

УДК 544.45/.454, 542.943-92
DOI 10.26456/vtchem2025.3.7

ДЕСТРУКЦИЯ ФУРАЦИЛИНА РАЗЛИЧНЫМИ ОКИСЛИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

М.Н. Устинова, Д.И. Дмитрук, А.Ю. Федорова

*ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный
исследовательский университет», г.Белгород*

Изучена деструкция фурацилина с различным сроком годности реактивом Фентона, фото-Фентона, системой Раффа, фото-Раффа, а также УФ-облучением и УФ-облучением в присутствии пероксида водорода. Определены эффективные условия процесса, подобраны оптимальные соотношения реагентов, рассчитаны степени деструкции и начальные скорости процессов, выявлено влияние температуры на изучаемый процесс, показана зависимость эффективности процесса от состава вспомогательных веществ лекарственного препарата.

Методами фотолиза, а также в присутствии окислителя пероксида водорода, фото-Фентона и фото-Раффа способность препарата с истекшим сроком годности к деструктивным процессам усиливается и достигает за час более 95% при самых лимитированных условиях деструкции. Препарат годный к применению подвергается фотодеструктивным методам слабее.

Ключевые слова: фурацилин, фотолиз, реактив Фентона, система Раффа, фото-Фентон, фото-Рафф

Лекарственные средства, которые создаются для поддержания здоровья и борьбы с различными заболеваниями, все чаще в нашем мире рассматриваются как факторы, которые способны загрязнить окружающую среду и в дальнейшем будут представлять опасность для здоровья людей и планеты в целом [1, 2]. Данные фармацевтические загрязнители охватывают широкий спектр соединений, начиная от антибиотиков и заканчивая гормональными препаратами, которые попадают в окружающую среду различными путями, в том числе как отходы фармацевтического производства [3, 4].

Одним из широко используемых фармацевтических препаратов, которые вызывают беспокойство, является фурацилин. Это в первую очередь антибактериальное средство, которое широко применяется для местного лечения кожных инфекций, ран, ожогов и других заболеваний [5]. Свое место он нашел в ветеринарии [6]. Широкое использование

фурацилина привело к тому, что в последнее время его обнаруживают в различных объектах окружающей среды, включая поверхностные, грунтовые и даже питьевые воды [7, 8].

Несмотря на его широкое применение в медицине, фурацилин обладает и токсическими свойствами, которые могут представлять угрозу для микробионтов. Исследования показывают, что фурацилин способен вызывать генотоксичность, канцерогенность, а также диспепсические и нейротоксические явления [9,10]. Кроме того, он может оказывать негативное воздействие на водные организмы, нарушая их развитие и репродуктивные функции [11, 12]. В связи с этим, необходимо изучать потенциальные риски, связанные с воздействием фурацилина, и разрабатывать эффективные методы для снижения его концентрации в окружающей среде. Актуальность данных исследований безусловна в современных реалиях.

Целью данной работы являлось изучение деструкции действующего вещества фурацилина в препаратах с различным сроком годности различными окислительными системами. Представляло интерес изучить препараты с истекшим сроком годности, выявить изменения состава действующего вещества в качественном и количественном содержании, а также изучить влияние этих изменений на способность к деструктивным процессам. Также хотелось оценить эффективность различного рода окислительных систем, сопоставить значимость вспомогательных веществ в деструктивном процессе, выявить влияние условий на процесс деструкции.

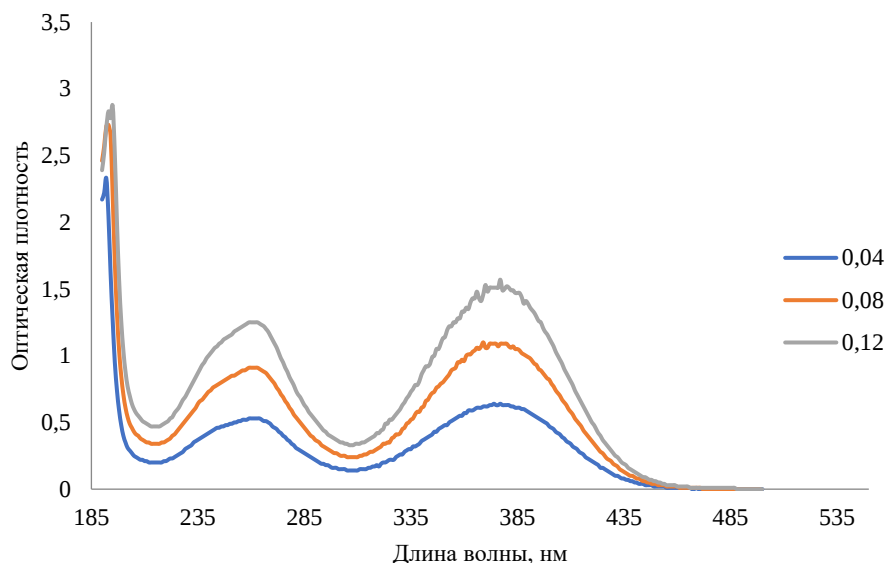
Объект исследования – фурацилин. В работе были использованы лекарственные препараты с истекшим сроком годности (П) и годные к применению (Г):

- Фурацилин «Авексима» таблетки 20мг со сроком годности: 07/22, 06/23, 07/27;
- Фурацилин «Ирбитский химико-фармацевтический завод» таблетки 20 мг со сроком годности: 07/23, 04/24;
- Фурацилин ООО «ЮЖ ФАРМ» таблетки 20мг со сроком годности: 04/20, 04/24, 07/27;
- Фурацилин ООО «ЮЖ ФАРМ» 0,02% раствор для местного и наружного применения со сроком годности 07/27;
- Фурацилин «Авексима» таблетки шипучие 20мг со сроком годности 07/26;
- Фурацилин «Мелиген» 20 мг порошок для приготовления раствора для местного применения со сроком годности 07/26.

Экспериментальная часть

Количественное определение субстратов проводили спектрофотометрическим методом (рисунок 1). Регистрацию спектров проводили на спектрофотометре Spesord 210 plus в диапазоне 190 – 650 нм с шагом 1 нм. Концентрацию субстратов определяли по калибровочным графикам в их линейной области.

Расчет концентрации делали относительно действующего вещества фурацилина, конечная концентрация в рабочем растворе составляла 0,125 ммоль/л.



Р и с . 1 Спектры поглощения раствора действующего вещества фурацилина различных концентраций (мМ) [13]

В экспериментах изучали протекание окисления субстратов реактивом Фентона и системой Раффа в водных растворах при температуре 20°C объемом 25 мл.

Для приготовления реактива Фентона и системы Раффа применяли пероксид водорода (~50%), точное значение концентрации которого определяли с помощью ареометра и с применением окислительно-восстановительного титрования перманганатом калия в кислой среде.

В качестве источников ионов железа (II) в реактиве Фентона была использована соль Мора $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки “хч”, ТОО «Лабхимпром». Исходный раствор соли готовили в мерной колбе на 25 мл из навески массой 0,125 г. Рабочие растворы готовили путем

разбавления исходного раствора. Рассчитанные количества с определённой концентрацией растворов пероксида водорода и раствора соли Мора добавляли в исследуемые растворы субстратов. Концентрация водных растворов пероксида водорода варьировалась 4,0 – 32,0 ммоль/л, концентрация ионов железа 0,125 – 0,5 ммоль/л.

В качестве источников ионов железа (III) в системе Раффа были использованы железо-аммонийные квасцы $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ марки “хч”, ТОО «Лабхимпром». Исходный раствор соли готовили в мерной колбе на 25 мл из навески массой 0,151 г. Рабочие растворы готовили путем разбавления исходного раствора. Рассчитанные количества с определённой концентрацией растворов пероксида водорода и раствора соли железа добавляли в исследуемые растворы субстратов. Концентрация водных растворов пероксида водорода варьировалась 4,0 – 32,0 ммоль/л, концентрация ионов железа 0,125 – 0,5 ммоль/л.

Для приготовления раствора лекарственного препарата из таблеток: таблетку предварительно взвешивали на аналитических весах, после взвешивания тщательно растирали в агатовой ступке, добавляли воды и растворяют при подогревании до 70-80°C на водяной бане до полного растворения. После охлаждения доводили до метки. Рабочая концентрация субстрата во всех экспериментах составляла 0,125 ммоль/л.

Для приготовления раствора лекарственного препарата из шипучих таблеток: таблетку предварительно взвешивали на аналитических весах, после взвешивания добавляли воды и растворяли, затем доводили до метки. Рабочая концентрация субстрата во всех экспериментах составляла 0,125 ммоль/л.

Раствор лекарственного препарата из жидкой формы не готовили, брали купленный препарат 0,02% раствор для местного и наружного применения в необходимом количестве. Рабочая концентрация субстрата во всех экспериментах составляла 0,125 ммоль/л.

Для подтверждения качественного состава просроченных препаратов применяли реакцию образования окрашенных аци-солей при действии щелочи в водной среде. Характер окраски зависит от строения заместителя в положении 2. Препарат растворяли в смеси 5 мл воды и 5 мл раствора едкого натра с появлением оранжево-красного окрашивания. Реакция щелочного гидролиза на остаток семикарбазида основана на разрыве фуранового цикла и образовании гидразина, выделяется аммиак, обнаруживаемый по запаху или по посинению влажной красной лакмусовой бумаги, внесенной в пары кипящей жидкости. Все изученные образцы фурацилина различных производителей и срока годности подтвердили качественный состав.

Количественное содержание фурацилина было подтверждено спектрофотометрическим методом. Было показано, что у препаратов с истекшим сроком годности содержание активного вещества сохраняется и составляет более 97%, что соответствует нормам фармакопейных стандартов.

Фотодеструкцию фурацилина проводили в фотолизной камере Вольта ФК-12М, оснащенной ртутной лампой ДРТ-1000 мощностью 1100 Вт, 50-60 Гц, с лучистым потоком 128 Вт. Поток излучения данной лампы лежит в области спектра 240-320 нм. Брали 25 мл исследуемого водного раствора, помещали в специальную кварцевую пробирку и подвергали облучению в течение часа. По истечении каждые 5 минут облучения, раствору давали охладиться, отбирали пробу в кювету спектрофотометра и регистрировали спектр поглощения.

Результаты и их обсуждения

Метод Фентона – один из наиболее популярных, известных, изученных и эффективных. Образующиеся в реакции свободные гидроксильные радикалы отличаются высоким значением окислительного потенциал, способны атаковать любую молекулу, вызывая ее деградацию, полную или частичную.

За процессом деструкции фурацилина под действием реактива Фентона следили с постоянным контролем pH. Это необходимо, поскольку наиболее эффективно процесс протекает при кислом pH 2-4. pH реакционной смеси составляла 3,0. Данные представлены в таблице 1 для просроченного препарата, и в таблице 2 - для годного.

Т а б л и ц а 1

Кинетические характеристики деструкции фурацилина с истекшим сроком годности [14]

Соотношение реагентов [S] :[Fe ²⁺] : [H ₂ O ₂]	v ₀ , мкмоль/л×мин	F (60), %
1:1:32	51,0	45,6
1:1:64	73,0	92,3
1:1:128	74,0	96,8
1:1:256	63,0	84,0
1:0,5:128	45,0	72,8
1:2:128	111,0	94,6

Т а б л и ц а 2

Кинетические характеристики деструкции фурацилина годного к применению [14]

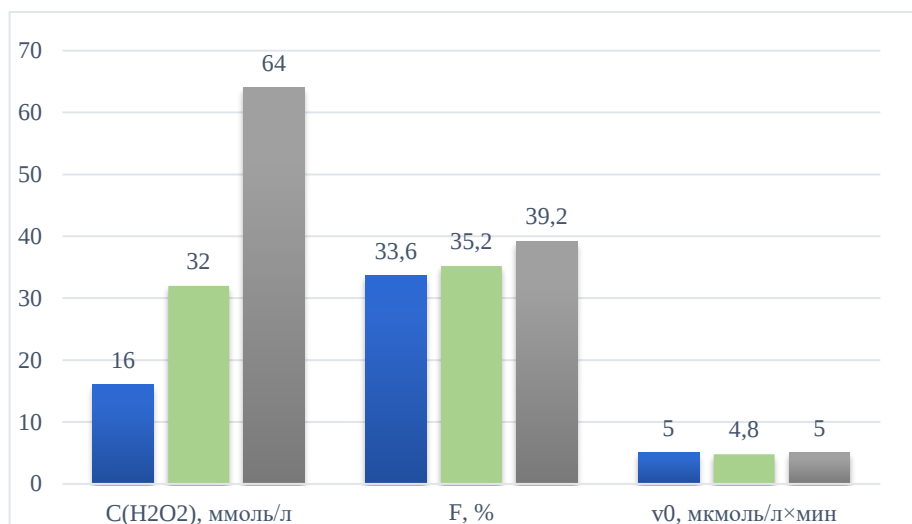
Соотношение реагентов [S] :[Fe ²⁺] : [H ₂ O ₂]	v ₀ , мкмоль/л×мин	F (60), %
1:1:16	66	67,2
1:1:32	68	92,0
1:1:64	71	78,4
1:1:128	63	72,8
1:1:256	62	65,6
1:0,5:128	53	55,2
1:2:128	73	72,0
1:0,5:32	73	66,4
1:2:32	66	62,4

Сопоставляя данные получено, что для фурацилина с истекшим сроком годности оптимальным является соотношение 1:1:128, для препарата годного к применению – соотношение 1:1:32, однако стоит отметить, что деструкция просроченного препарата достигается наиболее полно, 97%, в то время как для годного препарата только 92%.

Далее проводили деструкция фурацилина системой Раффа. Генерация пергидроксильных радикалов в такой системе происходит под действием ионов железа (III) и пероксида водорода [15].

Процесс деградации препарата сначала изучали при различных концентрациях пероксида водорода и при фиксированном значении концентрации ионов железа (рисунок 2).

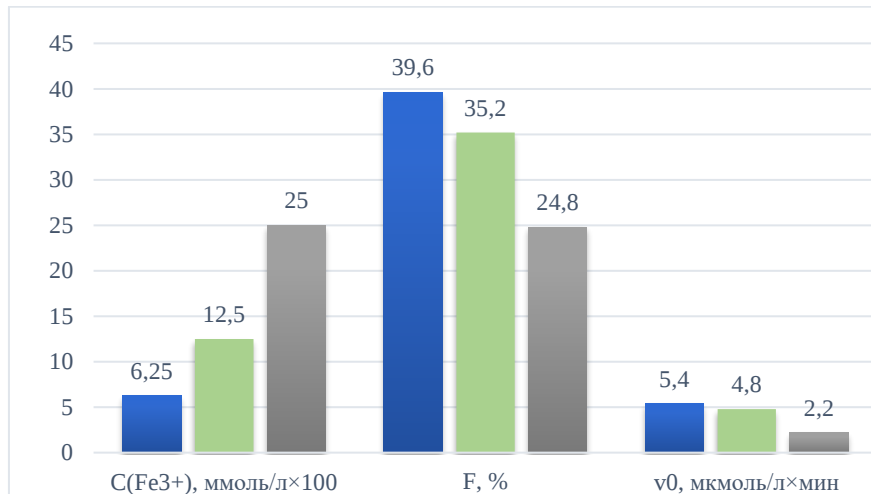
Оптимальной определена концентрация пероксида водорода 64,0 ммоль/л. Однако наблюдается снижение эффективности процесса до 40%.



Р и с . 2 - Зависимость степени деструкции фурацилина с истекшим сроком годности и начальной скорости процесса от концентрации пероксида водорода

Затем меняли концентрацию соли железа при постоянстве значения концентрации пероксида водорода. Кинетические данные процессов представлены на рисунке 3.

Более глубоко деструкцию фурацилина при концентрации ионов железа $0,0625 \text{ ммоль/л}$ происходит с пероксидом водорода с $64,0 \text{ ммоль/л}$, при этом степень деградации составила всего 25% , начальная скорость процесса также оказалась наибольшей.



Р и с . 3 - Зависимость степени деструкции фурацилина с истекшим сроком годности и начальной скорости процесса от концентрации ионов железа (III)

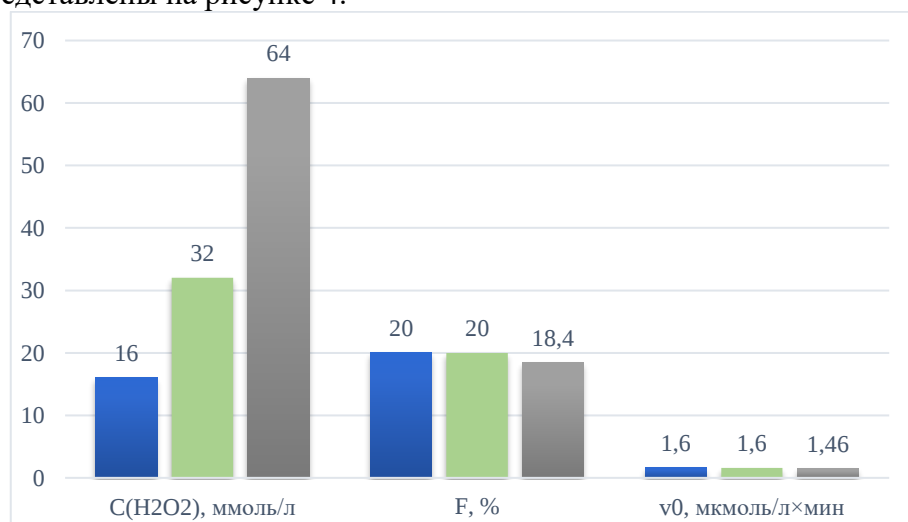
Соотношения окислительных агентов и их данные сведены в таблицу 3. Обращает на себя внимание снижение эффективности процесса деградации фурацилина в 2,4 раза относительно системы Фентона, в данном случае максимальная эффективность не достигла и 40%.

Т а б л и ц а 3

Кинетические характеристики деструкции фурацилина с истекшим сроком годности

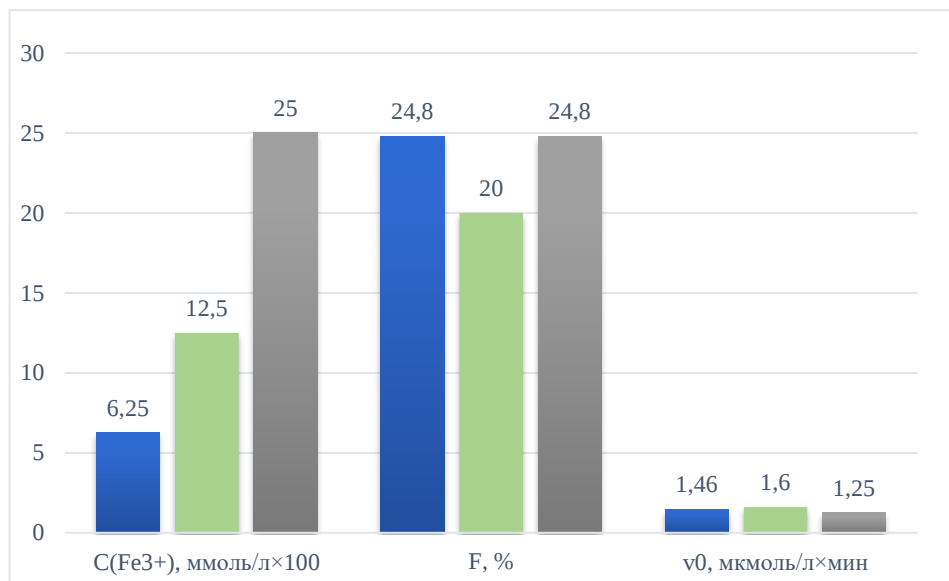
Соотношение реагентов [S] :[Fe ²⁺] : [H ₂ O ₂]	v ₀ , мкмоль/л×мин	F (60), %
1:1:128	5,0	33,6
1:1:256	4,8	35,2
1:1:512	5,0	39,2
1:0,5:256	5,4	39,6
1:2:256	2,2	24,8

Далее проводили деградацию фурацилина годного к применению. Для проведения процесса деградации водного раствора фурацилина сначала изучали при различных значениях концентраций пероксида водорода при постоянстве концентрации ионов железа (III). Эффективной оказалась концентрация пероксида водорода 16,0 ммоль/л. Значения степени деструкции и начальной скорости процесса представлены на рисунке 4.



Р и с . 4 - Зависимость степени деструкции фурацилина годного к применению и начальной скорости процесса от концентрации пероксида водорода

Затем меняли концентрацию соли железа при постоянстве значения концентрации пероксида водорода 16,0 ммоль/л. Процесс деградации системой Раффа действующего вещества фурацилина был изучен с применением широкого ряда сочетаний окислительных реагентов в течение часа (табл. 4). Более глубокая деградация фурацилина наблюдалась при концентрации соли железа 0,0625 и 0,25 ммоль/л и пероксида водорода 16,0 ммоль/л, при этом степень деградации не достигла и 25,0% (рис.5).



Р и с . 5 - Зависимость степени деструкции фурацилина годного к применению и начальной скорости процесса от концентрации ионов железа (III)

Т а б л и ц а 4
Кинетические характеристики деструкции фурацилина годного к применению

Соотношение реагентов [S] :[Fe ²⁺] : [H ₂ O ₂]	v ₀ , мкмоль/л×мин	F (60), %
1:1:128	1,60	20,0
1:1:256	1,60	20,0
1:1:512	1,46	18,4
1:0,5:256	1,46	24,8
1:2:256	1,25	24,8

Стоит отметить, что для фурацилина с истекшим сроком годности, как и для препарата годного к применению сохраняется наиболее эффективное соотношение реагентов 1:0,5:256 (табл. 3 и 4), однако эффективность процесса деструкции годного препарата снижается в 3,7 раз относительно системы Фентона, и не превышает 25%.

Затем проводили изучение и сопоставление способности препаратов к УФ-облучению. Процесс фотодеструкции идет с высокой эффективностью для просроченного препарата, и менее эффективно - для годного (таблица 5).

Введение в систему окислителя – пероксид водорода – в концентрации в две с половиной тысячи раз меньшей, чем был использован в методе Фентона, повлияло на ход деградации (таблица 5). Чтобы интенсифицировать процесс фотодегradации в обрабатываемый раствор фурацилина добавляли пероксид водорода в количестве равном или меньшем стехиометрическому.

Аналогично эксперимент провели в более высоких концентрациях, сравнимых с теми, что были использованы в системе Фентона, но не оптимальных. Выявлено, что под УФ-облучением в присутствии 14 мМ пероксида водорода деградация препаратов идет синхронно, с одной скоростью и одинаковой степенью деструкции.

Данные фотодегradации фурацилина без окислителя и с ним представлены в таблице 5.

Таблица 5

Кинетические характеристики фотодеструкции фурацилина годного к применению (Г) и просроченного (П)

Метод	Соотношение реагентов [S]:[H ₂ O ₂]	Фурацилин Г		Фурацилин П	
		v ₀ , мкмоль/л×мин	F(60), %	v ₀ , мкмоль/л×мин	F(60), %
УФ		15	57,6	14	96,0
УФ+H ₂ O ₂	1:0,0056	34	75,2	27	95,2
	1:1,12	34	85,8	42	96,0
	1:11,2	52	99,9 (97,0 / 45 мин)	57	99,9 (97,0 / 40 мин)
	1:112,0	95	99,9 (99,2 / 10 мин)	95	99,9 (99,2 / 10 мин)

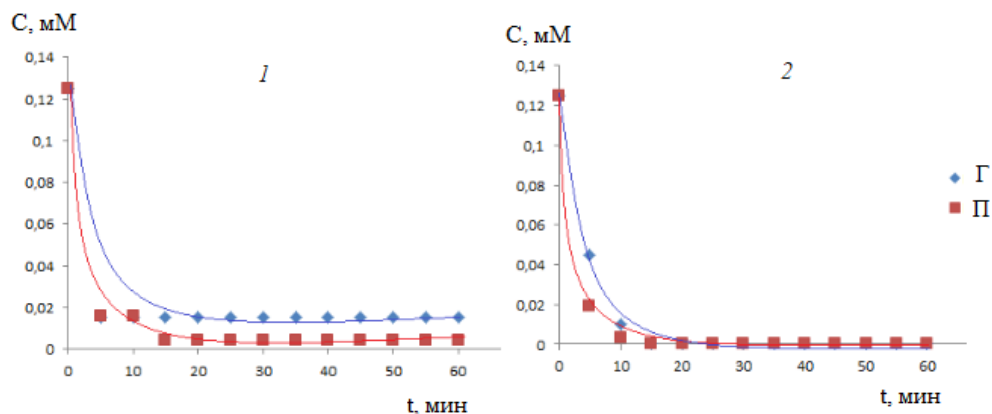
Окисление субстратов в присутствии пероксида водорода и ультрафиолета сочетает два механизма действия: прямой фотолиз и окисление гидроксильными радикалами. При этом первый процесс селективен, а второй – нет, что и является основой универсальности метода, поскольку облучение пероксида водорода ультрафиолетом приводит к дополнительному образованию гидроксильных радикалов [16].

Выявлено, что деградация в системе УФ/ H_2O_2 значительно эффективнее УФ-облучения. С ростом количества пероксида водорода наблюдается и усиление эффективности процесса деградации.

Далее изучено влияние ионов железа (II) на фотодegradацию субстрата в присутствии пероксида водорода (фото-Фентон) в низких микроконцентрациях. Помимо пероксида водорода в систему дополнительно вводили ионы железа (II) с концентрацией 0,025 мкмоль/л. В данном случае, деградация с применением фотолиза в присутствии пероксида водорода и ионов двухвалентного железа сочетает уже три механизма: прямой фотолиз и окисление гидроксильными радикалами, генерируемыми из пероксида водорода под действием ионов железа, а также УФ-облучения [17]. Степень деградации процесса возрастает, что является основой уникальности метода, поскольку генерация гидроксильных радикалов происходит под действием ультрафиолета на пероксид водорода, и при действии ионов железа, катализируемых распад пероксида водорода. Специально взяты соотношения агентов с большим количеством пероксида водорода и меньшим - ионов железа, поскольку в данном диапазоне варьирования метод Фентона был не эффективен.

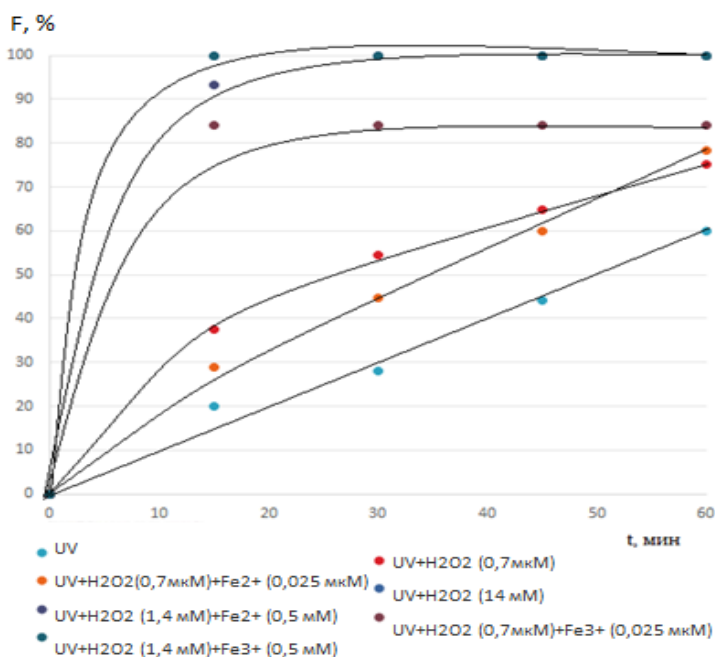
При снижении концентрации пероксида водорода в 10 раз и добавлении ионов железа 0,05 мМ препараты фурацилина вновь становятся различимы по скорости и степени достигаемой деградации, однако полная деградация наблюдается уже через 20 минут.

А вот система фото-Раффа, как в низких микроконцентрациях (рис.8.1), и в более высоких (рис.8.2) оказалась более эффективной под действием УФ-облучения, относительно самого реактива без УФ.

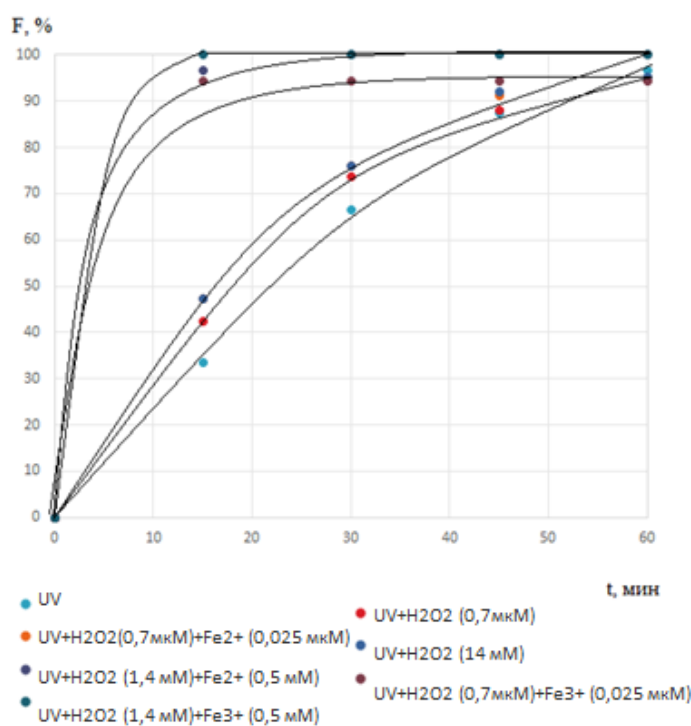


Р и с . 8 - Кинетическая кривая УФ-деструкции препаратов фурацилина в присутствии: 1 - 0,7мкМ пероксида водорода и 0,025мкМ ионов железа (III) в течение 60 минут; 2 - 1,4мМ пероксида водорода и 0,05мМ ионов железа (III) в течение 60 минут

Обращает внимание, что препараты с истекшим сроком годности подвергаются фотодеградации в большей степени. Для наглядности изменения эффективности процессов были построены графики зависимости степени деструкции от времени облучения для годного препарата (рис.9) и просроченного (рис.10).



Р и с . 9 - Эффективность фотодеструкции препаратов фурацилина годного к применению для различных окислительных систем



Р и с . 10 - Эффективность фотодеструкции препаратов фурацилина с истекшим сроком годности для различных окислительных систем
Кинетические характеристики процессов представлены в табл.6.

Т а б л и ц а 6
Кинетические характеристики фотодеструкции фурацилина годного к применению (Г) и просроченного (П)

Метод	Соотношение реагентов [S]:[Fe ^{2+/3+}]:[H ₂ O ₂]	Фурацилин Г		Фурацилин П	
		v ₀ , мкмоль/л×мин	F(60), %	v ₀ , мкмоль/л×мин	F(60), %
фото-Фентон	1:0.0002:0.0056	25	77,8	31	99,7
	1:4:11,2	54	99,9 (78,4 / 15 мин)	70	99,9 (97,0 / 15 мин)
фото-Рафф	1:0.0002:0.0056	105	90,0	100	87,5
	1:4:11,2	75	99,9 (90,9 / 10 мин)	105	99,9 (98,9 / 10 мин)

Несмотря на то, что в просроченном препарате сохраняется качественно и количественно содержание действующего вещества, методами фотолиза, а также в присутствии пероксида водорода, фото-Фентона и фото-Раффа его способность к деструктивным процессам усиливается и достигает за час более 95% при самых лимитирующих условиях.

Препарат годный к применению подвергается фотодеструкции слабее.

Процесс идет синхронно для обоих препаратов только в УФ-условиях при высоких концентрациях пероксида водорода.

Мы обратили внимание, что в процессе фотолиза под действием лампы, происходит нагрев изучаемого раствора от 20 °С до 50 °С за час облучения. Представляло интерес, как может повлиять температура исходного раствора, помещаемого в фотолизную камеру, на процесс деградации. Нами были изучены пробы различных образцов фурацилина, различного срока годности при исходном значении температуры раствора 20⁰С и 80⁰С.

Выбор второй температуры обусловлен тем, что растворы фурацилина из таблеток готовят растворением в воде, нагретой до 80⁰С. Данные представлены в таблице 7 и 8 при исходном значении температуры раствора 20 °С и 80 °С соответственно.

Т а б л и ц а 7

Характеристики процессов фотодегradации фурацилина при 20⁰С
исходного раствора

срок годности	F (10), %	F (30), %	F (60), %	v ₀ , mkmol/L× min
2022	38,4	58,9	96,2	12,0
2024	25,2	42,5	57,6	11,2
2027	25,3	41,0	57,0	11,2

Т а б л и ц а 8

Характеристики процессов фотодегradации фурацилина при 80°C
исходного раствора

срок годности	F (10), %	F (30), %	F (60), %	v ₀ , mkmol/L × min
2023	86,4	99,9	99,9	18,0
2025	82,0	97,9	99,9	15,4
2027	82,0	99,2	99,9	15,4

Специально, для демонстрации закономерностей, были рассчитаны степени деструкции процессов для 10; 30 и 60 минут облучения. Можно видеть, что при повышенной температуре уже через 10 минут облучения степень деструкции фурацилина выше 80%. Стоит заметить, что препараты с истекшим сроком годности подвергаются дегradации легче.

Второй особенностью фотодеструктивных процессов было изучение влияния вспомогательных веществ на них. Для изучения влияния вспомогательных веществ, были исследованы препараты фурацилина различного состава: таблетки, раствор, шипучие таблетки (табл.9).

Т а б л и ц а 9

Характеристики процессов фотодегradации фурацилина годного к
применению в различных лекарственных формах

№	Форма ЛС	Состав вспомогательных веществ	v ₀ , мкмоль/л×мин	F (60), %
1	Таблетки	натрия хлорид	12,0	96,2
2	Раствор	макрогол, повидон	13,0	92,8
3	Шипучие таблетки	винная кислота, натрия гидрокарбонат, натрия карбонат, натрия хлорид, макрогол	11,0	84,0

Было определено, что с ростом количества вспомогательных веществ степень деструкции препарата снижается, что обусловлено тем, что образуемы в процессе фотолиза активные частицы расходуются на

деструкцию других компонентов раствора по механизму параллельных реакций, либо же вспомогательные вещества выступают ингибиторами.

Таким образом, глубокое изучение процессов инактивации фурацилина, просроченного и годного, широким спектром окислительных систем показало высокую эффективность методов и может быть использовано при создании технологий локального характера очистных сооружений стоков фармацевтической промышленности.

Заключение

В работе выполнено сопоставление способности к окислительной деструкции фурацилина с различным сроком годности реактивом Фентона. Показано, что для фурацилина с истекшим сроком годности оптимальным является соотношение окислительной системы $[S]:[Fe^{2+}]:[H_2O_2] = 1:1:128$, для препарата годного – соотношение 1:1:32, однако стоит отметить, что деструкция просроченного препарата достигается наиболее полно - 96,8%, в то время как для годного препарата только 92,0%.

В работе выполнено сопоставление способности к окислительной деструкции фурацилина с различным сроком годности системой Раффа. Показано, что для фурацилина с истекшим сроком годности, как и для годного, оптимальным является соотношение окислительной системы $[S]:[Fe^{3+}]:[H_2O_2] = 1:0,5:256$, однако стоит отметить, что деструкция просроченного препарата достигает только - 40%, в то время как для годного препарата только 25%.

Выявлено, что в просроченном препарате сохраняется качественное и количественное содержание действующего вещества. Однако его способность к УФ-деструкции усиливается, и достигает за час более 95% при самых лимитирующих условиях. Препарат годный к применению подвергается *фотодеструктивным* методам слабее. Процесс идет синхронно для обоих препаратов только в *УФ*-условиях при высоких концентрациях пероксида водорода.

В работе выполнено сопоставление способности к окислительной фотодеструкции фурацилина с различным сроком годности системами фото-Фентона и фото-Раффа. Показано, что обе окислительные системы имеют высокую эффективность процесса, 99,9% для всех изученных образцов.

Проведено сопоставление влияния температуры изучаемого раствора на эффективность фотодеструкции. Показано, что при 80 °С достигается полная деструкция через 20-25 минут.

Изучено влияние вспомогательных веществ на процесс фотодеструкции фурацилина. Наивысшую степень деструкции имеет фурацилин в таблетках, чем обусловлена более высокая степень деструкции.

Список литературы

1. Абрамова Е.С., Русакова Т.А. Фармацевтическое загрязнение водных объектов: обзор проблемы // Анализ риска здоровью. 2020. № 2. С. 78–86.
2. Беляев А.А., Петрова О.И. Экологические аспекты фармацевтического производства // Химическая технология. 2018. Т.19, № 5. С. 241–248.
3. Васильев В.В. Влияние фармацевтических препаратов на водные экосистемы // Экология и промышленность России. 2019. Т.23, № 4. С. 56–61.
4. Иванов И.И., Смирнов П.П. Проблема фармацевтического загрязнения окружающей среды: пути решения // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 3. С. 35–40.
5. Козлов С.А., Сидоров А.Н. Обзор методов удаления фармацевтических препаратов из сточных вод // Водоочистка. 2022. № 1. С. 15–22.
6. Кузнецова О.В. Фармацевтические препараты как загрязнители окружающей среды: анализ рисков // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 12. С. 1129–1134.
7. Лебедева Н. М. Мониторинг фармацевтических препаратов в природных водах // Аналитический контроль качества вод. 2020. № 3. С. 45–52.
8. Михайлова Е.П. Фармацевтическое загрязнение: источники, распространение, воздействие // Экологическая химия. 2019. Т. 28, № 6. С. 345–352.
9. Николаева Т. И. Оценка воздействия фармацевтических препаратов на здоровье населения // Здоровье населения и среда обитания. 2021. № 10. С. 28–34.
10. Орлова А. С. Современные методы анализа фармацевтических препаратов в объектах окружающей среды // Журнал аналитической химии. 2018. Т. 73, № 9. С. 963–972.
11. Петров Д.А. Фармацевтические препараты в окружающей среде: глобальная проблема // Экологический вестник России. 2022. № 2. С. 45–51.
12. Семенова И.Н. Влияние фармацевтических препаратов на микроорганизмы в окружающей среде // Микробиология. 2017. Т. 86, № 4. С. 435–442.
13. Устинова М.Н., Золотухина К.А. Инактивация ксенобиотиков: некоторых азокрасителей, нитропроизводных фенола и тетрациклинов. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 23. 4. 2023. С.382-391.

14. Устинова М.Н., Дмитрук Д.И. Инактивация фармацевтических отходов. Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2024. № 3 (57). С.137–152
15. Ustinova M. N., Volobuyeva V. V. Oxidative degradation of nitrofurans derivatives. Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия. Том 7 (73). 2021. № 3. Р.323-329.
16. Экспериментальные методы химической кинетики. Гл.Импульсный фотолиз. Под ред. Н.М. Эмануэля, М.Г. Кузьмина. М.: изд. Моск-во ун-та. 1985. с.325.
17. Лобанова Г.Л., Шиян Л.Н., Юрмазова Т.А., Войно Д.А. Исследование механизма реакций, протекающих при электроимпульсном воздействии на водные растворы органических веществ. // Современные проблемы науки и образования. 2013. №6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11525> (дата обращения: 4.06.2025).

Об авторах:

УСТИНОВА Мария Николаевна - доцент, к.х.н., доцент кафедры общей химии ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85); e-mail: ustinova@bsuedu.ru

ДМИТРУК Даниил Игоревич - студент 2 курса магистратуры специальности 04.04.01 Химия, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85); e-mail: 1386004@bsuedu.ru

ФЕДОРОВА Александра Юрьевна - студентка 3 курса бакалавриата специальности 04.03.01 Химия, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85); e-mail: 1276251@bsuedu.ru

DESTRUCTION OF FURACILINE BY VARIOUSE OXIDATIVE SYSTEMS

M.N. Ustinova, D.I. Dmitruk, A.U. Fedorova

Belgorod State University, Belgorod

The destruction of furacilin with different shelf life by Fenton's reagent, UV-Fenton, Ruff's system, UV-Ruff, UV irradiation and UV irradiation in the presence of hydrogen peroxide has been studied. The effective conditions of the process have been determined, the optimal ratios of the reagents have been selected, the degrees of destruction and initial rates of the processes have been calculated, the effect of temperature on the studied process has been revealed, and the dependence of the process efficiency on the composition of the drug's excipients has been shown.

By methods of photolysis, as well as in the presence of the oxidizing agent hydrogen peroxide, UV-Fenton and UV-Raff, the ability of the expired drug to destructive processes is enhanced.

Keywords: *furacilin, photolysis, Fenton's reagent, Raff's system, photo-Fenton, photo-Raff*

Дата поступления в редакцию: 16.06.2025.

Дата принятия в печать: 27.06.2025.