

# Расчетная модель фотохимического реактора с импульсной ксеноновой лампой для очистки воды

**А.Б.Ивашкин**, доцент, канд. техн. наук,

**А.С.Камруков**, заведующий отделом, доцент, канд. техн. наук,

**Д.О.Новиков**, доцент, канд. техн. наук,

**К.И.Малков**, аспирант

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

e-mail: kamrukov@mail.ru, zerooo@list.ru

## Ключевые слова:

импульсная ксеноновая лампа,  
фотохимический реактор,  
ультрафиолетовое излучение,  
водоочистка.

*Разработана и реализована расчетная модель фотохимического реактора на основе импульсной ксеноновой лампы, предназначенного для очистки воды от микробиологических или химических загрязнителей. Модель включает несколько расчетных модулей, каждый из которых описывает основные физические процессы, происходящие внутри фотохимического реактора: модуль расчета формы течения, модуль расчета траекторий частиц загрязнителя, модуль расчета излучательных характеристик импульсной лампы, модуль фотометрического расчета, определяющий энергетическую дозу облучения частиц загрязнителя. Расчет излучательных характеристик лампы основан на положениях физики газового разряда и на ряде эмпирических зависимостей, для расчета остальных параметров использовано численное моделирование. Верификация модели проведена при сравнении расчетной и экспериментальной эффективности двух типов конструкции фотохимических реакторов с использованием известного загрязнителя. Разработанная расчетная модель позволяет проводить многопараметрическую оптимизацию конструкции и режимных параметров импульсных фотохимических реакторов с целью повышения их энергетической эффективности и степени очистки воды от различных химических и биологических загрязнителей.*

## 1. Введение

Фотохимическая обработка воды, осуществляемая при ее облучении ультрафиолетовым (УФ) излучением, рассматривается в настоящее время как один из наиболее эффективных и экологичных методов очистки и обеззараживания питьевой воды и жидких техногенных стоков [1, 2]. Эффективность такой обработки определяется энергетической дозой облучения ( $\text{Дж}/\text{см}^2$ ), равной произведению интенсивности излучения в актуальном спектральном диапазоне ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) и времени воздействия (с) [3].

С биологической точки зрения ультрафиолетовое обеззараживание воды основано на способности волн определенной длины проникать сквозь мемб-

раны (оболочки) клеток и воздействовать на нуклеиновые кислоты РНК и ДНК. Поглощая высокоэнергетичные фотоны УФ-диапазона, нуклеиновые кислоты получают значительные повреждения, в результате которых клетка теряет способность к делению. Кроме того, УФ-излучение наносит повреждение белковым структурам и мембранам клеток, что неизбежно приводит к их гибели. Также хорошо известно, что УФ-излучение способно разрушать широкий спектр органических веществ [1, 2]. Очистка воды при помощи УФ-ламп может осуществляться за период времени порядка нескольких секунд, поэтому производительность такого процесса может быть значительной [2].

Обработка питьевой и сточных вод осуществляется в специальных устройствах — фотохимических реакторах, конструкция которых оказывает значительное влияние на эффективность обеззараживания и степень разрушения органических соединений. В качестве источников УФ-излучения традиционно используются ртутные лампы низкого давления, обладающие максимальной среди известных технических источников эффективностью преобразования электрической энергии в коротковолновое УФ-излучение [2].

В настоящее время оборудование на базе ртутных ламп низкого давления проработано достаточно глубоко, накоплен богатый опыт их разработки и производства [2]. Крупнейшие мировые компании вкладывают значительные средства в оптимизацию конструкции фотохимических реакторов, для чего наравне с традиционными экспериментальными методами, требующими, как правило, значительных затрат, в последнее время применяются современные методы, основанные на численном моделировании. Известно, что полученные результаты позволили повысить эффективность оборудования не менее чем на 45 % [3] и сейчас многие вопросы, связанные с ее повышением, можно считать решенными.

В России в настоящее время не существует какой-либо стандартизированной методики расчета систем очистки воды УФ-излучением. Как наиболее близкую к поставленной задаче в нашей стране можно выделить методические указания Минздрава России МУ 2.1.5.732–99 [4], которые устанавливают основные гигиенические требования к организации обеззараживания сточных вод УФ-излучением. В этом документе приведена методика контроля дозы излучения, основанная на учете интенсивности бактерицидного излучения в камере обеззараживания, времени пребывания воды в ней [4]. Данная методика проводит расчет по сильно усредненным параметрам и не учитывает ряд ключевых факторов.

Кроме ртутных ламп низкого давления, промышленностью серийно производится ряд иных устройств: ртутные лампы среднего давления, эксимерные лампы, светодиоды и импульсные ксеноновые лампы. Последние следует выделить особо, так как в отличие от других они излучают сплошной спектр и имеют на порядки превосходящую интенсивность излучения, что определяет их потенциально высокую эффективность и универсальность при очистке воды от различных типов загрязнителей.

Однако научно обоснованные принципы конструирования фотохимических реакторов на их основе отсутствуют, а опыт, накопленный при создании оборудования на основе ртутных ламп низ-

кого давления, мало применим, если в реакторе используется ксеноновая лампа. Это связано, с одной стороны, с режимом ее работы: в отличие от ртутной лампы, работающей в непрерывном режиме с малой интенсивностью, ксеноновая лампа работает в импульсно-периодическом режиме, практически мгновенно создавая высокоинтенсивный поток излучения, а с другой — со спектром излучения, перекрывающим, в отличие от ртутной лампы, весь спектральный диапазон, начиная от коротковолнового ультрафиолета (границы пропускания кварцевой колбы лампы) до инфракрасного излучения.

Впервые оптимизация оборудования на основе импульсных ксеноновых ламп проведена компанией Lightstream Technologies, Inc при разработке цилиндрических реакторов для установок импульсного УФ-обеззараживания воды. В них по всей длине лампы размещены небольшие пластины различного размера и геометрии [5], формирующие оптимальную гидродинамическую структуру потока, что, несмотря на повышение эффективности, приводило к значительному удорожанию самого оборудования. К сожалению, в открытых источниках опубликованы лишь изображения фотохимических реакторов, а информация о методике расчета отсутствует.

## 2. Расчетная модель

В данной работе предложена расчетная модель, позволяющая определять дозы, набираемые частицами при прохождении через фотохимический реактор (ФХР), в котором источником УФ-излучения является импульсная ксеноновая лампа. Модель основана на расчете возможных траекторий частиц загрязнителя и определении поля излучения импульсной лампы. Алгоритм расчета по модели представлен на рис. 1.

Излучательные характеристики плазмы рассчитываются по хорошо зарекомендовавшим себя за-

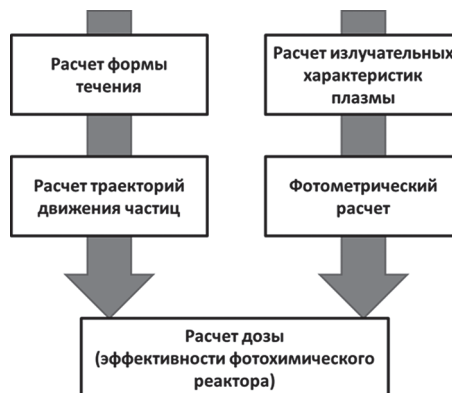


Рис. 1. Алгоритм расчета

висимостям из физики газового разряда. В качестве исходных параметров используются геометрия (тип) лампы, разрядное напряжение и емкость конденсаторной батареи.

#### Расчет поля излучения импульсной лампы

Алгоритм расчета следующий. Сначала на основании заданных параметров путем решения электротехнического уравнения контура с нелинейным элементом осуществляется расчет разрядного контура, который позволяет по полученному значению плотности тока  $j$ , А/см<sup>2</sup> определить, используя эмпирическую зависимость (1), температуру плазмы [6]:

$$T = 3,5 \cdot 10^3 \left( \frac{S_{pc}}{P_0} \right)^{\frac{1}{16}} \cdot j^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

где:  $S_{pc}$  — площадь сечения лампы, см<sup>2</sup>;  $P_0$ , Па — начальное давление в лампе.

Так как плазма в лампе является квазиравновесной на большей части импульса, степень ее ионизации определялась уравнением Саха. Расчет эмиссионных спектров ламп требует данных о спектральных коэффициентах поглощения ( $K_\lambda$ ) ксеноновой плазмы, которые определялись по зависимости, предложенной Биберманом–Норманом–Андреевым [7]. Спектральный поток трубчатой ксеноновой лампы с площадью боковой поверхности  $S_6 = \pi dlc$  учетом поглощения ( $K_{\lambda\text{проп}}$ ) и отражения ( $K_{\lambda\text{от}}$ ) колбой определялся по выражению:

$$P_\lambda = K_{\lambda\text{от}} \cdot K_{\lambda\text{проп}} \frac{11,9 \cdot 10^{15}}{\lambda^5} \cdot \frac{\pi \cdot S_6}{e^{\left( \frac{1,44 \cdot 10^7}{T \cdot \lambda} \right)} - 1} \cdot \left( 1 - e^{-\alpha \cdot K_\lambda \cdot d} \right), \quad (1)$$

где:  $T$  — температура плазмы, К;  $\lambda$  — длина волны, нм;  $\alpha = 0,9 \dots 1$  — поправочный коэффициент, зависящий от оптической толщины плазмы в лампе [6, 7].

Фотометрический расчет проводится численным моделированием излучения в поглощающей среде с учетом отражения и рассеивания, т.е. задача, по сути, сводилась к моделированию теплообмена излучением в поглощающей среде. В качестве граничных условий применяются результаты расчета излучательных характеристик, геометрия ФХР и показатель поглощения воды. Результатом расчета является поле излучения в каждой точке ФХР.

Для расчета формы течения используется численное моделирование на основании усредненных уравнений Рейнольдса с моделью турбулентного течения  $k-\omega$ . Граничные условия — геометрия ФХР и расход воды. Результаты решения позволяют получить тра-

ектории частиц. Зная траекторию частицы и поле излучения, можно определить дозу, набранную каждой частицей за время прохождения ФХР. Расчетная модель также учитывает спектр поглощения частицы загрязнителя.

#### Расчет формы течения и траекторий движения частиц

В настоящее время проведено большое количество исследований, посвященных сравнению и оценке применимости существующих моделей турбулентности для решения различных задач [8]. В результате анализа литературных данных установлено, что для численного моделирования оборудования для обработки сточных вод применяются две модели.

- RANS-модель (суть модели: замена мгновенных гидродинамических параметров в виде суммы двух слагаемых — осредненной величины и ее пульсационной составляющей) [9].
- LES-модель (рассчитываются только крупные вихри, а мелкие, масштаб которых меньше сетки, моделируются) [3].

В [3] также установлено, что LES-модель показывает лучшие результаты при моделировании формы течения. Там же указывается, что требования к вычислительным мощностям на несколько порядков превышают требования к RANS-модели. Сравнение траекторий частиц в режимах течения, характерных для фотохимического реактора и полученных по разным моделям, показало, что отличие составляет менее 5%. В связи с чем было принято решение использовать RANS-модели.

Основная задача при использовании RANS-модели — определение турбулентной вязкости  $\nu_t$ , которая принципиально отличается от коэффициента молекулярной вязкости  $\nu$  и не связана со свойствами жидкости, а определяется самим турбулентным течением. Если воспользоваться аналогией с кинетической теорией газов, то турбулентная вязкость может быть представлена в виде:

$$\nu_t \approx u_t l, \quad (3)$$

где:  $u_t$  — характерная пульсационная составляющая скорости;  $l$  — характерный масштаб турбулентности. Суть проблемы состоит в определении  $u_t$  и  $l$ . Для этого разработаны модели турбулентности, учитывающие влияние эффектов переноса посредством решения дополнительных (чаще всего двух) дифференциальных уравнений. К основным из них относятся  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  модели и модель Ментора (SST), представляющая собой комбинацию сильных сторон двух первых [10].

Для выбора модели турбулентности для расчета оборудования очистки сточных вод проведен численный эксперимент решения задачи по расчету течений в типовом фотохимическом реакторе с несколькими вариантами внутренней геометрии. Были установлены заметные отличия в результатах расчета, полученных с использованием модели турбулентности  $k-\epsilon$ , по сравнению с моделями  $k-\omega$  и SST, между которыми не было принципиальных различий в расчетах. Так, среднее время нахождения частиц в реакторе по модели  $k-\epsilon$  отличалось от моделей  $k-\omega$  и SST более чем на 45 %, а отличия между  $k-\omega$  и SST составили менее 5 %. Это объясняется тем, что фотохимический реактор имеет небольшие размеры (диаметр 50–80 мм), а течение жидкости в нем происходит с относительно небольшими скоростями, следовательно, можно считать, что большая часть расчета происходит в пристеночной области течения, где, как хорошо известно из [10], раскрываются все достоинства модели  $k-\omega$ . Применение SST для решения данной задачи представляется избыточным ввиду значительно большего времени, необходимого для расчета.

Задача рассматривалась в осесимметричной двухмерной постановке. Моделировалась активная часть фотохимического реактора. Источник излучения располагался по оси фотохимического реактора. Вход и выход раствора располагались снизу и сверху соответственно.

#### Определение эффективности фотохимического реактора

Последним этапом расчета является расчет эффективности фотохимического реактора. Она определяется по дозе излучения, набранной каждой частицей в результате прохождения фотохимического реактора, и ее соотношению с дозой, необходимой для деструкции данного вида загрязнителя.

На основании моделирования рассчитываются  $N$  траекторий частиц в виде значений  $x_i(t)$  и  $y_i(t)$ , также известно время пребывания частицы в реакторе  $t_i$ .

Дискретизация по времени составляет  $\frac{1}{\delta f}$  с, где  $f$ , Гц —

частота следования вспышек лампы, а  $\delta$  — коэффициент, характеризующий точность учета импульсного характера излучения. На основании фотометрического расчета рассчитывается поле падающего излучения  $G(x, y)$ .

Особенность используемого источника излучения в том, что он работает в импульсно-периодическом режиме. Следовательно, использование методики расчета дозы, набираемой частицей в реакторах на основе ртутной лампы, может приводить

к недостоверным результатам. Отличие заключается в том, что в стандартных методиках частица загрязнителя набирает дозу непрерывно с каждым шагом по времени [3, 9]. В данном случае доза набирается дискретно, так как частица облучается лишь в течение нескольких временных шагов, в остальное время никакого воздействия не оказывается. Еще одна особенность импульсно-периодического излучения заключается в заранее неизвестном положении частицы в момент, когда она будет облучена первый раз, пренебрежение данным фактом может значительно исказить результаты расчета.

Предложена следующая методика, учитывающая особенности источника излучения. Ввиду крайне малого времени вспышки лампы  $\tau$  по сравнению со временем пребывания частицы в реакторе она считается мгновенным процессом. Шаг по времени при расчете траекторий частиц выбирается в  $\delta$  раз меньше времени между импульсами  $f^{-1}$  (использовать величину  $\delta$  менее 10 не рекомендуется). Затем расчет дозы проводится  $\delta$  раз, в первом расчете частица начинает облучаться с точки входа в реактор, далее каждый раз начальный момент времени смещается на  $(\delta f)^{-1}$  с. Графические пояснения к изложенной методике приведены на рис. 2.

Доза, набираемая каждой частицей  $D_i$ , равна:

$$\text{ceil}(i)G \left[ x \left( \frac{j}{f} + \frac{k}{\delta f} \right), y \left( \frac{j}{f} + \frac{k}{\delta f} \right) \right] \tau, k=0 \dots \delta, \quad (1)$$

$$D_k = \sum_{j=0}^{ft} D_k$$

$$D_i = \min(D_k). \quad (2)$$

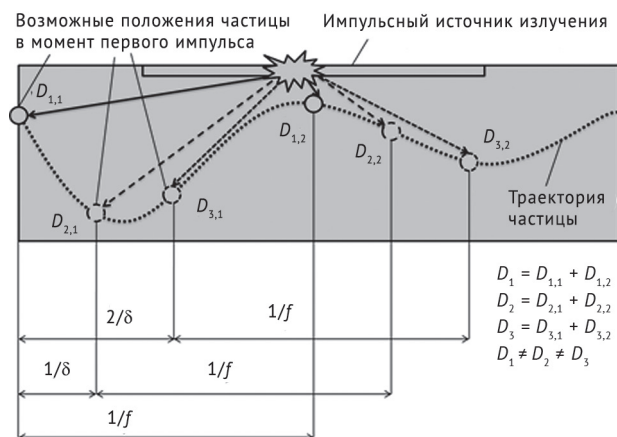


Рис. 2. Схема расчета воздействия импульсного источника на частицу загрязнителя

Второе принципиальное отличие импульсных источников излучения от ртутных ламп низкого давления — спектр излучения. В расчетах для ртутных ламп низкого давления изменением коэффициентов на различных длинах волн либо пренебрегают [2], используя некие усреднённые интегральные показатели, либо, что более правильно, используют значения на длине волны 254 нм [9].

Для импульсной ксеноновой лампы введение учёта эффектов от спектральных характеристик может повысить точность расчета эффективности фотохимического реактора. Учет спектральных характеристик среды может быть выполнен в системах численного моделирования посредством реализованного там функционала, например [11]. В этом случае поле падающего излучения  $G(x, y)$  будет рассчитываться

для набора ключевых длин волн  $\lambda_n$ , которые выбираются на основании спектра поглощения предполагаемого загрязнителя. Учет спектра поглощения загрязнителя выполняется посредством введения весовой функции  $J(\lambda_n)$ . Тогда доза, набираемая каждой частицей  $D_i$ , равна:

$$D_i = \sum_{j=0}^{ft} J(\lambda_n) G \left[ x \left( \frac{j}{f} + \frac{k}{\delta f} \right), y \left( \frac{j}{f} + \frac{k}{\delta f} \right), \lambda_n \right] \tau, k = 0..\delta, \quad (6)$$

$$D_k = \sum_{j=0}^{ft} J(\lambda_n) G \left[ x \left( \frac{j}{f} + \frac{k}{\delta f} \right), y \left( \frac{j}{f} + \frac{k}{\delta f} \right), \lambda_n \right] \tau, k = 0..k_{max} \quad (7)$$

Предложенная методика несколько занижает эффективность фотохимического реактора, так как во всех расчетах используются минимальные значения величин, а не средние. Однако ее применение позволяет утверждать, что эффективность разработанного фотохимического реактора не будет ниже расчетного. Эффективность реактора  $\eta_r$  определяется из отношения количества частиц  $N_d$ , получивших дозу, превышавшую необходимую для их разложения, к общему числу частиц:

$$\eta_r = \frac{N_d}{N} \quad (8)$$

### 3. Экспериментальные исследования

Для верификации предлагаемой расчетной модели было выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Путем

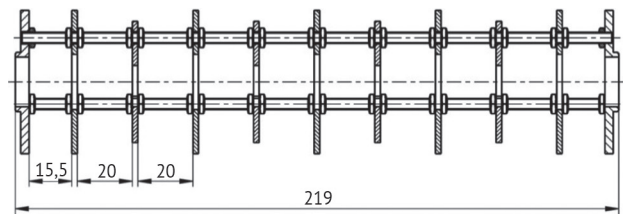


Рис. 3. Конфигурация перегородок фотохимического реактора

проведения серии численных расчетов была выбрана конфигурация перегородок в фотохимическом реакторе, показавшая наибольшую теоретическую эффективность деструкции органического загрязнителя (ЭДТА) в концентрации 100 мг/л при скорости течения жидкости на входе 0,1 м/с. Далее по тексту эта конструкция будет рассматриваться как «оптимальная».

Расчет проводился для двух конфигураций реактора: «без перегородок» и «оптимальный». Граничные условия: скорость потока на входе в реактор 0,1 м/с, коэффициент поглощения воды  $70 \text{ м}^{-1}$ , удельная мощность потока излучения с поверхности источника  $\sim 2 \text{ МВт/м}^2$ , частота следования импульсов 1 Гц. На рис. 4 приведены дозы УФ-излучения (200–300 нм), набираемые разными частицами при прохождении фотохимического реактора при частоте облучения 1 Гц. Данные представлены в виде спектра, где частицы сгруппированы по дозам. В качестве критерия сравнения устройств была выбрана средняя доза, набираемая частицей загрязнителя в результате прохождения активной зоны фотохимического реактора. По средней дозе (рис. 5) оптимальный реактор превосходит реактор без перегородок  $\sim 35\%$ .

В среднем за один цикл в реакторе без перегородок разрушается  $\sim 20\%$ , а в реакторе с перегородками  $\sim 32\%$  ЭДТА (рис. 6). Отличие в степени разрушения между двумя конструкциями фотохимических реак-

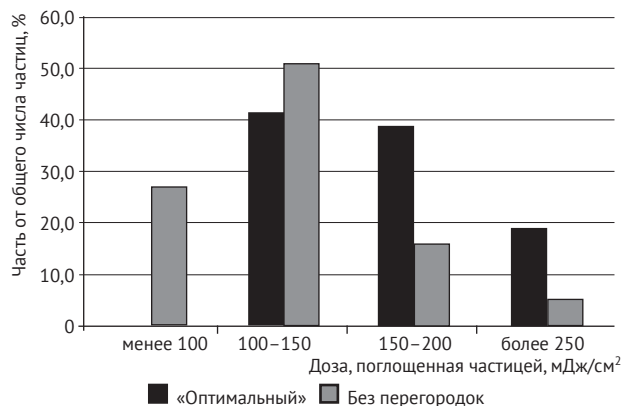


Рис. 4. «Спектр» доз, набираемых частицами



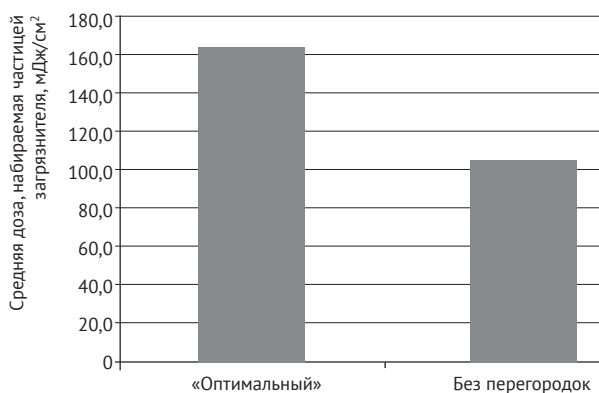


Рис. 5. Средняя доза, набираемая частицей в фотохимических реакторах разной конструкции

торов составляет ~35 %, что практически совпадает с результатом, полученным в расчетах.

#### 4. Выводы

В работе предложена новая расчетная модель для описания фотохимического реактора на основе импульсной ксеноновой лампы. Рассмотрены по отдельности все важнейшие физические процессы, происходящие внутри реактора. Теоретически исследованы процессы течения жидкости и движения частиц. Для расчета излучательных характеристик импульсной ксеноновой лампы использована методика, основанная как на положениях физики газового разряда, так и на ряде хорошо зарекомендовавших себя эмпирических зависимостей. Фотометрическая задача решена сведением к задаче теплообмена излучением в поглощающей среде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Камруков А.С., Козлов Н.П., Селиверстов А.Ф., Яловик М.С. Фотохимическая очистка воды широкополосным импульсным УФ-излучением // Безопасность в техносфере. 2006. № 1. С. 38–44; № 2. С. 21–26; № 3. С. 17–23.
2. Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: Коллективная монография. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 392 с.
3. Wols B.A. CFD in drinking water treatment. Gildeprint drukkerijen, 2010. 176 pp.
4. Санитарно-эпидемиологический надзор за обеззараживанием сточных вод УФ излучением: МУ 2.1.5.732–99. Москва: Минздрав России, 1999
5. Веб-сайт компании Light Stream UV: [сайт]. URL: <http://www.lightstreamuv.com/products> (дата обращения: 05.09.2015).

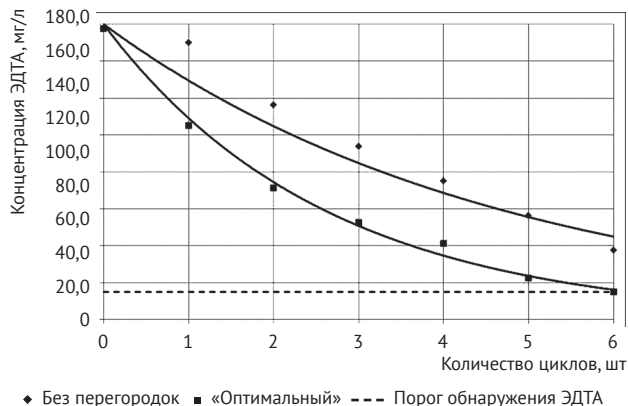


Рис. 6. Эффективность фотохимических реакторов

Верификация модели проведена путем экспериментального сравнения эффективности двух типов конструкции фотохимических реакторов при заранее заданных скоростях потока с использованием в качестве загрязнителя раствора органического загрязнителя ЭДТА в концентрации 100 мг/л. Показано, что расчетное увеличение эффективности оптимизированного реактора составило порядка 35 %, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мероприятие 1.2 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0067).*

6. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп. М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2010. 222 с.
7. Андреев С.И., Ивасенко Н.Ф. Основы расчета импульсных ксеноновых ламп. Томск: Издательство Томского университета, 1982. 153 с.
8. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2012. 88 с.
9. Ho C., Khalsa S., Wright H., Wicklein E. Computational Fluid Dynamics Based Models for Assessing UV Reactor Design and Installation. Water Research Foundation, 2011. 166 pp.
10. Wilcox D. Turbulence Modeling for CFD. 2nd ed. Anaheim: DCW Industries, 1998. 174 pp.
11. COMSOL. Heat Transfer Module User's Guide. 2014. 374 pp.

## REFERENCES

1. Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Seliverstov A.F., Yalovik M.S. Fotokhimicheskaya oчитка vody shirokopolosnym impul'snym UF-izlucheniem [Photochemical water purification broadband pulsed UV]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2006, I. 1, pp. 38–44; I. 2, pp. 21–26; I. 3, pp. 17–23. (in Russian)
2. Karmazinov F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N. *U l'traioletovye tekhnologii v sovremennom mire* [technology in the modern world]. Dolgoprudnyy, «Intellect» Publ., 2012. 392 p. (in Russian)
3. Wols B.A. CFD in drinking water treatment. Gildeprint-drukkerijen, 2010. 176 pp.
4. *Sanitarno-epidemiologicheskii nadzor za obezrazhivaniem stochnykh vod UF izlucheniem: MU2.1.5.732–99* [Snitarno-surveillance for disinfection of sewage UV radiation: MU2.1.5.732–99]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 1999. (in Russian)
5. *Veb-sayt kompanii Light Stream UV* [The company's website LightStreamUV]. Available at: <http://www.lightstreamuv.com/products> (accessed 05 September 2015).
6. Kamrukov A.S., Kulebyakina A.I. *Inzhenernye metody rascheta impul'snykh ksenonovykh lamp* [Engineering methods of calculating the pulse xenon lamps]. Moscow, NITs «Inzhener» (Soyuz NIO) Publ., 2010. 222 p. (in Russian)
7. Andreev S.I., Ivasenko N.F. *Osnovy rascheta impul'snykh ksenonovykh lamp* [Bases for design of pulsed xenon lamps]. Tomsk, Tomskiy university Publ., 1982. 153 p. (in Russian)
8. Garbaruk A.V., Strelets M. Kh., Shur M.L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy* [Modeling of turbulence in the calculation of complex flows]. St. Petersburg, Politekhicheskiy universitet Publ., 2012. 88 p. (in Russian)
9. Ho C., Khalsa S., Wright H., and Wicklein E. Computational Fluid Dynamics Based Models for Assessing UV Reactor Design and Installation. WaterResearchFoundation, 2011. 166 pp.
10. Wilcox D. Turbulence Modeling for CFD. 2nd ed. Anaheim: DCW Industries, 1998. 174 pp.
11. COMSOL. Heat Transfer Module User's Guide. 2014. 374 pp.

## Calculation Model of Photochemical Reactor with a Pulse Xenon Lamp for Water Treatment

**A.B. Ivashkin**, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

**A.S. Kamrukov**, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Head of Department, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

**D.O. Novikov**, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

**K.I. Malkov**, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

*A calculation model of the photochemical reactor based on a pulse xenon lamp and intended for water treatment from microbiological or chemical pollutants has been developed and realized. The model includes several calculation modules, each one describes the basic physical processes ongoing in the photochemical reactor: current's form calculation module, pollutant's particles trajectories calculation module, pulse lamp's radiating characteristics calculation module, module for photometric calculation, determining an energy radiation dose of pollutant particles. Calculation of lamp's radiating characteristics is based on ideas of gas discharge physics and on a number of empirical dependences, for calculation of other parameters has been used the numerical simulation. Model verification has been carried out by comparison of calculated and experimental efficiencies for two types of photochemical reactors' designs with use of the known pollutant. The developed calculation model allows perform multi-parameter optimization for designs and regime parameters of pulse photochemical reactors for the purpose of increase their energy efficiency, and level of water treatment from various chemical and biological pollutants.*

**Keywords:** pulse xenon lamp, photochemical reactor, ultra-violet radiation, water treatment.

### Минобрнауки России планирует создать сто инновационных университетских центров

В Министерстве образования и науки Российской Федерации планируется создать 100 инновационных университетских центров к 2025 г. в рамках нового приоритетного проекта, сообщила глава ведомства Ольга Васильева на заседании совета Российского союза ректоров.

В 2017 г. Минобрнауки России откроет два приоритетных проекта в области высшего образования. Первый проект — «Вузы как центр пространства создания инноваций» — предусматривает создание таких центров и поддержку университетов — лидеров программы повышения конкурентоспособности «5–100» и опорных вузов. Второй приоритетный проект министерства — это проведение конкурсного отбора по созданию опорных университетов в России.