}^{\lambda i} \cdot k_1. \quad (12)$$

В общем случае уравнение (7) принимает вид:

$$E_{\text{ср}}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 \left[1 - \exp(-A_{\lambda i} (R_0 - R_1)) \right]}{\pi L A_{\lambda i} (R_0^2 - R_1^2)}, \quad (13)$$

или для всего спектра излучения:

$$E_{\text{cp}}^{\Sigma} = \sum_{\lambda i} \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 \left[1 - \exp(-A_{\lambda i}(R_0 - R_1)) \right]}{\pi L A_{\lambda i} (R_0^2 - R_1^2)}. \quad (14)$$

Среднюю энергетическую экспозицию УФ-излучения ($F_{\text{cp}}^{\lambda i}$, Дж·см⁻²), прошедшего через реактор, для монохроматического света с длиной волны λi за время t_{cp} запишем как

$$F_{\text{cp}}^{\lambda i} = E_{\text{cp}}^{\lambda i} t_{\text{cp}}. \quad (15)$$

Величину энергетической экспозиции при длине волны 254 нм можно считать дозой бактерицидного излучения, и она является определяющей характеристикой при обеззараживании воды и воздуха ультрафиолетовыми лучами [7, 8].

Учитывая, что продолжительность облучения раствора t_{cp} в секундах составляет

$$t_{\text{cp}} = \frac{\pi L (R_0^2 - R_1^2)}{Q} \quad (16)$$

(здесь Q – расход воды, см³/с), средняя энергетическая экспозиция УФ-излучения, прошедшего через реактор, принимает вид:

$$F_{\text{cp}}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 (1 - \exp(-A_{\lambda i}(R_0 - R_1)))}{A_{\lambda i} Q}. \quad (17)$$

В результате величина полной энергетической экспозиции (F) будет представлять собой сумму таковых величин для всех длин волн спектра излучения:

$$F^{\Sigma} = \sum_{\lambda i} \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 (1 - \exp(-A_{\lambda i} (R_0 - R_1)))}{A_{\lambda i} Q}, \quad (18)$$

или в единицах оптической плотности:

$$F^{\Sigma} = \sum_{\lambda i} \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 (1 - 10^{-D_{\lambda i} (R_0 - R_1)})}{2,303 D_{\lambda i} Q}. \quad (19)$$

Следует отметить, что величина F является одной из самых важных характеристик фотохимического реактора. Из (19) видно, что среднюю энергетическую экспозицию $F_{\text{cp}}^{\lambda i} = E_{\text{cp}}^{\lambda i} t_{\text{cp}}$ излучения для монохроматического света с длиной волны λi можно определить как величину светового потока, поглощенного жидкостью с коэффициентом поглощения $2,303 D_i$, см⁻¹ в протоке при расходе воды Q , см³/с.

Если сравнить целесообразность применения уравнений (3), (15) и (19) для расчета облученности и энергетической экспозиции, то можно заметить, что уравнение (3) наиболее удобно к применению в случае возможности экспериментального измерения величины облученности $E_0^{\lambda i}$ на поверхности защитного кожуха для света с длиной волны λi или для суммарных световых потоков.

Уравнения (15) и (19), учитывая (10), целесообразно применять при эмпирическом расчете доз УФ-излучения, используя известные (паспортные) данные спектрального распределения энергии для конкретной лампы.

Из (19) следует, что при $R_0 \rightarrow \infty$ энергетическую экспозицию облученности можно представить упрощенно:

$$F_{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1}{2,303 D_{\lambda i} Q}. \quad (20)$$

При этом функция $k_0 = (1 - 10^{-D_{\lambda i} (R_0 - R_1)})$, которую часто называют коэффициентом использования облученности [4], будет стремиться к единице. Так, при длине волны 185 нм и толщине облучаемого концентрического слоя воды 12,6 мк, $k_0 = 0,9$ [9].

Преобразуя (19), получим выражение для определения производи-

тельности фотохимического реактора в зависимости от оптической плотности раствора, заданной энергетической экспозиции излучения и радиуса реактора:

$$Q = \sum_{\lambda_i} \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda_i} k_1 (1 - 10^{-D_{\lambda_i}(R_0 - R_1)})}{2,303 D_{\lambda_i} F_{\Sigma}}. \quad (21)$$

Главным (эксплуатационным) техническим параметром цилиндрического реактора является его эффективный радиус, т.е. суммарное значение радиуса защитного кожуха лампы и концентрического слоя воды вокруг него, где проходят основные фотохимические превращения. Соответствующие ему средние значения энергетической экспозиции и облученности можно определить при вычислении их предельных величин.

Анализируя выражение (7) для предельно малых значений радиуса реактора, имеем:

$$\lim_{R_0 \rightarrow R_1} E_{\text{cp}}^{\lambda_i} = \lim_{R_0 \rightarrow R_1} \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda_i} k_1 (1 - 10^{-(D_{\lambda_i}(R_0 - R_1))})}{2,303 \pi L D_{\lambda_i} (R_0^2 - R_1^2)} \rightarrow \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda_i} k_1}{2 \pi L R_1}, \quad (22)$$

$$E_{\text{cp}}^{\lambda_i} \rightarrow E_0^{\lambda_i}.$$

То есть средняя облученность на поверхности защитного кожуха равна исходной величине.

Следует отметить, что упрощенного значения для средней облученности $E_{\text{cp}}^{\lambda_i}$ при радиусах $R_0 \rightarrow \infty$ не существует. Поэтому рассмотрим варианты значений $F_{\text{cp}}^{\lambda_i}$ и радиуса реактора при фиксированных величинах функции $D(R_0 - R_1)$:

$$1. D(R_{0,99} - R_1) = 2.$$

При таком значении функции в толщине концентрического слоя $(R_{0,99} - R_1)$ происходит поглощение 99 % энергии излучения, т.е. коэффициент облученности $k_0 = (1 - 10^{-D_{\lambda_i}(R_{0,99} - R_1)})$ составляет 0,99. Средние значения энергетической экспозиции и облученности можно упростить:

$$F_{\text{cp}0,99}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 0,99}{2,303 D Q} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 0,99 (R_{0,99} - R_1)}{4,606 Q}, \quad (23)$$

$$E_{\text{cp}0,99}^{\lambda i} = \frac{I_6^{\lambda i} k_1 0,034}{L(R_1 + \frac{1}{D_{\lambda i}})} \quad (24)$$

при радиусе облучаемого концентрического слоя воды

$$R_{0,99} = R_1 + \frac{2}{D_{\lambda i}}. \quad (25)$$

$$2. \quad D(R_{0,9} - R_1) = 1.$$

При таком значении функции в толщине концентрического слоя $(R_{0,9} - R_1)$ происходит поглощение 90 % энергии излучения, т.е. $k_0 = 0,9$. Это означает, что среднюю энергетическую экспозицию можно также упростить:

$$F_{\text{cp}0,9}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 0,9}{2,303 D_{\lambda i} Q} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 0,9 \cdot (R_{0,9} - R_1)}{2,303 Q}, \quad (26)$$

а среднюю облученность представить как

$$E_{\text{cp}0,9}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 0,124}{L(2R_1 + \frac{1}{D_{\lambda i}})} \quad (27)$$

при радиусе облучаемого концентрического слоя

$$R_{0,9} = R_1 + \frac{1}{D_{\lambda i}}. \quad (28)$$

Абсолютную систематическую относительную ошибку косвенных

измерений для функции двух переменных (в нашем случае R_1 и D) можно определить согласно следующим уравнениям [10]:

$$\Delta f(R_1, D) = \sqrt{\left(\Delta R \frac{\delta f(R_1, D)}{\delta R_1}\right)^2 + \left(\Delta D \frac{\delta f(R_1, D)}{\delta D}\right)^2}, \quad (29)$$

$$\frac{\Delta f(R_1, D)}{f(R_1, D)} = \sqrt{\left(\Delta R \frac{\delta \ln f(R_1, D)}{\delta R_1}\right)^2 + \left(\Delta D \frac{\delta \ln f(R_1, D)}{\delta D}\right)^2}, \quad (30)$$

где ΔR и ΔD – соответственно ошибки измерения радиуса и оптической плотности.

Следовательно, для радиусов $R_{0,99}$ и $R_{0,9}$ будем иметь выражения для абсолютной ошибки:

$$\Delta R_{0,99} = \sqrt{\Delta R^2 + \left(\frac{2\Delta D}{D^2}\right)^2}, \quad (31)$$

$$\Delta R_{0,9} = \sqrt{\Delta R^2 + \left(\frac{\Delta D}{D^2}\right)^2}, \quad (32)$$

а для относительной ошибки –

$$\frac{\Delta R_{0,9}}{R_{0,9}} = \frac{\Delta R_{0,99}}{R_{0,99}} = \sqrt{\frac{\Delta R^2}{R_1^2} + \frac{\Delta D^2}{D^2}}. \quad (33)$$

При предельном малом значении оптической плотности раствора ($D \approx 0,01 \text{ см}^{-1}$) ошибка будет максимальной:

$$\Delta R_{0,99\text{max}} = \sqrt{\Delta R^2 + \frac{4}{D^2}}, \quad (34)$$

$$\Delta R_{0,9\max} = \sqrt{\Delta R^2 + \frac{1}{D^2}} \quad (35)$$

Необходимо отметить, что ошибка измерения диаметра штангенциркулем составляет 0,1 мм. Однако допуск прямолинейности для труб длиной до 1000 мм не должен превышать 0,4 % от длины трубы, а для труб длиной свыше 1000 мм – 0,6 % [11]. Так как допуск изготовления кварцевого стекла значительно больше точности измерения штангенциркулем, то его можно принять за ошибку измерения. Таким образом, величина $\Delta R = 0,004L$ составит ошибку измерения радиуса кожуха лампы для их длины до 1000 и $\Delta R = 0,006L$ – до 10000 мм.

Оптическая плотность природных вод при 254 нм составляет не менее $0,2 \text{ см}^{-1}$, а радиус кожуха для существующих ламп низкого давления типа ДРБ – 15 мм. В этом случае при длине лампы 500 мм относительная ошибка измерений составляет ~13 %. Оценка относительной ошибки указывает на невозможность применения для расчетов эффективного радиуса реактора $R_{0,99}$, так как само допущение вычисления предполагает, что предельная ошибка расчета поглощения не превышает один процент, а реальная – на порядок больше. Поэтому в качестве эффективного радиуса облучаемого концентрического слоя целесообразно использовать значение $R_{0,9}$, ошибка вычисления которого сопоставима с интервалом заданной относительной погрешности в 10 %. В мировой практике для расчета аппаратов обеззараживания УФ-излучения также принято применять коэффициент использования облученности $k_0 = 0,9$ [4, 12].

Таким образом, уравнения (26) – (28) можно считать базовыми для упрощенного расчета геометрических и фотохимических параметров фотокаталитических радиальных реакторов и погружных бактерицидных установок.

Выражение $I_{\text{об.пов}}^{\lambda_i} k_1 (1 - 10^{-D(R_0 - R_1)})$ представляет собой величину поглощенного светового потока параллельного пучка света, прошедшего через слой воды толщиной $R_0 - R_1$. Для погружных реакторов оно реально выполнимо при условии (2) малого изменения концентрических слоев поверхности среды, окружающей кожух лампы, т. е. при большом радиусе кожуха R_1 , а также при малом радиусе, но при небольшом его отклонении от эффективного радиуса реактора $R_{0,9}$, что возможно при больших значениях оптической плотности.

В остальных случаях

$$F_{\text{пог}}^{\lambda i} = E_{\text{пог}}^{\lambda i} t = \frac{I_{\text{пог}}^{\lambda i}}{2,303 D_{\lambda i} Q}. \quad (36)$$

Поглощенный световой поток монохроматического света ($I_{\text{пог}}^{\lambda i}$) в кольце толщиной $R_0 - R_1$, согласно (3), равен

$$I_{\text{пог}}^{\lambda i} = I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k \left[1 - \frac{R_1 10^{-D_{\lambda i}(R_0 - R_1)}}{R_0} \right]. \quad (37)$$

Тогда соответствующее выражение для энергетической экспозиции принимает вид:

$$F_{\text{пог}}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k \left[1 - \frac{R_1 10^{-D_{\lambda i}(R_0 - R_1)}}{R_0} \right]}{2,303 D_{\lambda i} Q}. \quad (38)$$

Для практических целей эта формула менее информативна и менее сложна для расчета, чем выражение для величины средней экспозиции.

Рассмотрим варианты значений $F_{\text{пог}}^{\lambda i}$ при фиксированной величине функции $D_{\lambda i}(R_{0,9} - R_1) = 1$. При таком значении функции и радиусе реактора $R_{0,9}$ в толщине концентрического слоя ($R_{0,9} - R_1$) происходит поглощение не менее 90 % энергии излучения. Это означает, что энергетическую экспозицию можно представить в упрощенном виде:

$$F_{0,9\text{пог}}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 \left[1 - \frac{R_1 10^{-1}}{R_{0,9}} \right]}{2,303 D_{\lambda i} Q} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 (R_{0,9} - R_1) \left[1 - \frac{R_1}{10 R_{0,9}} \right]}{2,303 Q}. \quad (39)$$

Анализируя полученное выражение, можно заметить, что при малом зазоре $R_{0,9} - R_1$ значение энергетической экспозиции, согласно (26), равно его среднему значению :

$$\min F_{0,9\text{пор}}^{\lambda i} = \frac{I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 (R_{0,9} - R_1) \left[1 - \frac{R_1}{10R_{0,9}} \right]}{2,303Q} =$$

$$\frac{0,9 I_{\text{об.пов}}^{\lambda i} k_1 (R_{0,9} - R_1)}{2,303Q} = F_{\text{ср}0,9}^{\lambda i}, \quad (40)$$

а при большом зазоре $R_{0,9} > R_1 -$

$$\max F_{0,9\text{пор}}^{\lambda i} = \frac{I_6^{\lambda i} k_1 (R_{0,9\text{к}} - R_1) \left[1 - \frac{R_1}{10R_{0,9\text{к}}} \right]}{2,303Q} =$$

$$\frac{I_6^{\lambda i} k_1 (R_{0,9\text{к}} - R_1)}{2,303Q} \approx 1,1 F_{\text{ср}0,9}^{\lambda i}. \quad (41)$$

Таким образом, реальные отклонения эффективных радиусов реакторов лоткового типа (в которых световой поток распространяется параллельным пучком света) и концентрических реакторов невелики и не превышают 10 %. То есть при одинаковом значении энергетической экспозиции радиус эффективного слоя в концентрических реакторах будет на 10 % меньше, чем в лотковых.

Проведенную оценку косвенной ошибки определения эффективных радиусов погружных реакторов (31) для ламп до одного метра выразим следующим образом:

$$\Delta R_{0,9} = \sqrt{16 \cdot 10^{-6} L^2 + \left(\frac{\Delta D}{D^2} \right)^2}, \quad (42)$$

для ламп свыше одного метра –

$$\Delta R_{0,9} = \sqrt{36 \cdot 10^{-6} L^2 + \left(\frac{\Delta D}{D^2}\right)^2}. \quad (43)$$

Выводы. На основании уравнений (10), (26), (40), (41) показана функциональная связь между значениями мощности лампы погружного фотореактора (световой поток), энергетической экспозиции, производительности реактора, оптической плотности жидкости, заполняющей его, и эффективного (оптимального) радиуса реактора. В случае использования широкого спектра излучения для каждой длины волны света должен быть свой эффективный радиус. Так, для области вакуумного УФ-излучения эта величина определяется микронами, для бактерицидной области света – сантиметрами, а для видимой – десятками сантиметров.

Предложенная модель расчета эффективных радиусов и средней энергетической экспозиции легла в основу проектирования и изготовления фотокаталитических реакторов и камер обеззараживания серийных аппаратов очистки воды "Вега" ТУУ 29.2-05417348-010:2007 и установок обеззараживания воды и воздуха "Проминь" ТУУ 29.2-05417348-013:2011.

Резюме. Показано функціональний зв'язок між значеннями потужності лампи заглибного фотореактора (світловий потік), енергетичною експозиції, продуктивності реактора, оптичною густини рідини, що заповнює його, і ефективного (оптимального) параметра радіуса реактора. Проведено оцінку непрямих похибок визначення ефективних радіусів заглиблених реакторів і показана їх залежність від довжини лампи, використовуваної для УФ-випромінювання, та оптичної густини рідини. Доведено, що при однаковому значенні енергетичної експозиції радіус ефективного шару в концентричних реакторах буде на 10 % меншим, ніж у лоткових реакторах (у які світловий потік поширюється паралельним пучком світла).

A.O. Samsoni-Todorov, V. V. Goncharuk

MODELING AND DESIGN OF AN ANNULAR PHOTOREACTORS WITH A UV-IRRADIATION OPTIMUM PARAMETERS

Summary

Functional communication between values of capacity of radiant energy

of lamps, fluence, productivity of the reactor, optical density of the liquid filling it, and effective (optimum) parameter of radius of the an annular photoreactor is shown. The assessment of indirect errors of determination of effective radiuses of an annular reactors is carried out and dependence of value of this mistake on length of a lamp used for UV-irradiation and optical density of liquid is shown. It is proved that at identical value of a fluence the radius of an effective layer in concentric reactors will be for 10 % smaller, than in reactors in which light a stream extends a parallel beam of light.

Список использованной литературы

- [1] *Thorsen T.* Membrane filtration of humic substances State of the art // *Water Sci. and Technol.* – 1999. – **40**, N9. – P.105 – 112.
- [2] *Herrmann J.-M.* Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants // *Catal. Today.* – 1999. – **53**. – P. 115 –129.
- [3] *Warren J. Smith.* Modern Optical Engineering; the Design of Optical Systems /3rd ed. – New York: Mcgraw-Hill, 2000. – 617 p.
- [4] *Соколов В.Ф.* Обеззараживание воды бактерицидными лучами – М.: Стройиздат, 1964. – 233 с.
- [5] *Золотарев В.М., Морозов В.М., Смирнова Е.В.* Оптические постоянные природных и технических сред. – Л.: Химия, 1984. – 218 с.
- [6] *Kuhn H.J., Braslavsky S.E., Schmidt R.* Chimie pure et appliquee: Chemical actinometry (IUPAC Technical Report) // *Pure and Appl. Chem.*– 2004. – **76**, N12. – P. 2105 – 2146.
- [7] *Потапенко Н.Г., Савлук О.С.* Использование ультрафиолетового излучения в практике обеззараживания воды // *Химия и технология воды.* – 1991. – **13**, №12. – С.1117 – 1129.
- [8] *Гончарук В.В., Кравець В.В., Шаповал О.С. та ін.* До питання знезаражування стічних вод інфекційних лікарень від вірусів ультрафіолетовим випромінюванням // *Довкілля та здоров'я.* – 2005. – №5. – С 18 – 23.
- [9] *Пат. 96371 Україна, МПК C02F 1/32.* Спосіб очистки води від поверхнево-активних речовин / В.В. Гончарук, О.О. Самсоні-Тодоров, О.О. Самсоні-Тодорова, В.А. Яременко. – Опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.
- [10] *Зайдель А.Н.* Погрешности измерений физических величин – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
- [11] *ОСТ 21-42-90.* Трубы из прозрачного кварцевого стекла. – Введ. 01.01.2003.
- [12] *Bolton J.R., Linden K.G.* Standardization of Methods for Fluence (UV Dose) Determination in Bench-Scale UV Experiments // *J. Environ. Eng.* – 2003. – **129**, N3. – P. 209 – 215.

Поступила в редакцию 26.04.2012 г.