

## ПРИМЕНЕНИЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
rapost@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** бактерии; вирусы; вода; клеточный автомат; кумулятивная доза; микроорганизмы; мишень; моделирование; ультрафиолетовое излучение.

**Аннотация:** Обоснован модельный подход к анализу восприимчивости микроорганизма к ультрафиолетовому (УФ) облучению. Проведено моделирование кинетики УФ-обеззараживания на основе применения теории клеточных автоматов, позволяющее определить механизм гибели микроорганизма, а также разработать рекомендации по режимам УФ-обработки воды. Показаны результаты моделирования кинетики УФ-обеззараживания для основных механизмов гибели микроорганизмов: модели поражения мишени, кумулятивной модели и их комбинации, при варьировании основных влияющих параметров.

### Обозначения

|  |   |
|--|---|
| $N, N_0$ – текущее и начальное число организмов на решетке соответственно;   | $w$ – скорость перемещения организма, клетка/ед. времени; |
| $X_{\max}, Y_{\max}$ – размерность решетки по осям $x$ и $y$ соответственно; | $d_m$ – вероятность поражения организма-мишени            |

Воды, загрязненные различными отходами (бытовыми и промышленными), относят к сточным. В процессе функционирования они удаляются с территорий населенных мест и промышленных предприятий системами канализации. Воды, образующиеся в результате выпадения в пределах территорий населенных пунктов и промышленных объектов атмосферных осадков, также относят к сточным [1]. Содержащиеся в сточных водах органические вещества, микроорганизмы, бактерии и т.п., попадая в значительных количествах в водоемы или скапливаясь в почве, как правило, ухудшают санитарное состояние водоемов и атмосферы, способствуя ухудшению качественных показателей воды. Аналогичная ситуация наблюдается для поверхностных и подземных вод. Наибольшую опасность представляют обитающие в сточных, подземных и поверхностных водах различные микроорганизмы – простейшие, бактерии, вирусы, а также водоросли и грибки [2, 4]. Среди них встречаются как безвредные для здоровья человека, так и опасные (болезнетворные или патогенные), способные вызывать различные заболевания. Патогенные микроорганизмы в сточных водах могут вызывать различные инфекционные заболевания. Количество и разнообразие микроорганизмов в водоемах (особенно находящихся в пределах или вблизи населенных пунктов и промышленных предприятий) достаточно велико, что связано с постоянным загрязнением воды канализационными и хозяйственными стоками. Поэтому вопросы очистки, обезвреживания и утилизации воды являются важной проблемой водоподготовки.

Полная очистка воды представляет собой сочетание стадий механической, химической и/или биологической очистки и обеззараживания. Как правило, в технологической линии данные стадии расположены последовательно, а выбор конкретного метода и аппаратного оформления обусловлен необходимой степенью очистки воды, результатами химического и микробиологического анализа жидкости, требуемой производительности. Обычно финальной стадией очистки является обеззараживание. Данная стадия предназначена для окончательного уничтожения микроорганизмов, оставшихся в воде после стадий механической, химической и/или биологической очистки.

При использовании поверхностной воды в пищевых или технологических целях, обязательна полная очистка. В случае использования подземных вод (артезианских, барражных и т.п.) глубина очистки зависит от микробиологических свойств добываемой воды. В современных условиях, для использования подземных и поверхностных вод в пищевых целях, практически всегда необходимо обеззараживание.

Одним из наиболее эффективных и достаточно дешевых методов обеззараживания воды является ультрафиолетовое (УФ) облучение. Ультрафиолетовое излучение представляет собой электромагнитное излучение оптического диапазона с длиной волны в пределах 200...400 нм [1]. По стандартам ISO ультрафиолет делится на несколько типов: ближний NUV 400...300 нм; средний MUV 300...200 нм; дальний FUV 200...122 нм; экстремальный EUV, XUV 121...10 нм; ультрафиолет А, длинноволновой диапазон UVA 400...315 нм; ультрафиолет В, средневолновой UVB 315...280 нм; ультрафиолет С, коротковолновой UVC 280...100 нм [1].

Практически весь UVC и приблизительно 90 % UVB поглощаются озоном, а также водяным паром, кислородом и углекислым газом при прохождении солнечного света через земную атмосферу. Излучение диапазона UVA слабо поглощается атмосферой. Поэтому радиация, достигающая поверхности Земли, в значительной степени содержит ближний ультрафиолет UVA и в небольшой доле – UVB. При этом наибольшее биологическое воздействие на микроорганизмы оказывает поглощаемый верхним слоем атмосферы ультрафиолет UVC.

Ультрафиолетовые лучи, как часть солнечного спектра, воздействуют как на одноклеточные, так и многоклеточные организмы. Они обладают сильным бактерицидным и мутагенным действием, вызывают нарушения обмена веществ. Различные виды микроорганизмов имеют разную резистентность по отношению к ультрафиолетовому излучению, что учитывается коэффициентом сопротивляемости, определяемым экспериментально [1]. Например, по простейшим большинство работ посвящено действию ультрафиолетовых лучей на активные стадии инфузорий. Установлено, что под влиянием УФ-лучей у них нарушалась способность к делению; при высоких дозах облучения наступала гибель [3]. Наблюдались также структурные изменения в цитоплазме клеток инфузорий [2, 3]. Наиболее чувствительны к ультрафиолету трофонты. Цисты покоя обладали большей устойчивостью, которая увеличивалась с их возрастом. У амёб наблюдалась различная восприимчивость к ультрафиолету даже среди особей одного клона [3].

Стандартная обеззараживающая установка, как правило, оснащается УФ-лампами (ртутно-кварцевыми или аргоно-ртутными), генерирующими излучение в определенном оптическом диапазоне. Например, ртутные газоразрядные лампы генерируют излучение 254 нм, обладающее максимальным бактерицидным эффектом. Вода в аппарате движется относительно тонким слоем и обтекает источники излучения. При этом она должна обладать наибольшей проницаемостью для лучей выбранного диапазона, то есть быть возможно более оптически прозрачной [1]. Очистка воды начинается сразу же при попадании ее в установку. По окончании обработки вода не требует повторной обработки и полностью пригодна для употребления в пищу или для производственных целей.

Для моделирования процесса УФ-обеззараживания предложено использование модели, основанной на принципах функционирования клеточного автомата [5]. Достоинством применения математического аппарата клеточных автоматов является возможность учета наиболее важных физических особенностей механизма воздействия УФ-излучения, свойств микроорганизмов, оптических и теплофизических свойств жидкой среды, конструктивных особенностей аппарата [6].

Разработанная модель клеточного автомата для моделирования УФ-обеззараживания воды включает следующие правила:

1. Организмы «живут» на ограниченной решетке. Размер решетки рассчитывается исходя из данных по концентрации исследуемых организмов в исходной жидкости, размерам организма, скорости его передвижения, конструктивным особенностям аппарата. Учитывая дискретность модели, за единицу в размере решетки принимаем характерный размер микроорганизма, с последующим расчетом размеров решетки в зависимости от концентрации и скорости движения организма и жидкости.

2. В начальный момент времени заданное количество организмов распределяется по решетке заданного размера случайным образом.

3. Если организм «жив», то он занимает определенную клетку решетки; если «погибает», то клетка решетки становится пустой.

4. Перемещение организма по решетке осуществляется хаотически, с учетом столкновений с другими организмами и границами решетки. При этом принимается, что при столкновении наблюдается упругий удар, с соответствующим изменением направления движения.

5. Для моделирования механизма поражения организма УФ-облучением по модели мишени и модели кумулятивного воздействия, а также их комбинации, у каждого организма имеется уникальный массив данных, хранящий значения вероятности «гибели» организма по модели мишени, и значения накопленной и предельной доз облучения. Массив данных свойств организма заполняется в начальный момент времени заданными значениями вероятностей и доз.

6. В модели предполагается возможность изменения показателей вероятности поражения мишени и накопленной дозы, в зависимости от времени существования организма и положения организма в определенном месте решетки.

7. Расчет воздействия УФ-излучения осуществляется на каждом временном шаге одновременно на все «живые» организмы, находящиеся на решетке.

8. На каждом временном шаге моделируется движение микроорганизма по клеткам решетки, рассчитываются вероятность поражения мишени и полученная доза облучения, делается вывод о состоянии организма: «жив» или «погиб».

9. Моделирование осуществляется до момента существования на решетке хотя бы одного «живого» организма.

Приведем примеры функционирования модели при задании различных значений входных параметров для модели гибели организма в зависимости от вероятности поражения мишени, модели кумулятивной дозы облучения.

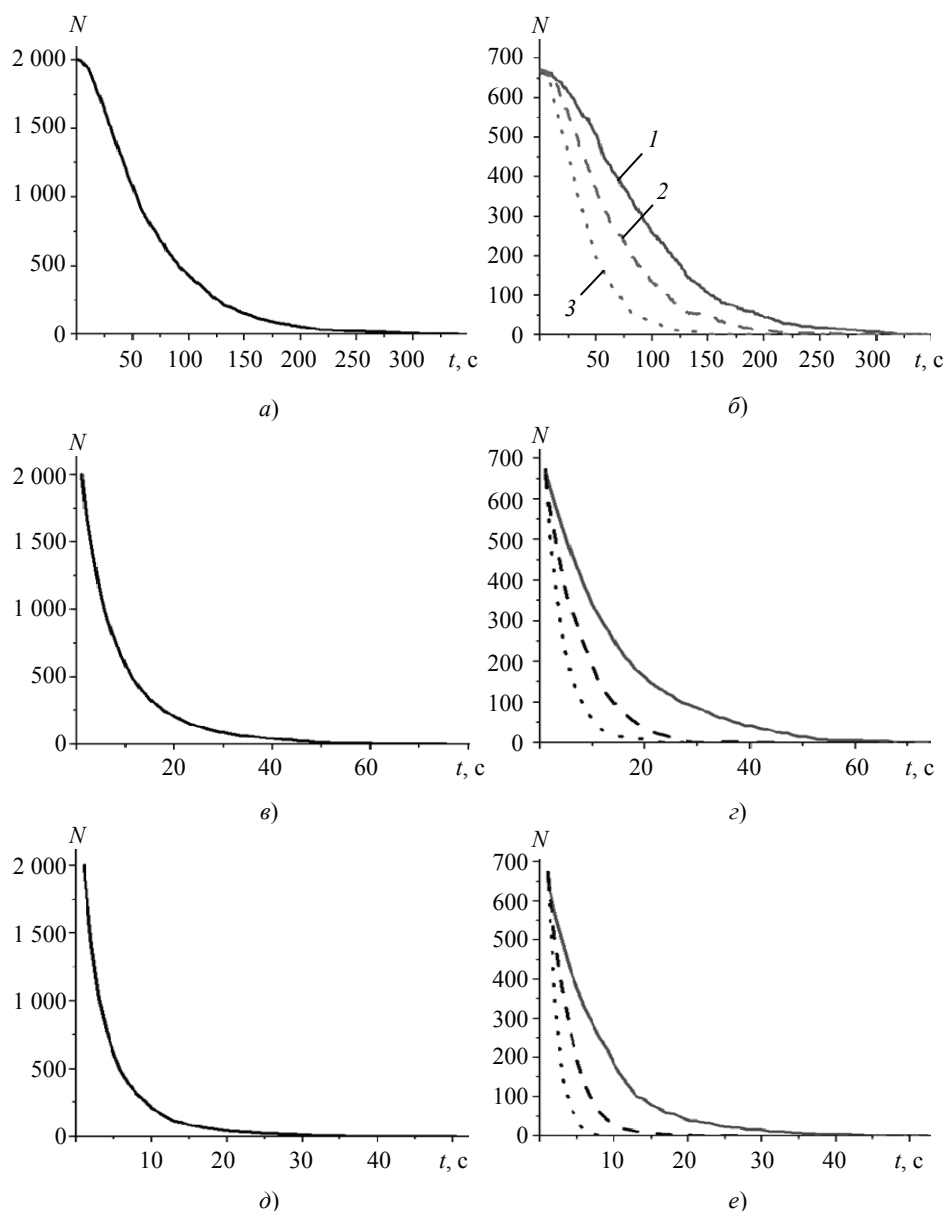
Зададимся для всех исследуемых режимов следующими начальными параметрами: начальное число организмов  $N_0 = 2000$ ; размерность решетки  $700 \times 300$ ,  $X_{\max} = 700$ ,  $Y_{\max} = 300$ ; скорость перемещения организма  $w = 1$  клетка/ед. времени.

Разобьем исследуемую решетку на 3 зоны (верхнюю, среднюю и нижнюю) по оси  $y$ . При этом принимаем нижнюю границу верхней зоны равной  $0,33Y_{\max}$ , верхнюю границу нижней зоны равной  $0,66Y_{\max}$ .

Для модели гибели организма в зависимости от вероятности поражения мишени принимаем следующие значения понижения вероятности поражения организма-мишени по зонам: верхняя – 0,99, средняя – 0,55, нижняя – 0,25.

Покажем поведение модели для механизма гибели организмов по принципу поражения мишени (рис. 1). Зададимся значениями вероятности поражения организма-мишени  $d_m$  равными 5, 25 и 50 %. Приведенные графики показывают уменьшение числа живых организмов по всей решетке и отдельно по выбранным зонам для этих значений.

Необходимо отметить, что при случайном распределении заданной выборки в начальный момент времени количество организмов в каждой зоне практически одинаково, что позволяет проводить корректный сравнительный анализ воздействия

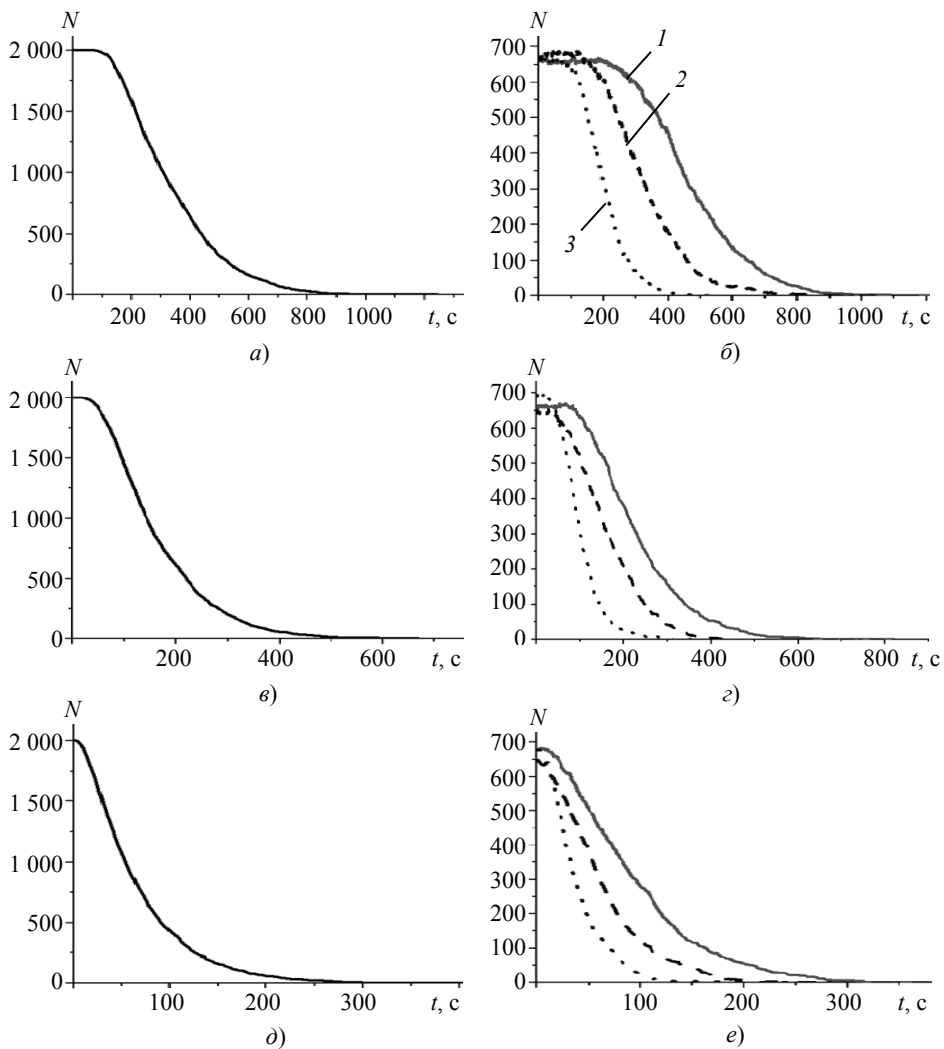


**Рис. 1. Графики уменьшения числа живых организмов по всей решетке (а, в, д) и выбранным зонам (б, г, е) для вероятности поражения организма-мишени  $d_m$ , %:**  
 а, б – 5; в, г – 25; д, е – 50; 1 – нижняя; 2 – средняя; 3 – верхняя

облучения по зонам. Ожидаемое уменьшение времени гибели заданного числа организмов наблюдается при увеличении вероятности поражения мишени (см. рис. 1). При этом гибель организмов начинается сразу после начала воздействия излучения. Ожидаемо, что при невысоком значении скорости перемещения организма (в пределах выбранной решетки скорость равна 1 клетка/ед. времени), а также с учетом уменьшения вероятности поражения мишени по оси  $y$  в верхней зоне интенсивность гибели максимальна, в нижней – минимальна.

Покажем поведение модели для механизма гибели организмов по принципу накопления дозы облучения. Зададимся значениям общей летальной дозы для всех организмов равной 100 единицам и исследуем поведение модели при изменении воздействия дозы при поражении мишени в 10, 20 и 50 единиц. При этом принимаем вероятность поражения организма-мишени  $d_m$  равной 5 %.

Графики рис. 2 показывают уменьшение числа живых организмов по всей решетке и отдельно по выбранным зонам для разных значений воздействующей дозы. При невысокой дозе воздействия на организм наблюдается определенное



**Рис. 2. Графики уменьшения числа живых организмов по всей решетке (а, в, д) и выбранным зонам (б, г, е) для воздействующей дозы, ед.:**  
*а, б* – 10; *в, г* – 20; *д, е* – 50; *1* – нижняя; *2* – средняя; *3* – верхняя

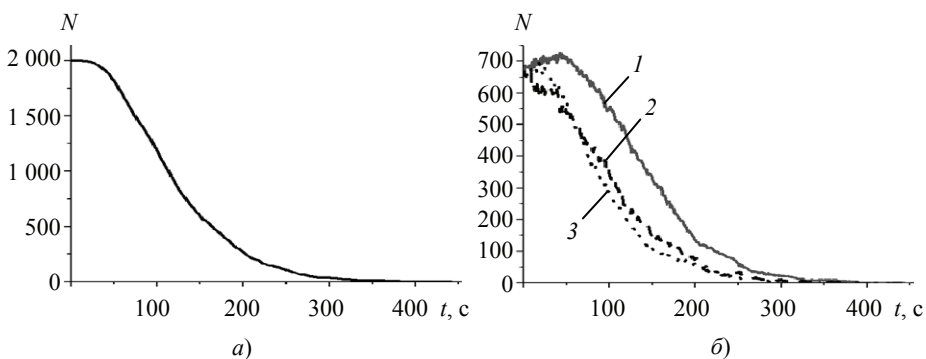
время невосприимчивости организмов на заданной решетке к воздействию облучения. При этом продолжительность времени невосприимчивости организмов к воздействию облучения зависит от той зоны, в которой на данный момент времени находится организм. В нижней зоне время восприимчивость к облучению ниже, в верхней – выше. В верхней зоне наблюдается практически полное отсутствие постоянства количества организмов в течение определенного промежутка времени (особенно при высоких значениях воздействующей дозы).

Особый интерес при анализе поведения предлагаемой модели вызывает возможность моделирования поведения организмов при одновременном варьировании вероятности поражения мишени, воспринимаемой дозы облучения и скорости перемещения организма.

Например, при низких дозах воздействия, невысокой вероятности поражения мишени и увеличении скорости движения организма должен наблюдаться эффект значительного отклонения количества организмов по зонам от среднего по выборке. Это связано с тем, что при увеличении скорости и уменьшении дозы определенное количество организмов переходит из зоны с более высокой вероятностью гибели в зоны с более низкой вероятностью гибели. На графиках это будет выражаться в одновременном определенном росте количества организмов в нижней зоне и одновременном резком уменьшении их числа в верхней.

На рисунке 3 представлено подтверждение данного эффекта при моделировании гибели микроорганизмов на решетке  $700 \times 300$  для скорости перемещения микроорганизма равной 20 клеток/ед. времени,  $d_m = 5\%$ , воспринимаемая доза при поражении мишени равна 25 ед. Начальное количество организмов на решетке 2 000. Особенностью кривых для такого случая является практически одинаковое количество организмов в средней и нижней зонах в течение времени воздействия излучения.

Таким образом, предложенная модель воздействия ультрафиолетового излучения на микроорганизмы, основанная на положениях клеточных автоматов, позволяет моделировать воздействие излучения различных свойств, менять и подбирать величины кумулятивного воздействия, определять вероятность поражения заданного организма в зависимости от его резистентности, учитывать оптические свойства среды, воздействие температуры и химических элементов, а также поведение микроорганизмов в зависимости от воздействия излучения и внешних факторов.



**Рис. 3. Графики уменьшения числа живых организмов по всей решетке (а) и выбранным зонам (б) для скорости 20 клеток/ед. времени,  $d_m = 5\%$ , воспринимаемая доза при поражении мишени 25 ед.:**  
1 – нижняя; 2 – средняя; 3 – верхняя

### Список литературы

1. Мейер, А. Ультрафиолетовое излучение / А. Мейер, Э. Зейтц. – М. : Наука, 1982. – 63 с.
2. Машанский, В. Ф. Действие ультрафиолетовой радиации на ультраструктуры клетки / В. Ф. Машанский, К. А. Самойлова // Цитология. – 1964. – № 6 (1). – С. 59 – 65.
3. Вихтерман, Р. В. Некоторые проблемы, связанные с исследованием биологического действия ионизирующей радиации на простейших / Р. В. Вихтерман // Успехи протозоологии. – 1969. – № 3. – С. 16 – 18.
4. Анализ свойств жидкой послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, И. Г. Елисеева, Е. А. Черных // Наука в центральной России. – 2013. – № 25. – С. 57 – 60.
5. Пахомов, А. Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 633 – 637.
6. Пахомов, А. Н. Алгоритм расчета кинетики испарения капли с диффузионно-непроницаемой подложки / А. Н. Пахомов, Е. А. Ильин // Вопросы соврем. науки и практики. – Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2 (46). – С. 292 – 296.

---

## Application of Cellular Automata in Modeling Ultraviolet Water Disinfection Process

A. N. Pakhomov, N. Ts. Gatapova, Yu. V. Pakhomova

*Department of Technological Processes, Apparatus and Technosphere Safety,  
panpost@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** bacteria; viruses; water; cellular automaton; cumulative dose; microorganisms; target; modeling; ultraviolet radiation.

**Abstract:** A model approach to the analysis of the susceptibility of a microorganism to UV radiation has been substantiated. Modeling of the kinetics of UV disinfection was carried out on the basis of the application of the theory of cellular automata, which makes it possible to determine the mechanism of death of a microorganism, as well as to develop recommendations for the modes of UV treatment of water. The results of modeling the kinetics of UV disinfection for the main mechanisms of the death of microorganisms are shown: the model of target damage, the cumulative model and their combination, with varying the main influencing parameters.

### References

1. Meyyer A., Zeytts E. *Ul'trafiioletovoye izlucheniye* [Ultraviolet radiation], Moscow: Nauka, 1982, 63 p. (In Russ.)
2. Mashanskiy V.F., Samoylova K.A. [The effect of ultraviolet radiation on the ultrastructure of the cell], *Tsitologiya* [Tsitologiya], 1964, no. 6 (1), pp. 59-65. (In Russ.)
3. Vikhterman R.V. [Some problems associated with the study of the biological effect of ionizing radiation on protozoa], *Uspekhi protozoologii* [Advances in protozoology], 1969, no. 3, pp. 16-18. (In Russ.)

4. Pakhomov A.N., Banin R.Yu., Yeliseyeva I.G., Chernykh Ye.A. [Analysis of the properties of liquid post-alcohol stillage], *Nauka v tsestral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2013, no. 25, pp. 57-60. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V., Il'in Ye.A. [Possibilities of self-organization of dispersed systems during drying on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 633-637. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Pakhomov A.N., Il'in Ye.A. [Algorithm for calculating the kinetics of evaporation of a drop from a diffusion-impermeable substrate], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2013, no. 2 (46), pp. 292-296. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Anwendung zellulärer Automaten bei der Modellierung des UV-Wasser-Desinfektionsprozesses**

**Zusammenfassung:** Es ist ein modellhafter Ansatz zur Analyse der Empfindlichkeit des Mikroorganismus gegenüber UV-Strahlung begründet. Die Modellierung der Kinetik der UV-Dekontamination ist auf der Grundlage der Anwendung der Theorie der zellulären Automaten durchgeführt, die es ermöglicht, den Mechanismus des Todes eines Mikroorganismus zu bestimmen sowie Empfehlungen für die UV-Behandlungsmodi von Wasser zu entwickeln. Die Ergebnisse der Modellierung der Kinetik der UV-Desinfektion für die Hauptmechanismen des Absterbens von Mikroorganismen sind gezeigt: das Modell der Zielschädigung, das kumulative Modell und deren Kombination bei der Variation der Haupteinflussparameter.

---

### **Application des automates cellulaires dans la modélisation du processus de la désinfection UV de l'eau**

**Résumé:** Est justifiée une approche modèle pour l'analyse de la susceptibilité d'un microorganisme à l'exposition aux UV. Est réalisée une modélisation de la cinétique de la désinfection UV basée sur l'application de la théorie des automates cellulaires, permettant de déterminer le mécanisme de la perte du microorganisme et d'élaborer des recommandations sur les modes du traitement UV de l'eau. Sont présentés les résultats du modèle de la cinétique de la décontamination UV pour les principaux mécanismes de mort des microorganismes: modèle de destruction de la cible, modèle cumulatif et leur combinaison tout en faisant varier les principaux paramètres de l'influence.

---

**Авторы:** *Пахомов Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пахомова Юлия Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.