

УДК 677.014.233

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД  
ЛЬНЯНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Н.Т. Джумагулова, В.И. Сметанин*

Методами фрактального анализа показана эффективность биологических способов очистки бытовых сточных вод. Проведен сравнительный анализ сточных вод льняного производства и бытовых сточных вод. Дана оценка применимости методов биологической очистки сточных вод льняного производства. Разработаны предложения по созданию комплекса управляемой биологической очистки сточных вод.

*Ключевые слова:* льняное производство; сточные воды; биологическая очистка; биоценоз; фрактальная размерность; фрактальный портрет; автоматизация; обратная связь.

---

**ЗЫГЫР ӨНДҮРҮШҮНДӨ АГЫНДЫ СУУЛАРДЫ ТАЗАЛООНУН  
БИОЛОГИЯЛЫК ЫКМАЛАРЫНЫН НАТЫЙЖАЛУУЛУГУ**

*Н.Т. Джумагулова, В.И. Сметанин*

Макалада фракталдык талдоо жүргүзүү методдору менен турмуш-тиричилик агынды сууларын тазалоонун биологиялык ыкмаларынын натыйжалуулугу көрсөтүлдү. Зыгыр өндүрүшүнүн агынды суулары менен турмуш-тиричилик агынды сууларына салыштырма талдоо жүргүзүлдү. Зыгыр өндүрүшүнүн агынды сууларын биологиялык тазалоо методдорун колдонууга баа берилди. Агынды сууларды биологиялык тазалоонун башкарылуучу комплексин түзүү боюнча сунуштар иштелип чыкты.

*Түйүндүү сөздөр:* зыгыр өндүрүшү; агынды суулар; биологиялык тазалоо; биоценоз; фракталдык өлчөм; фракталдык портрет; автоматташтыруу; кайтарым байланыш.

---

**THE EFFICIENCY OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT  
OF FLAX PRODUCTION**

*N.T. Dzhumagulova, V.I. Smetanin*

In the article the methods of fractal analysis shows the effectiveness of the biological methods for the treatment of domestic wastewater. Comparative analysis of wastewater of flax production and domestic wastewater. The estimation of the applicable activity methods of biological treatment for wastewater of flax production. Proposals for the creation of a complex controlled biological treatment of wastewater.

*Keywords:* flax production, waste water; biological treatment; biocenosis; fractal dimension; fractal portrait; automation; feedback.

**Введение.** Предприятия текстильной промышленности разделяются по выпуску продукции ткачества из волокон определенного происхождения.

В составе предприятий имеются прядильные, крутильные, ткацкие и красильно-отделочные производства. Каждое производство является либо самостоятельным предприятием, либо составной частью комбината, включающего несколько производств.

Особенность технологии льняного производства состоит в наличии подготовительного этапа, заключающегося в предварительном замачивании и «трепании» льняного сырья.

Технологические воды, оставшиеся после замачивания льна, содержат широкий спектр загрязняющих веществ, представленный в основном соединениями азота. Тяжелые металлы в составе вод, как правило, отсутствуют. Сточные воды с такими типами загрязнений хорошо очищаются биологическими методами.

Химические реагенты (карбонаты, бикарбонаты, щелочи и т. п.), прибавляемые для связывания органических кислот, образующихся при замачивании льна и обработке раствором серной кислоты, которая ускоряет этот процесс и уничтожает неприятный запах, оказались на практике непригодными [1].

Свою долю загрязненных сточных вод дают и стадии отбеливания и окрашивания льняного полотна. В данном случае спектр загрязнений гораздо более разнообразен. Присутствуют соединения хлора, азота, фосфаты, сульфиды и синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ). На сегодня одним из наиболее эффективных и недорогих способов очистки сточных вод является их биологическая очистка [2].

Способ биологической очистки заключается в том, что окисление, расщепление и последующее удаление органических и неорганических загрязнений сточных вод является результатом процесса жизнедеятельности биоценоза. Отходами данного метода очистки является активный ил, использование которого после обработки возможно в качестве наполнителя при ландшафтных и мелиоративных работах [3].

Основной проблемой биологического метода очистки является сложность динамического управления процессом очистки и составом применяемого биоценоза. Для оценки качества биологической очистки возможно применение методов мультифрактального анализа, которые позволяют с высокой степенью чувствительности судить о характере изучаемых процессов, степени достижения оптимальных показателей и их устойчивости [4].

**Актуальность.** Одним из новых направлений изучения сложных динамических систем является фрактальный анализ, в рамках которого создан метод мультифрактальной динамики. Многие динамические процессы хорошо моделируются фрактальными кривыми. Для прогнозирования динамики таких процессов хорошие результаты дает использование фрактальных динамических характеристик и основной из них – фрактальной размерности [5]. По своей сути фрактальная размерность представляет собой дробную величину и описывает сложность и степень самоподобия кривой или поверхности. Кроме геометрических объектов методами фрактального анализа могут моделироваться и временные кривые различных параметров динамических процессов [5].

**Материалы.** Имеются опубликованные работы, к которых обосновывается использование пороговых значений фрактальных характеристик для описания течения динамических процессов [5]. Были выделены три пороговых показателя, при достижении которых характер процесса меняется. Для динамических процессов различной природы значения могут несколько различаться, но в большинстве случаев они достаточно близки. Низшее пороговое значение  $D_a = 1,2$  свидетельствует о вялотекущих или отсутствующих процессах взаимодействия по исследуемому компоненту. Среда очень слабо реагирует на присутствие компонента, динамика показателей по которому анализируется. При фрактальной размерности в районе  $1,4 (D_o)$  система находится в равновесном состоянии, идет активное, устойчивое взаимодействие. При приближении фрактальной размерности  $D$  к критическому значению  $1,7 (D_k)$ , ситуация по компоненту становится неустойчивой, равновесие нарушается, и система может испытывать катастрофические изменения, т. е. значение величины за короткий промежуток времени по сравнению с временем наблюдения может измениться в несколько раз, на чем и основано применение колебаний фрактальной размерности временного ряда в качестве «флага» катастрофы. Поиск лимитирующих состояний и состояния, наиболее благоприятного для существования биологических систем, можно провести, связав эти состояния с описанными выше фрактальными показателями.

Более удобной формой выражения фрактальной размерности является нормированная фрактальная размерность (фрактальная температура) [5]. Подобно тому, как обычная температура характеризует

меру нагретости тела, так и фрактальная “температура” характеризует интенсивность протекающего процесса.

Фрактальная “температура” выражается из фрактальной размерности по формуле [5]:

$$T_c = \left( \frac{1}{2-D} - 1 \right). \quad (1)$$

Фрактальная “температура” базируется на фрактальной размерности временного процесса, которая, в свою очередь, говорит о характере процессов, идущих в системе, и является показателем характера процессов взаимодействия системы с окружающей средой [4]. Фрактальная “температура” выступает как показатель активности процессов обменных взаимодействий с внешней средой и развитости структуры (стоков) перераспределения материальных и энергетических потоков внутри системы.

Временные ряды данных анализировали при помощи специальной программы, которая определяла их фрактальную размерность. Полученные результаты для большей наглядности могут быть представлены в виде лепестковой диаграммы на рисунке 1. Такая диаграмма позволит свести в едином метрическом пространстве – пространстве фрактальных параметров данные о характере течения разнородных процессов. Соединяя вершины лепестковой диаграммы, мы получаем геометрическую фигуру, позволяющую визуально судить о динамике комплекса процессов во времени, возникает фазовый портрет системы в целом во фрактальном фазовом пространстве. На диаграмме в виде кругов отмечаются пороговые значения фрактальных системах температур  $T_d$ ,  $T_o$ ,  $T_k$ , приближение к которым говорит о качественном изменении характера анализируемого процесса. Выход за пределы критических величин фрактальных параметров по нескольким компонентам говорит об общем критическом состоянии системы. Наоборот, сжатие мультифрактального фазового портрета означает общий спад интенсивности процессов системы и ослабление устойчивости системы в целом.

**Методы исследования.** Методы фрактального анализа позволяют оценить степень угнетения или развития отдельных видов микроорганизмов, составляющих биоценоз, применяемый для биологической очистки. На основании результатов построены фазовые портреты и проведен их анализ.

На рисунке 1 приведен мультифрактальный фазовый портрет характера динамик содержания в биоценозе, применяемом для биологической очистки микроорганизмов различных видов. Фрактальная размерность биохимических показателей повышена для инфузорий, особенно для *Zoothamnium sp.*, что говорит о высокой биологической активности данных видов бактерий, благоприятных для них температурных условиях и возможности активного размножения при достаточном питании. Виды амёб показывают среднюю активность, находясь в равновесном состоянии при текущих условиях. Некоторые виды бактерий и простейших организмов, такие как нитчатые бактерии, активности не проявляют, видимо, находясь в угнетенном состоянии.

Аналогичным образом проведем анализ динамик физико-химических показателей воды, поступающей на очистку, результаты которого представлены на рисунке 2. Фазовый портрет имеет достаточно неправильную, вытянутую форму. Особенно напряженной является картина по таким показателям, как нефтепродукты, азот общий и примеси.

Проанализировав комплекс гидрохимических показателей сточных вод после осветления (рисунок 3), можно сделать вывод о том, что в процессе осветления воды эффективно удаляются механические примеси и практически не оказывается воздействия на растворенные примеси. Характер динамики примесей остался практически тем же, что для поступающей воды.

Химический состав очищенной воды в сравнении с осветленной характеризуется более низкими значениями фрактальной размерности по динамикам всех показателей, и более сбалансированным фазовым портретом с некоторым превышением хаотичности по азоту в форме аммонийных солей. Остальные параметры находятся либо в зоне устойчивости, либо в зоне саморегуляции.

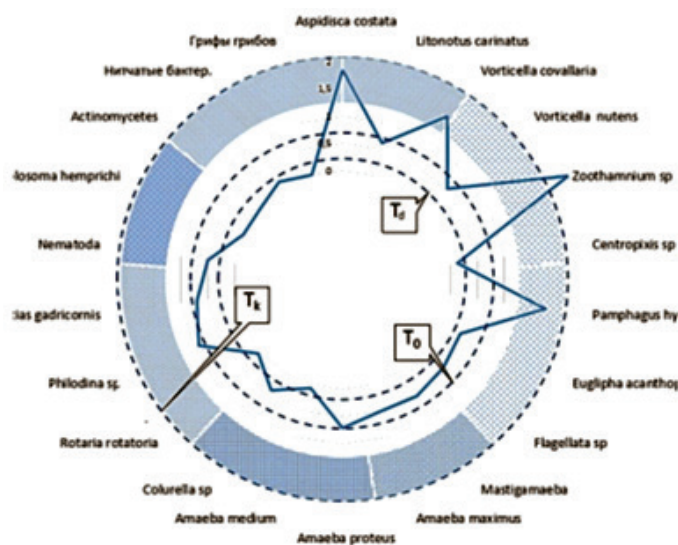


Рисунок 1 – Мультифрактальный фазовый портрет динамик содержания в биоценозе биоочистки микроорганизмов различных видов. Виды микроорганизмов выделены штриховкой



Рисунок 2 – Мультифрактальный фазовый портрет динамик физико-химических показателей сточных вод, поступающих для очистки

Таким образом, можно сделать вывод об эффективности и устойчивости процесса биологической очистки сточных вод (рисунок 4).

Одной из основных технологических стадий переработки льна является получение тресты из льносоломы. Известно несколько способов приготовления тресты – биологический, физико-химический, химический. Основные биологические способы приготовления тресты – расстил льносоломы на стлищах и тепловая мочка. Эти способы основаны на жизнедеятельности микроорганизмов, которые своими ферментами разлагают пектиновые вещества и освобождают волокно от окружающих его тканей. При химическом методе освобождение волокон достигается при помощи обработки льносоломы химическими реагентами. Но для каждого способа первичной переработки льна большой проблемой являются сточные воды, которые по весу составляют 65–75 % от веса исходного сырья. При больших

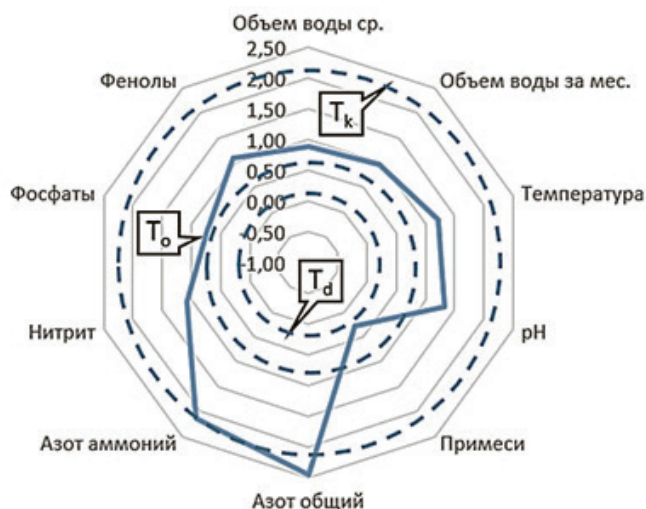


Рисунок 3 – Мультифрактальный фазовый портрет динамик физико-химических показателей сточных вод после осветления



Рисунок 4 – Мультифрактальный фазовый портрет динамик физико-химических показателей сточных вод после биологической очистки

объемах производства льноволокна мы будем иметь и существенные объемы сточных вод. Что означает важность выбора наиболее рентабельного и экологичного метода их очистки.

Основным ограничением в применении биологической очистки для сточных вод производств текстильной промышленности являются высокие концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) в обрабатываемых водах. При концентрации этих веществ свыше 20 мг/л наблюдаются процессы пенообразования в аэротенках и ухудшение эффективности очистки. При дальнейшем повышении концентрации ПАВ происходит гибель отдельных видов микроорганизмов, составляющих биоценоз [6]. Характеристики и концентрации загрязнений в бытовых сточных водах и сточных водах текстильных производств [7] представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики и концентрации загрязнений в бытовых сточных водах и сточных водах текстильных производств

Показатель	Сточные воды производства хлопчатобумажных тканей	Сточные воды льняного производства	Бытовые сточные воды
Прозрачность, см	0,1...1,0	1,5...3,5	1...3
pH	9...10	7...8	6,5...8,5
Взвешенные вещества, мг/л	200...260	200...450	700...1230
Плотный остаток, мг/л	600...2400	400...600	10...800
Окисляемость, мг/л	180	170	200...700
БПК <sub>20</sub> мгО <sub>2</sub> /л	300...400	200...260	10...300
ПАВ, мг/л	60...80	20...25	20...30
Азот аммонийный, мг/л	10...12	8...12	5...50
Хлориды, мг/л	90...120	65...85	70...200
Сульфаты, мг/л	500...600	60...90	18...100

Сравнивая данные, приведенные в таблице 1, можно сделать вывод, что по всем категориям параметров и загрязнений сточные воды льняного производства и бытовые сточные воды достаточно близки. Наиболее критическим компонентом загрязнений для биологической очистки является концентрация поверхностно-активных веществ (ПАВ) [7]. Она повышена для производств по переработке хлопка, но для сточных вод льняного производства диапазон концентраций ПАВ не превышает диапазон концентраций в бытовых стоках, что определяет применимость методов биологической очистки.

Отдельного рассмотрения требует проблема очистки сточных вод красильных производств, на которых применяются отдельные виды красителей и специальные технологии обработки тканей, дающие специфические виды загрязнений.

Таким образом, одной из основных проблем организации биологической очистки сточных вод является сложность управления процессом. Биоценоз по видам в средах разного состава развивается неравномерно. Сложно определить оптимальные количества как подаваемого в аэротенки биоценоза, так и удаляемого для переработки и утилизации активного ила. Решение этих задач возможно через систему автоматического управления (САУ) с детекторами и регулируемыми механизмами [8]. Механизм принятия управляющих решений САУ может быть построен на анализе фрактальных показателей основных биохимических параметров, снимаемых датчиками в реальном масштабе времени [9].

**Выводы.** Рассмотрены особенности биологического метода очистки сточных вод. Методами фрактального анализа определена эффективность биологической очистки. В качестве показателя эффективности и устойчивости процесса очистки использовались фрактальные параметры. Произведено сравнение по составу сточных вод льняных производств, хлопчатобумажных производств и бытовых сточных вод. Обоснована применимость биологической очистки для сточных вод льняных производств. Для достижения устойчивости процесса очистки сточных вод и обеспечения его высокой эффективности предложена концепция системы автоматического управления очисткой сточных вод льняных производств.

#### Литература

1. Егорова Т.А. Основы биотехнологии / Т.А. Егорова, С.М. Клунова, Е.А. Живухина. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 385 с.
2. Яковлев С.И. Водоотведение и очистка сточных вод / С.И. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.Н. Калищун. М.: Стройиздат, 2006. 510 с.
3. Харьковина О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О.В. Харьковина. Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
4. Kozlov D.V. Multifractal principles of aquatic ecosystem development control by algacenos correction / D.V. Kozlov, A.N. Nasonov, I.M. Zhogin, I.V. Tsvetkov // Water Resources. 2017. Т. 44. № 2. С. 259–266.

5. *Tsvetkov V.P.* Analysis of a piecewise linear trend of average surface temperature in the mathematical model of multifractal dynamics / V.P. Tsvetkov, I.V. Tsvetkov // Russian Journal of Earth Sciences. 2015. Т. 15. № 2. С. 1–5.
6. *Мелько А.А.* Утилизация отходов очистных сооружений биологическим методом / А.А. Мелько // Успехи современного естествознания. 2008. № 1. С. 95.
7. *Алексеев Е.В.* Физико-химическая очистка сточных вод / Е.В. Алексеев. М.: Изд-во ассоциации строительных вузов (АСВ), 2006. 256 с.
8. *Федоренко В.Ф.* Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе / В.Ф. Федоренко, М.Н. Ерохин, В.И. Балабанов, Д.С. Буклагин, И.Г. Голубев, С.А. Ищенко. М.: Научное изд. ФГНУ «Росинформагротех», 2011. 310 с.
9. *Балабанов В.И.* Разработка агротехнологического роботизированного комплекса / В.И. Балабанов, Д.М. Димитров, И.Х. Сабиров // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 1 (22). С. 17–22.