

ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ОКИСЛЕНИЯ**А.И. Кулебякина, В.Н. Дубровина, С.Г. Киреев, Н.А. Иванцова, С.Г. Шашковский**

Анна Игоревна Кулебякина, Сергей Геннадьевич Киреев (ORCID 0000-0002-8726-3668), Сергей Геннадьевич Шашковский (ORCID 0000-0002-8197-8742)

Научно-Производственное Предприятие «Мелитта», ул. Миклухо-Маклая, 16/10, Москва, Российская Федерация, 117997

E-mail: annkulebiakina@gmail.com, melitta916@gmail.com, kireevsg.melitta@gmail.com

Валерия Николаевна Дубровина*, Наталья Андреевна Иванцова (ORCID 0000-0003-4117-072X)

Кафедра промышленной экологии, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047

E-mail: kaleria0510@gmail.com*, ivantsova.n.a@muctr.ru

Для описания высокоинтенсивных процессов окисления, основанных на применении УФ-излучения, используется критерий ЕЕО, как показатель энергии, требуемой для снижения концентрации целевого загрязнителя на десятичный порядок в одном кубометре исходной воды. В настоящей статье рассмотрен вопрос, какие параметры влияют на ЕЕО и должны быть учтены при описании или сравнении различных фотохимических реакторов или высокоинтенсивных процессов окисления. К таким параметрам относятся, например, тип и концентрация целевого загрязнителя; концентрация дополнительных включений; количество пероксида водорода или другого окислителя; тип источника излучения, его излучательные характеристики и пр. На примере описания лабораторных экспериментов по разложению фенола, додецилсульфата натрия и нефтепродуктов показано, как различные условия влияют на потребление электроэнергии и, как следствие, критерий ЕЕО. Исследования проводились на модельных растворах с начальной концентрацией загрязнителей 10 мг/л. В качестве источника ультрафиолетового излучения использовали импульсную ксеноновую лампу со сплошным спектром излучения в диапазоне от 200 до 1000 нм, средняя потребляемая мощность источника излучения составляла около 200 Вт, энергия излучения в диапазоне 200 – 300 нм 2,7 Дж. В качестве окислителя использовали пероксид водорода, концентрация которого в системе варьировалась от 10 до 340 мг/л. На основе проведенного анализа предложен модифицированный критерий оценки эффективности высокоинтенсивных процессов окисления, учитывающий не только затраченную на деструкцию энергию, но и расход реагентов. Затраты на окислитель предлагается выражать в физических величинах и включать в стоимость процесса с весовым коэффициентом, зависящим от отношения текущих расценок на ресурсы.

Ключевые слова: критерий ЕЕО, стоимость, высокоинтенсивные окислительные процессы, фенол

Для цитирования:

Кулебякина А.И., Дубровина В.Н., Киреев С.Г., Иванцова Н.А., Шашковский С.Г. Об оценке эффективности процесса высокоинтенсивного окисления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 104–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6655.

For citation:

Kulebiakina A.I., Dubrovina V.N., Kireev S.G., Ivantsova N.A., Shashkovskiy S.G. On evaluation of the efficiency of the process of advanced oxidation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 104–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6655.

ON EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF ADVANCED OXIDATION

A.I. Kulebiakina, V.N. Dubrovina, S.G. Kireev, N.A. Ivantsova, S.G. Shashkovskiy

Anna I. Kulebiakina, Sergey G. Kireev (ORCID 0000-0002-8726-3668), Sergey G. Shashkovskiy (ORCID 0000-0002-8197-8742)

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Miklukho-Maklay st., 16/10, Moscow, 117997, Russia
E-mail: annkulebiakina@gmail.com, kireevsg.melitta@gmail.com, melitta916@gmail.com

Valeriya N. Dubrovina*, Natal'ya A. Ivantsova (ORCID 0000-0003-4117-072X)

D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sqr., 9, Moscow, 125047, Russia
E-mail: kaleria0510@gmail.com*, ivantsova.n.a@muctr.ru

The EEO parameter is commonly used as a figure-of-merit of ultraviolet-based advanced oxidation processes (UV AOPs). It represents the energy input into the UV AOPs that can achieve an order of magnitude decrease in the target contaminant concentration in a unit volume. This paper focuses on factors, that influence on the EEO parameter and should be reported with it to compare the efficiency of different reactors or UV AOPs: the identity and concentration of the target pollutant, as well as the concentration of scavengers; the amount of hydrogen peroxide or other oxidizing agent, source of UV radiation etc. Decays of phenol, sodium dodecyl sulfate and petroleum products in UV AOP were used to show how various conditions affect on the EEO parameter. The studies were carried out on model solutions with an initial concentration of pollutants of 10 mg/l. As a source of ultraviolet radiation, a pulsed xenon lamp was used. It has a continuous emission spectrum in the range of 200 – 1000 nm, the average energy consumption was about 200 W, the radiation energy in the range of 200–300 nm was 2.7 J. Hydrogen peroxide was used as an oxidizing agent, its concentration varied from 10 to 340 mg/L. The modified parameter of UV AOP efficiency is proposed. It considers electrical energy input with reagents consumption. It is proposed to express the costs of the oxidant in physical values and include them in the modified parameter with a weighting factor.

Key words: EEO parameter, cost, advanced oxidation processes, phenol

ВВЕДЕНИЕ

Очистка сточных вод от различных органических веществ, встречающихся в стоках нефтехимических, фармацевтических и других предприятий, является, несомненно, актуальной прикладной задачей, для решения которой все чаще прибегают к технологии высокоинтенсивных окислительных процессов (AOPs – Advanced Oxidation Processes¹) [1], сутью которой является наработка радикалов с высоким окислительным потенциалом. К преимуществам AOPs-технологии относятся: неизбежность к загрязнителю, экологичность и возможность глубокого окисления органических веществ. Среди различных видов AOPs, широкое распространение получили процессы на основе ультрафиолетового излучения (UV AOPs).

Для количественной оценки затрат в технологии UV AOPs и возможности сравнения различных процессов в 2011 году комиссией по фотохимии ИЮПАК были введены два критерия [2, 3]:

- E_{EO} – количество энергии, требуемое для снижения концентрации загрязнителя в единичном объеме воды на порядок (90%);

- E_{EM} – количество энергии, требуемое для снижения концентрации загрязнителя в единичном объеме воды на массу вещества.

Однако анализ литературы показывает, что во многих AOPs-технологиях используют дополнительные реагенты, затраты на которые не учитывает ни один из предложенных критериев.

Целью данной статьи является описание экспериментальных факторов, указание которых обязательно для корректного описания UV AOPs-

¹ В российской литературе пока не существует устоявшегося термина для обозначения данных процессов. AOPs переводят как «новые окислительные технологии», «углубленные про-

цессы окисления», «высокоинтенсивные окислительные процессы» и пр. В данной статье использован устоявшийся в англоязычной среде термин

технологии, а также модификация критерия E_{EO} таким образом, чтобы помимо стоимости электроэнергии учесть затраты на реагенты.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТОИМОСТЬ АОРs-ТЕХНОЛОГИИ

Целевой загрязнитель

На скорость разложения различных органических загрязнителей существенное влияние оказывают начальная концентрация, спектр поглощения и квантовый выход фотолиза загрязнителя, его скорость взаимодействия с радикалами.

С ростом молярного коэффициента экстинкции целевого вещества увеличивается скорость фотолиза, однако квантовый выход данного процесса для большинства органических веществ невысок. Лишь для узкого ряда веществ (например, N-нитрозодиметиламин) эффективность фотолиза превосходит другие способы разложения [1]. Некоторые углеводороды, практически не поглощают излучение длиннее 220 нм, что делает фотолиз экономически нецелесообразным и подталкивает разработчиков к поиску экономически выгодных решений.

Дополнительные включения

В реальных производственных стоках значительное влияние на эффективность АОРs-технологии могут оказывать вещества, экранирующие действие как УФ-излучения, так и активных радикалов, тем самым ингибируя процессы окисления целевого загрязнителя [4, 5]. Кроме того, необходимо принимать во внимание возможность протекания побочных реакций в результате АОРs с образованием потенциально более токсичных соединений [6, 7].

Концентрация дополнительных реагентов (H_2O_2)

Интенсификация АОРs процессов идет по пути наработки активных радикалов, что достигается, например, добавлением в систему пероксида водорода. Квантовый выход фотолиза H_2O_2 при длине волны 254 нм составляет 1 [8], что обуславливает его целесообразность по сравнению с фотолизом целевого загрязнителя.

С учетом того, что молярный коэффициент поглощения пероксида водорода ($\epsilon_{254} = 19$ л/моль·см) значительно меньше, чем у большинства органических загрязнителей (например, для фенола $\epsilon_{254} = 472$ л/моль·см) [9], можно утверждать, что в системе УФ/ H_2O_2 именно целевой загрязнитель является своего рода «экранирующим» процесс разложения веществом. Увеличение концентрации пероксида водорода обуславливает рост его поглощения, пропорциональный рост скорости разложения

загрязнителя и, как следствие, снижение энергозатрат на процесс. Однако избыток пероксида водорода приводит к гашению образовавшихся радикалов и ингибированию разложения целевого загрязнителя. Совокупность этих двух процессов обуславливает наличие максимума в зависимости константы скорости процесса от начальной концентрации окислителя [10].

Спектр действия источника излучения

Для активации фотохимических реакций могут быть использованы различные источники УФ-излучения: ртутные лампы низкого и среднего давлений, импульсные ксеноновые лампы, эксимерные лампы, УФ-светодиоды.

На рис. 1 для сравнения приведены относительные спектры: ртутной лампы низкого давления (РЛНД), импульсной ксеноновой лампы (ИКЛ) (методика измерения описана в [11]). Спектр излучения РЛНД линейчатый, около 30-50% электрической энергии преобразуется в излучение с длиной волны 254 нм [12]. Спектр ИКЛ сплошной и перекрывает всю область от 200 до 1100 нм, характеризуется своей неселективностью по отношению к объекту облучения. Для оценки КПД такого источника необходимо учитывать и спектр поглощения фотохимической системы. Например, в процессе УФ/ H_2O_2 , где основное поглощение приходится на область от 200 до 300 нм, энергетический КПД составит 9,3%, когда тот же источник в системе с областью поглощения от 200 до 400 нм (фото-Фентон [13], фотокатализ [14]) будет иметь КПД 28% [15].

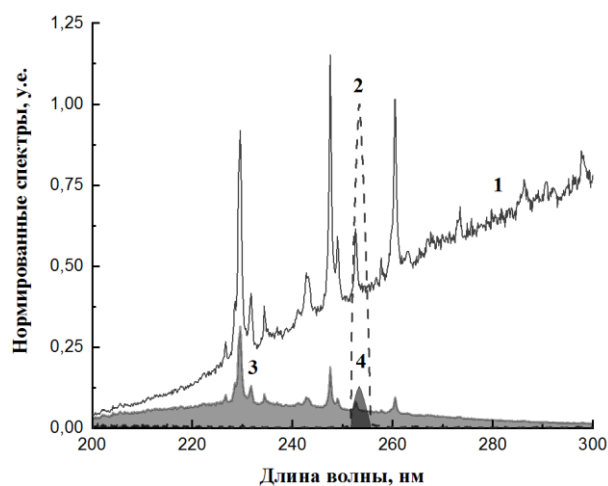


Рис. 1. Спектры излучения РЛНД и ИКЛ и их спектры действия в системе УФ/ H_2O_2 1 – спектр излучения ИКЛ; 2 – спектр излучения РЛНД; 3 – спектр действия ИКЛ в системе УФ/ H_2O_2 ; 4 – спектр действия РЛНД в системе УФ/ H_2O_2
Fig. 1. Emission spectra of low pressure mercury lamp (LPML) and xenon flash lamp (XFL); their action spectra in the UV/ H_2O_2 system 1 – XFL emission spectrum; 2 – emission spectrum of LPML; 3 – XFL action spectrum in the UV/ H_2O_2 system; 4 – action spectrum of LPML in the UV/ H_2O_2 system

Средняя потребляемая источником мощность

Для экспериментальных исследований фотохимических процессов часто применяется установка параллельного пучка [16], позволяющая обеспечить необходимую облученность на поверхности пробы. В литературе освещены различные методы расчета плотности мощности излучения: химическая актинометрия, биодозиметрия, математический расчет [17]. Однако такая установка и способы расчета не учитывают потребленную источником излучения энергию.

Оценку затрат несложно провести, вычислив эффективность использования излучения в системе (γ), как долю фотонов, попавших в фотохимическую систему от их общего числа:

$$\gamma = \frac{E}{E'} \approx \frac{S_{\text{ч}}}{S}, \quad (1)$$

где E – облученность на поверхности раствора в чашке, Вт/м²; E' – плотность мощности излучения лампы, Вт/м²; $S_{\text{ч}}$ – площадь чашки, мм²; S – площадь сферы (в случае точечного источника) или цилиндра (для протяженного источника) облучения с радиусом равным расстоянию от оси лампы до поверхности облучаемого раствора, мм².

КРИТЕРИЙ E_{EO}

Для промышленного применения важно определить минимальную стоимость обработки при обеспечении заданной производительности реактора. В этом случае важно учитывать как стоимость электроэнергии, так и затраты на реагенты. Критерий E_{EO} не учитывает затраты на реагенты, которые могут быть сопоставимы с затратами на электроэнергию.

Использование критерия E_{EO} в качестве целевой функции для решения задачи минимизации затрат на обработку может приводить к ошибке. Но и выражать удельные затраты в экономических единицах неудобно, поэтому можно удельную стоимость обработки выразить как E_{Σ} в физических величинах (кВт·ч/м³·порядок), при этом стоимость реагента войдет в сумму с весовым коэффициентом φ :

$$\varphi = \frac{C_{\text{пероксид}}}{C_{\text{кВтч}}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{пероксид}}$ – стоимость пероксида водорода, руб/кг; $C_{\text{кВтч}}$ – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Тогда стоимостной критерий E_{Σ} можно записать так:

$$E_{\Sigma} = \varphi \cdot C_{H_2O_2} + E_{EO}, \quad (3)$$

где $C_{H_2O_2}$ – количество пероксида, требуемое для процесса, кг/м³; E_{EO} – количество электроэнергии, требуемое для обработки, кВт·ч/м³·порядок.

Положение точки экстремума зависимости стоимости обработки от количества пероксида водорода будет варьироваться при изменении цен на электроэнергию и реагенты. Зная текущую стоимость ресурсов, легко можно перевести критерий E_{Σ} из кВт·ч/м³·порядок в руб/м³·порядок.

ПРИМЕР ОПИСАНИЯ АОРs

Рассмотрим пример оценки процесса УФ/Н₂O₂ на основе лабораторных экспериментов.

В качестве источника ультрафиолетового излучения использовали импульсную ксеноновую лампу со сплошным спектром излучения в диапазоне от 200 до 1000 нм, средняя потребляемая мощность источника излучения составляла около 200 Вт, энергия излучения в диапазоне 200-300 нм 2,7 Дж. Пробу объемом 150 мл располагали на расстоянии 20 см от оси лампы. Стенд и методика исследований были подробно описаны в [10]. В [18] рассмотрен вопрос измерения дозы в использованном экспериментальном стенде.

Для приготовления растворов использовали дистиллированную воду, растворы фенола (ЧДА, «Баум-Люкс»); пероксид водорода (ЧДА, «Экос-1»); натрий додецилсульфат («Ленреактив»); Государственный стандартный образец (ГСО) состава раствора нефтепродуктов в четыреххлористом углероде (37,5% изооктана; 37,5% гексадекана; 25% бензола).

Установление концентрации фенола проводили по методу фотометрического определения с 4-аминоантипирином [19], ПАВ – методом колориметрического определения с метиленовым синим [20], нефтепродуктов – по методике, описанной в [21], концентрацию пероксида водорода определяли спектрофотометрическим методом с Ti(IV) [22]. Спектры поглощения растворов фиксировались на спектрофотометре LEKI SS2110UV.

Относительная погрешность результатов определения концентраций органических веществ не превышала 25% для нефтепродуктов, 7% для ПАВ и 10% для фенола.

На первом этапе исследований были проведены сравнительные эксперименты по разложению различных загрязнителей: нефтепродуктов, ПАВ и фенола. Скорости деградации отличались существенно (рис. 2).

Так, степень разложения нефтепродуктов $\ln \frac{C_0}{C} = 1$ может быть достигнута за 110 с, тогда как деструкция ПАВ займет в 2 раза больше времени, а фенола в 4 раза при тех же условиях. Соответственно и затраты на разложение ПАВ будут в 2 раза, фенола в 4 раза больше, чем для нефтепродуктов. На

втором этапе работ была исследована зависимость эффективной константы скорости разложения 10 мг/л фенола в процессе УФ/Н₂О₂ от начальной концентрации пероксида водорода. Спектр излучения ИКЛ сплошной, перекрывает области поглощения фенола и пероксида водорода (рис. 2).

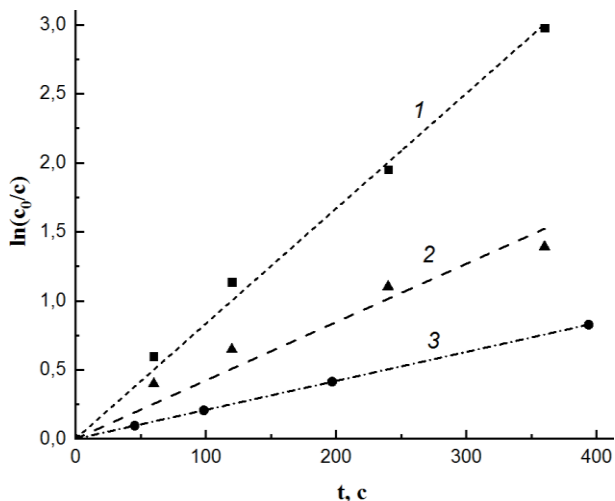


Рис. 2. Анаморфозы кинетических кривых разложения различных загрязнителей в процессе УФ/Н₂О₂ 1 – 10 мг/л нефтепродукты, 10 мг/л Н₂О₂; 2 – 10 мг/л ПАВ, 10 мг/л Н₂О₂; 3 – 10 мг/л фенол, 10 мг/л Н₂О₂

Fig. 2. Anamorphosis of kinetic curves of decomposition of various pollutants in the UV/H₂O₂ Process 1 – 10 mg/l oil products, 10 mg/l H₂O₂; 2 – 10 mg/l surfactant, 10 mg/l H₂O₂; 3 – 10 mg/l phenol, 10 mg/l H₂O₂

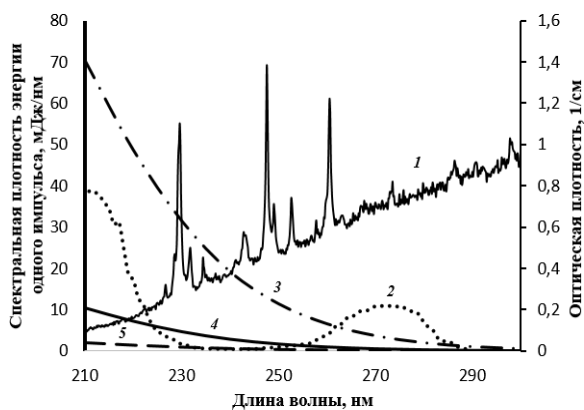


Рис. 3. Спектральная плотность энергии одного импульса ИКЛ и оптическая плотность фенола (10 мг/л) и пероксида водорода (10; 50 и 150 мг/л) в зависимости от длины волны 1 – Спектральная плотность энергии одного импульса ИКЛ; 2 – Оптическая плотность фенола (10 мг/л); 3 – Оптическая плотность пероксида водорода (150 мг/л); 4 – Оптическая плотность пероксида водорода (50 мг/л); 5 – Оптическая плотность пероксида водорода (10 мг/л)

Fig. 3. Spectral distribution of emitted energy by the XFL per pulse and wavelength dependence of phenol and hydrogen peroxide optical density 1 – Spectral distribution of emitted energy by the XFL per pulse; 2 – Optical density of phenol (10 mg/l); 3 – Optical density of hydrogen peroxide (150 mg/l); 4 – Optical density of hydrogen peroxide (50 mg/l); 5 – Optical density of hydrogen peroxide (10 mg/l)

Таблица

Зависимость скорости разложения 10 мг/л фенола от концентрации окислителя
Table. Dependence of the decomposition rate of 10 mg/l phenol on the concentration of the oxidizing agent

Концентрация пероксида водорода, мг/л	Эффективная константа скорости, к _{эфф} , 1/с
10	0,0021
25	0,0039
50	0,0068
100	0,0083
150	0,0105
340	0,0117

Дозы пероксида водорода варьировались от 10 до 340 мг/л. Разложение фенола протекало по первому порядку реакции с константой скорости к_{эфф} (таблица). Максимальная скорость разложения фенола наблюдалась в диапазоне концентраций пероксида водорода от 160 до 200 мг/л.

Получение расчетной эффективной константы скорости было описано в [10]. Расчет параметра E_Σ проводился для нескольких вариантов: φ = 0; 20 и 50 $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{кг}}$. В расчете E_{EO} учитывалась «потери» фотонов в установке параллельного пучка. Было принято допущение, что ИКЛ излучает как точечный источник в сферу с радиусом 18 см. Тогда коэффициент γ ≈ 0,02. Критерий E_Σ рассчитывался по формуле (4):

$$E_{\Sigma} = \varphi \cdot C_{\text{H}_2\text{O}_2} + \frac{\gamma \cdot P \cdot t}{V_{\text{пробы}} \cdot \lg\left(\frac{C_0}{C}\right)}, \quad (4)$$

где P – средняя потребляемая лампой мощность, Вт; t – время экспозиции, с; V_{пробы} – объем пробы, м³; C₀ – начальная концентрация фенола, мг/л; C – концентрация фенола в момент t, мг/л.

Результат расчетов представлен на рис. 4. Наглядно показано, что если не учитывать стоимость реагентов в процессе, то это может привести к ошибке в оценке затрат и неправильному выбору оптимальных параметров процесса УФ/Н₂О₂. При соотношении концентраций пероксида водорода и фенола R ≤ 3 большую часть составляют затраты на электроэнергию и E_Σ ≈ E_{EO}. С увеличением R растет доля затрат на реагенты, причем чем больше φ, тем существеннее разница. Так без учета стоимости пероксида водорода (φ = 0) минимальные затраты E_Σ = E_{EO} = 14 кВт·ч/м³·порядок будут при R = 18. Учет реагентов смещает точку экстремума кривой E_Σ(R).

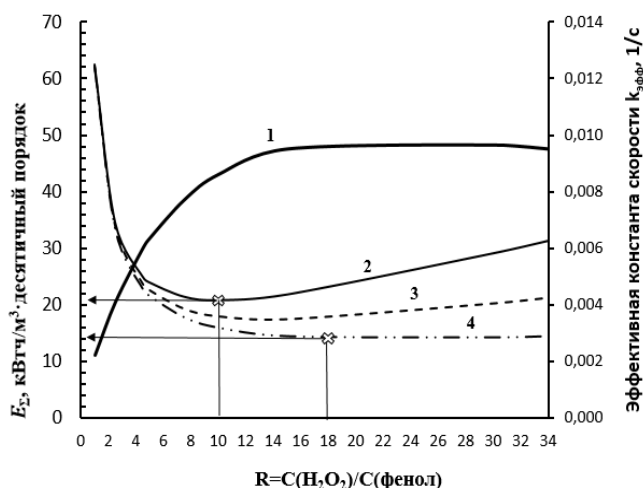


Рис. 4. Зависимость расчетной эффективной константы скорости и критерия E_{Σ} для разложения фенола концентрацией 10 мг/л от концентрации пероксида водорода 1 – расчетная эффективная константа скорости; 2 – E_{Σ} при $\varphi=50$; 3 – E_{Σ} при $\varphi=20$; 4 – E_{Σ} при $\varphi=0$

Fig. 4. Dependence of the calculated effective rate constant and criterion E_{Σ} for the decomposition of phenol with a concentration of 10 mg/l on the concentration of hydrogen peroxide 1 – effective reaction rate constant; 2 – E_{Σ} at $\varphi=50$; 3 – E_{Σ} at $\varphi=20$; 4 – E_{Σ} at $\varphi=0$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Parsons S.** Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. London: IWA Publ. 2004. 386 p.
2. **Bolton J.R., Valladares J.E., Zanin J.P., Cooper W.J., Nickelsen M.G., Kajdi D.C., Kurucz W.** Figures-of-Merit for Advanced Oxidation Technologies: A Comparison of Homogeneous UV/H₂O₂, Heterogeneous UV/TiO₂ and Electron Beam Processes. *J. Adv. Oxid Technol.* 1998. V.3. N 2. P. 174-181. DOI:10.1515/jaots-1998-0211.
3. **Keen O., Bolton J., Litter M., Bircher K., Oppenländer T.** Standard reporting of Electrical Energy per Order (EEO) for UV/H₂O₂ reactors. *Pure Appl. Chem.* 2018. V. 9. P. 1487-1499. DOI: 10.1515/pac-2017-0603.
4. **Попова С.А., Матафонова Г.Г., Батоев В.Б.** Генерация радикалов в железно-персульфатной системе с использованием КrCl-эксциламп. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 118-123. DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5819.
5. **Stephen R. Cater, Mihaela I. Stefan, James R. Bolton, and Ali Safarzadeh-Amiri.** UV/H₂O₂ Treatment of Methyl tert-Butyl Ether in Contaminated Waters. *Environ. Sci. Technol.* 2000. V. 34. P. 659-662. DOI: 10.1021/es9905750.
6. **Manoj P Rayaroth, Charuvila T Aravindakumar, Noor S Shah, Grzegorz Boczkaj.** Advanced oxidation processes (AOPs) based wastewater treatment - unexpected nitration side reactions - a serious environmental issue: A review. *Chem. Eng. J.* 2022. V. 430. P. 133002. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133002.
7. **Luis A.M., Lombrana J.I., Menendez A., Sanz J.** Analysis of the Toxicity of Phenol Solutions Treated with H₂O₂/UV and H₂O₂/Fe Oxidative Systems. *I&EC.* 2011. V. 50. N 4. P. 1928-1937. DOI: 10.1021/ie101435u.

ВЫВОДЫ

В данной работе был исследован вопрос учета параметров, необходимых для ясного описания и сравнения AOPs на примере разложения фенола с концентрацией 10 мг/л в системе УФ/Н₂О₂. Было показано, что нельзя однозначно описать AOPs процесс, основываясь только на одном критерии E_{EO} . Указание только этой величины без упоминания типа и концентрации целевого загрязнителя, начальной концентрации пероксида водорода в системе, концентрации дополнительных включений, способа организации облучения, типа лампы не дает полного понимания процесса.

Кроме того, E_{EO} не учитывает затраты на окислитель, поэтому для более корректного сравнения различных процессов был предложен новый критерий, учитывающий как затраты электроэнергии, так и расходы на реагенты.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. **Parsons S.** Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. London: IWA Publ. 2004. 386 p.
2. **Bolton J.R., Valladares J.E., Zanin J.P., Cooper W.J., Nickelsen M.G., Kajdi D.C., Kurucz W.** Figures-of-Merit for Advanced Oxidation Technologies: A Comparison of Homogeneous UV/H₂O₂, Heterogeneous UV/TiO₂ and Electron Beam Processes. *J. Adv. Oxid Technol.* 1998. V.3. N 2. P. 174-181. DOI:10.1515/jaots-1998-0211.
3. **Keen O., Bolton J., Litter M., Bircher K., Oppenländer T.** Standard reporting of Electrical Energy per Order (EEO) for UV/H₂O₂ reactors. *Pure Appl. Chem.* 2018. V. 9. P. 1487-1499. DOI: 10.1515/pac-2017-0603.
4. **Popova S.A., Matafonova G.G., Batoev V.B.** Generation of radicals in ferrous-persulfate system using KrCl excilamp. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn.Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2019. V. 62. N 5. P. 118-123. DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5819.
5. **Stephen R. Cater, Mihaela I. Stefan, James R. Bolton, and Ali Safarzadeh-Amiri.** UV/H₂O₂ Treatment of Methyl tert-Butyl Ether in Contaminated Waters. *Environ. Sci. Technol.* 2000. V. 34. P. 659-662. DOI: 10.1021/es9905750.
6. **Manoj P Rayaroth, Charuvila T Aravindakumar, Noor S Shah, Grzegorz Boczkaj.** Advanced oxidation processes (AOPs) based wastewater treatment - unexpected nitration side reactions - a serious environmental issue: A review. *Chem. Eng. J.* 2022. V. 430. P. 133002. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133002.
7. **Luis A.M., Lombrana J.I., Menendez A., Sanz J.** Analysis of the Toxicity of Phenol Solutions Treated with H₂O₂/UV and H₂O₂/Fe Oxidative Systems. *I&EC.* 2011. V. 50. N 4. P. 1928-1937. DOI: 10.1021/ie101435u.

8. **Goldstein S., Aschengrau D., Diamant Y., Rabani J.** Photolysis of Aqueous H₂O₂: Quantum Yield and Applications for Polychromatic UV Actinometry in Photoreactors. *Environ. Sci. Technol.* 2007. V. 41. N 21. DOI: 10.1021/es071379t.
9. **Li Mengkai, Wen Dong, Qiang Zhimin, Kiwi John.** VUV/UV light inducing accelerated phenol degradation with a low electric input. *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 13. P. 7640–7647. DOI: 10.1039/c6ra26043h.
10. **Гонопольский А., Шашковский С., Гольдштейн Я., Киреев С., Волосатова А., Кулебякина А.** Импульсное фотохимическое разложение фенола в сточных водах. *Экология и пром-сть России.* 2020. Т. 24. № 2. С. 22–27. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-2-22-27.
11. **Kireev S.G., Arkhipov V.P., Shashkovsky S.G., Kozlov N.P.** Measurement of spectral and energy characteristics of pulsed radiation sources of continuous spectrum. *Photonics Russia.* 2017. V. 8. N 68. P. 48–56. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.68.8.48.56.
12. **Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В.** Ультрафиолетовые технологии в современном мире. Долгопрудный: Интеллект. 2012. 392 с.
13. **Joseph J. Pignatello, Esther Oliveros, Allison MacKay.** Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2006. V. 36. P. 1–84. DOI: 10.1080/10643380500326564.
14. **Balaram Kiran Avasarala, Siva Rao Tirukkovalluri, Sreedhar Bojja.** Photocatalytic degradation of monocrotophos pesticide—an endocrine disruptor by magnesium doped titania. *J. Hazard Mater.* 2011. V. 186. P. 1234–1240. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.132.
15. **Киреев С.Г., Шашковский С.Г., Тумашевич К.А., Абакумов А.В.** Метод вычисления энергоэффективности газоразрядных импульсных ламп. *Науч.-техн. вестн. информ. технol., механики и оптики.* 2020. Т. 20. № 1. С. 45–51. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-1-45-51.
16. **Bolton J., Linden K.** Standardization of Methods for Fluence (UV Dose) Determination in Bench-Scale UV Experiments. *J. Environ. Eng.* 2003. V. 129. P. 209–215. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:3(209).
17. **Jin S., Mofidi A.A., Linden K.G.** Polychromatic UV Fluence Measurement Using Chemical Actinometry, Biodosimetry, and Mathematical Techniques. *J. Environ. Eng.* 2006. V. 132. P. 831–841. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:8(831).
18. **Levichev N.A., Ershov B.G.** Actinometric Measurement of Fluence with Allowance for Spectral Distribution of a Polychromatic Radiation Source. *High Energy Chem.* 2019. V. 53. N 3. P. 191–197. DOI: 10.1134/S0018143919030123.
19. ПНДФ 14.1:2.104-97. Методика выполнения измерений массовой концентрации (суммарной) летучих фенолов в пробах природных и очищенных сточных вод ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки. М. 1997. 24 с.
20. ПНДФ 14.1:2.258-10. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионных. М. 2010. 14 с.
21. ГОСТ Р 51797-2001. Вода питьевая. Метод определения содержания нефтепродуктов. М.: Госстандарт России. 2001. 16 с.
22. **Марченко З.** Фотометрическое определение элементов. М.: Мир. 1971. 501 с.
8. **Goldstein S., Aschengrau D., Diamant Y., Rabani J.** Photolysis of Aqueous H₂O₂: Quantum Yield and Applications for Polychromatic UV Actinometry in Photoreactors. *Environ. Sci. Technol.* 2007. V. 41. N 21. DOI: 10.1021/es071379t.
9. **Li Mengkai, Wen Dong, Qiang Zhimin, Kiwi John.** VUV/UV light inducing accelerated phenol degradation with a low electric input. *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 13. P. 7640–7647. DOI: 10.1039/c6ra26043h.
10. **Gonopol'sky A., Shashkovskiy S., Goldstein Y., Kireev S., Volosatova A., Kulebyakina A.** Pulse Photochemical Decomposition of Phenol in Wastewater. *Ekolog. Ind. Ross.* 2020. V. 24. N 2. P. 22–27 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-2-22-27.
11. **Kireev S.G., Arkhipov V.P., Shashkovsky S.G., Kozlov N.P.** Measurement of spectral and energy characteristics of pulsed radiation sources of continuous spectrum. *Photonics Russia.* 2017. V. 8. N 68. P. 48–56. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.68.8.48.56.
12. **Karmazinov F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Khramenkov S.V.** Ultraviolet technologies in the modern world. *Dolgoprudny: Intellect.* 2012. 392 p. (in Russian).
13. **Joseph J. Pignatello, Esther Oliveros, Allison MacKay.** Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2006. V. 36. P. 1–84. DOI: 10.1080/10643380500326564.
14. **Balaram Kiran Avasarala, Siva Rao Tirukkovalluri, Sreedhar Bojja.** Photocatalytic degradation of monocrotophos pesticide—an endocrine disruptor by magnesium doped titania. *J. Hazard Mater.* 2011. V. 186. P. 1234–1240. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.132.
15. **Kireev S.G., Shashkovskiy S.G., Tumashevich K.A., Abakumov A.V.** Energy efficiency calculation of gas-discharge flash lamps. *Nauch.-Tekhn. Vestn. Inform. Tekhnol., Mekhaniki Optiki.* 2020. V. 20. N 1. P. 45–51 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2020-1-45-51.
16. **Bolton J., Linden K.** Standardization of Methods for Fluence (UV Dose) Determination in Bench-Scale UV Experiments. *J. Environ. Eng.* 2003. V. 129. P. 209–215. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:3(209).
17. **Jin S., Mofidi A.A., Linden K.G.** Polychromatic UV Fluence Measurement Using Chemical Actinometry, Biodosimetry, and Mathematical Techniques. *J. Environ. Eng.* 2006. V. 132. P. 831–841. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:8(831).
18. **Levichev N.A., Ershov B.G.** Actinometric Measurement of Fluence with Allowance for Spectral Distribution of a Polychromatic Radiation Source. *High Energy Chem.* 2019. V. 53. N 3. P. 191–197. DOI: 10.1134/S0018143919030123.
19. ПНДФ (Russian: ПНДФ) 14.1:2.104-97 Method for measuring the mass concentration (total) of volatile phenols in samples of natural and treated wastewater by the accelerated extraction-photometric method without stripping. 1997. Moscow. 24 p. (In Russian).
20. ПНДФ (Russian: ПНДФ) 14.1:2.258-10 Methodology for performing anion mass concentration measurements. C (in Russian).
21. GOST (Russian: ГОСТ) 51797-2001. Drinking water. Method for determining the content of petroleum products, Moscow: Gosstandart of Russia. 2001. Moscow. 16 p. (In Russian).
22. **Marchenko Z.** Photometric determination of elements. М.: Mir. 1971. 501 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 28.04.2022
Принята к опубликованию (Accepted) 29.08.2022