
УДК 544.526.2: 628.316.12

ГУИНА Е. М., студент (РХТУ им. Менделеева)
Научный руководитель ИВАНЦОВА Н.А., к.х.н., доцент (РХТУ
им. Менделеева)
г. Москва

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕЖИМА ФОТООКИСЛЕНИЯ НИТРОФУРАЛА НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В настоящее время активное развитие фармацевтической промышленности привело к проблемам загрязнения природных объектов фармацевтическими препаратами [1]. Органические соединения устойчивы к традиционным методам очистки, а накопление их в окружающей среде является потенциальной опасностью для экосистем. Поэтому для решения проблемы очистки сточных вод от активных фармацевтических субстанций были разработаны высокоинтенсивные окислительные процессы (AOPs – Advanced Oxidation Processes) [2-3].

В качестве загрязняющего вещества в работе рассматривали нитрофурал – представитель класса нитрофуранов, а исследуемым методом очистки являлось фотоокисление. В рамках исследования проанализированы четыре технологических подхода: прямой фотолиз, фотокатализ с применением коммерческого катализатора Degussa P25, фотокатализ с нитридом углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) и комбинированный метод окисления с использованием двухвалентного железа и УФ-излучения – фото-Фентон процесс.

Для количественной оценки эффективности данных процессов использовался показатель энергоэффективности фотоокисления (E_{E0}), который характеризует, насколько эффективно используется энергия (в основном электрическая, потребляемая источником света) для достижения определенной степени разложения загрязняющих веществ в процессе фотоокисления; рассчитывается он по формуле (1). Подробное описание данного критерия и схема установки представлены в [4].

$$E_{E0} = \frac{P \cdot t}{V \cdot 10^{-3}} (\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3), \quad (1)$$

где P – средняя потребляемая лампой мощность с учетом доли использованного излучения в системе, кВт;

t – время облучения, ч;

V – объем пробы, л.

Расчет энергоэффективности фотоокислительных процессов проводили для нитрофурала и производили расчет количества электрической энергии, необходимой для снижения концентрации целевого вещества в единичном объеме воды на 80%. Проведенные эксперименты показали большую эффективность процессов фотодеструкции данного активного фармацевтического соединения (АФС) на импульсной ксеноновой лампе (ИКЛ). Таким образом, сравнивались

энергоэффективности процессов окисления нитрофурала в случае фотолиза, фотокатализа и фото-Фентона.

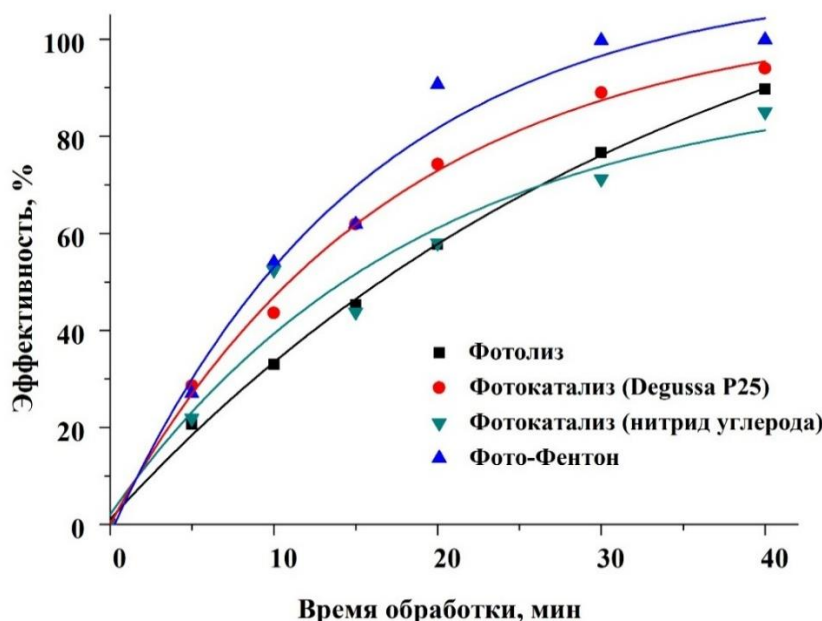


Рисунок 1. Зависимость эффективности окисления нитрофурала от времени обработки

График, представленный на рисунке 1, показывает, что фотоокислительные методы эффективны в отношении нитрофурала: с помощью метода прямого фотолиза нитрофурал разлагается на 80% за 32 минуты; для фотокаталитического окисления время разложения составляет 24 минуты для катализатора Degussa P25 и 38 минут — для нитрида углерода ($g-C_3N_4$); для фото-Фентон процесса — 19 минут.

Средняя мощность ИКЛ составляет 400 Вт, однако большая часть излучения не доходит до обрабатываемого раствора. Сфера радиусом 32 см, по которой распространяется исходящее от ИКЛ излучение, имеет площадь 12868 см^2 . В то же время площадь чашки, то есть поверхности раствора, до которой должно дойти УФ-излучение, равна 95 см^2 . Таким образом, доля излучения, дошедшая от лампы до обрабатываемого раствора, составляет 0,7%.

$$\frac{S_{\text{чашки}}}{S_{\text{сферы}}} = \frac{95}{12868} * 100\% = 0,7\% \quad (2)$$

Получается, средняя потребляемая мощность с учетом доли использованного излучения равна 2,8 Вт.

$$P = 400 * 0,007 = 2,8 \text{ Вт} \quad (3)$$

Зная все необходимые данные, рассчитаем энергетические затраты на окисление нитрофурала в случае чистого фотолиза:

$$E_{E0} = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{32}{60}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 14,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3 \quad (4)$$

Таким образом, без добавления каких-либо реагентов для окисления 1 кубического метра нитрофурала на 80% потребуется 14,9 кВт/ч.

Энергетические затраты на фотокаталитическое окисление нитрофурала в присутствии катализатора Degussa P25:

$$E_{E0} = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{24}{60}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 11,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3 \quad (5)$$

Энергетические затраты на фотокаталитическое окисление нитрофурала в присутствии катализатора нитрида углерода:

$$E_{E0} = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{38}{60}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 17,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3 \quad (6)$$

Энергетические затраты на окисление нитрофурала в системе фото-Фентона:

$$E_{E0} = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{19}{60}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 8,9 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{м}^3} \quad (7)$$

Перейдем от кВт · ч/м³ к руб/м³. Для примера рассмотрим дневной и ночной тарифы на электроэнергию в Москве в 2025 г, равные соответственно 6,99 руб/кВт · ч и 3,43 руб/кВт · ч.

Чтобы рассмотреть все аспекты, необходимо учесть стоимость используемых в экспериментах фотокатализаторов. Рассчитанные цены, необходимые для окисления 1 м³ загрязненной нитрофуралом воды, составили: 700 руб. для нитрида углерода, 2052 руб. для Degussa P25 и 4 руб. для реактива Фентона. Рассчитанные стоимости рассмотренных процессов окисления нитрофурала с учетом стоимости реагентов и в зависимости от тарифа на электроэнергию представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экономические затраты процесса фотоокисления АФС

Тариф на электроэнергию, руб/кВт · ч	Стоимость процесса, руб/м ³			
	Фотолиз	УФ/Degussa	УФ/g- C ₃ N ₄	Фото-Фентон
6,99	104	2156	824	66
3,43	51	2090	761	35

Исходя из данных в таблице 1, можно утверждать, что очистка сточных вод от органических соединений с применением фотоокислительных методов характеризуется высокими финансовыми затратами. Наиболее экономичным методом

для рассмотренных тарифов электроэнергии оказался фото-Фентон благодаря небольшой стоимости реагента Фентона. Однако данный метод обладает рядом минусов, таких как необходимость соблюдения определенного значения pH и высокая концентрация солей железа, поэтому данный перспективный метод требует оптимизации.

Таким образом, критерий энергоэффективности необходим для подбора метода очистки, так как он позволяет напрямую оценить экономическую целесообразность его применения и определить направления технологической оптимизации для достижения требуемой степени очистки при минимальных затратах.

Список литературы:

1. Kevin E. O'Shea, Dionysios D.D. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2012, vol. 3 (15), pp. 2112–2113.
2. Miklos D.B., Remy C., Jekel M., Linden K.G., Drewes J.E., Hübner U. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 2018, vol. 139, pp. 118-131.
3. Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 1999, vol. 53 (1), pp. 51–59.
4. 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.