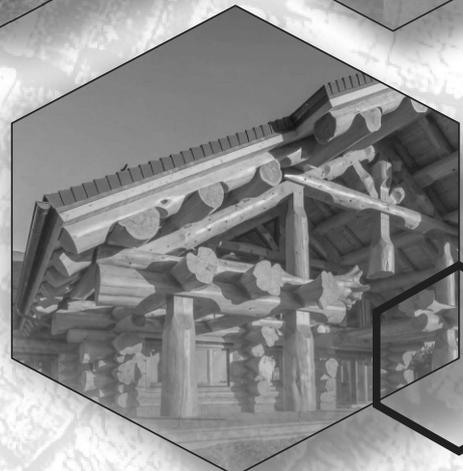
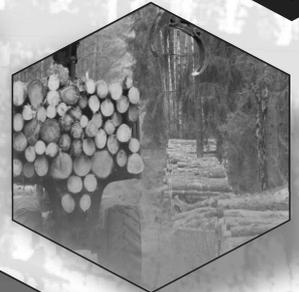
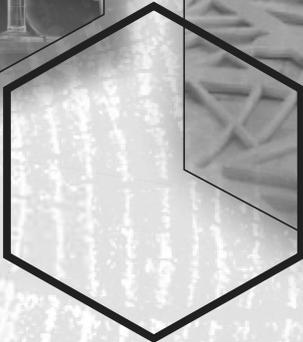
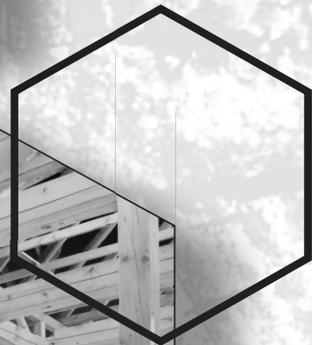


# Дерево

ISSN 0011-9008

1/2022

## обрабатывающая промышленность



# ДЕРЕВО

ISSN 0011-9008

## обработывающая ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

1/2022

Учредитель: Редакция журнала  
«Деревообрабатывающая промышленность»  
Основан в апреле 1952 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группе научных специальностей 05.21.00 – Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревопереработки и химической переработки биомассы дерева.

### Редакционная коллегия:



Главный редактор  
**Сафин Руслан Рушанович**  
д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Торопов Александр Степанович**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

**Царев Евгений Михайлович**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

**Черных Михаил Михайлович**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. Калашникова»



Зам. главного редактора  
**Разумов Евгений Юрьевич**  
д.т.н., профессор

Czech University of Life Sciences Prague,  
Faculty of Forestry and Wood Sciences,  
Czech Republik



Зам. главного редактора  
ответственный за  
международную ред. коллегию  
**Štefan Barčík**, Prof. ing., Ph.D.

Technical university in Zvolen,  
Faculty of environmental and  
manufacturing technology,  
Slovakia

**Сафин Рушан Гареевич**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Башикиров Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Хасанишин Руслан Ромелевич**, д.т.н., доцент  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Гаспарян Гарик Давидович**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»

**Григорьев Игорь Владиславович**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»

**Мазуркин Петр Матвеевич**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

**Романов Евгений Михайлович**, д.с.-х.н., профессор  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

**Рыкунин Станислав Николаевич**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

**Семенов Юрий Павлович**, д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

**Dr. prof. Vlado Goglia**  
University of Zagreb, Croatia

**Dr. prof. Ruzica Beljo Lucic**  
University of Zagreb, Croatia

**Dr. prof. Nencho Delijiski**  
University of Forestry, Bulgaria

**Dr. prof. Ladislav Dzurenda**  
Technical University, Slovakia

**Dr. prof. Etele Csanady**  
University of West Hungary

**Dr. prof. Alfred Teischinger**  
BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences,  
Austria

**Marian Babiak, PhD, Dr.h.c.prof.RNDR.**  
Czech University of Life Sciences Prague,  
Czech Republic

**Dr. PhD Monica Sarvasova Kvietkova**  
Czech University of Life Sciences Prague,  
Czech Republic

Адрес редакции:  
117303, Москва, ул. Малая  
Юшуньская, д. 1, корп. 1,

journal\_woodworking@mail.ru  
www.dop1952.ru

© «Редакция журнала  
«Деревообрабатывающая  
промышленность», 2022

Свидетельство о регистрации  
СМИ в Роскомпечати № 014990  
Формат бумаги 60x88/8  
Тираж 720 экз.

## СОДЕРЖАНИЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

### *Лесоинженерное дело*

***Ахтямов Э.Р., Кручинин И.Н., Побединский В.В., Кручинина Е.И., Чижов А.А.***

Разработка требований к применению добавок из вспученного вермикулита для строительства лесовозных дорог на территориях северного, приполярного и полярного урала 3

***Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М., Бурмистрова Д.Д., Ченушкина С.В., Данилов В.В.***

Разработка методов повышения транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных автомобильных дорог, работающих в сложных природно-климатических условиях 10

***Жалко М.Е.***

Повышение морозоустойчивости дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог 18

### *Физико-механические процессы в деревообработке*

***Лукаш А.А., Глотова Т.И., Малышева Н.П., Путрова Н.П., Чернышев О.Н.***

Экспресс-метод определения себестоимости продукции при расчете технико-экономических показателей деревообрабатывающих цехов 24

***Разумов Е.Ю., Байгильдеева Е.И., Сафина А.В., Сафин Р.Г.***

Получение бетулина высокой степени очистки 33

***Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Хабибуллина А.Р., Байгильдеева Е.И.***

Физико-механические характеристики композиционных материалов из древесины березы, гидролизованной в присутствии перекиси водорода 41

***Лукаш А.А., Глотова Т.И., Романов В.А., Феллук А., Чернышев О.Н.***

Определение прочности склеивания при нормальном отрыве для разработки новых клеевых составов 55

***Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Зиатдинова Д.Ф., Гурьянов Д.А.***

Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений 62

***Артёмов А.В., Ершова А.С., Бурындин В.Г., Савиновских А.В.***

Изучение изменений прочностных показателей пластиков без связующего по потере массы при биоразложении 71

***Сафина А.В., Абдуллина Д.Р., Зиатдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Валеев К.В.***

Моделирование процесса извлечения бетулина из бересты березы 80

### *Химическая технология древесины*

***Строганова М.С., Жильникова Н.А.***

Методика оценки самоочищающей способности водоема при влиянии стоков сульфат-целлюлозного производства 90

***Чирков Д.Д., Захаров П.С., Шкуро А.Е., Ершова А.С.***

Термомеханическая активация наполнителей для древесно-минеральных полимерных композиционных материалов 103

## Химическая технология древесины

УДК 676+504.064.2.001.18

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ САМООЧИЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВОДОЕМА ПРИ ВЛИЯНИИ СТОКОВ СУЛЬФАТ - ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.С. Строганова, Н.А. Жильникова

*В работе предложена трехкомпонентная модель биохимического окисления органического вещества, описывающая формирование качества воды участка водного бассейна и учитывающая не только специфичные показатели для стоков конкретного производства, но и наличие, а также видовой состав микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических веществ. Данная модель основана на уже существующей бимолекулярной модели биохимического окисления Шишкина А.И. С целью совершенствования данного подхода в математическую модель введен коэффициент учета микроорганизмов, отражающий скорость окисления органического вещества. Для расчета коэффициента учета микроорганизмов предложен алгоритм идентификации параметров модели биохимического окисления органических веществ. Представлены результаты исследований сточных вод сульфат-целлюлозного производства по сезонам и показателям растворенного кислорода, численности микроорганизмов и органических соединений, специфичных для данного типа стоков. Дан прогноз и сделана оценка качества природной воды озера в месте начального и основного разбавления сточных вод с использованием методов математического моделирования процессов биохимического окисления органического вещества. На основе разработанной модели сформирована методика оценки самоочищающей способности водоема, которая позволяет оценить допустимый уровень сброса загрязняющих веществ в водоем и сократить платежи за негативное воздействие сточных вод сульфат-целлюлозного предприятия на водный объект на 25-99% в зависимости от природы вещества и от сезона года. В качестве примера рассмотрены специфические вещества, которые контролируются в месте выпуска сточных вод сульфат-целлюлозного предприятия и в контрольном створе водного объекта – БПК<sub>полн</sub>, метанол и лигнин сульфатный. Предложенные в работе модель и методика позволяют увеличить норматив сброса загрязняющих веществ в соответствии с реальной способностью водоема к самоочищению, а также снизить годовое значение платы за негативное воздействие на окружающую среду для показателей, отражающих органические вещества, за счет уменьшения платежей за сверхнормативный сброс.*

**Ключевые слова:** *трехкомпонентная модель биохимического окисления органического вещества, методика оценки самоочищающей способности водоема, сульфат-целлюлозное предприятие, сточные воды сульфат-целлюлозного производства.*

#### Введение

Задачи оценки и прогноза качества воды в зонах влияния промышленных предприятий в городах-центрах нашей страны с каждым годом все больше набирают актуальность. Согласно Федеральному проекту «Сохранение уникальных водных объектов», который является частью Национального проекта «Экология», на данный момент следует уделить внимание сохранению уникальных водных объектов за счет восстановления и экологической реабилитации, очистки берегов и прибрежной акватории озер и рек, в том числе озера Байкал, Ладожского и Онежского озер, на берегах которых располагаются крупные градообразующие предприятия. Некоторые из этих предприятий относятся к отрасли целлюлозно-бумажной промышленности и являются объектами I категории негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) согласно Постановлению Правительства РФ N 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий от 31 декабря 2020 г.» [1]. В связи с изменением природоохранного законодательства, для таких предприятий разрабатывается комплексное экологическое разрешение, которое включает в себя экологические нормативы в области охраны атмосферного воздуха, водных объектов, обращения с отходами, а также закрепляет принципы технологического нормирования на

основе наилучших доступных технологий (НДТ) и выдается, на основании заявки, подаваемой в уполномоченный Правительством Российской Федерации федеральный орган исполнительной власти.

Целью работы является разработка трехкомпонентной модели биохимического окисления и методики оценки самоочищающей способности водоема для обоснования сброса очищенных сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Для достижения данной цели решались следующие задачи - формирование трехкомпонентной модели биохимического окисления сточных вод сульфат-целлюлозного производства на основе экспериментальных данных сведением коэффициента учета деятельности микроорганизмов в процессах биохимического окисления органических веществ и методики оценки самоочищающей способности водоема для согласования экологических нормативов и технологических показателей производства.

### Методы исследования

В работе использовались методы химического и биологического лабораторного анализа компонентов сточных и природных вод, математическое моделирование с использованием программы MathCad 15.

Для определения концентрации растворенного кислорода, требуемого на окисление легкоокисляемого органического вещества в пробе с пересчетом в БПК, использовался стандартизированный метод йодометрического титрования согласно методике ПНД Ф 14.1.2:3:4.123-97. Для оценки процесса нитрификации параллельно проводились лабораторные исследования на содержание нитрит-ионов по методике ПНДФ14.1:2:43-95. Лигнин сульфатный определялся фотометрическим методом согласно ПНД Ф 14.1:2.216-06.

Определение количества клеток микроорганизмов проводилось по методу Коха путем посева на питательную среду для мезофильных аэробных микроорганизмов и факультативных анаэробов. Основная часть микроорганизмов (82%), обнаруженных в ходе исследований в зоне влияния сточных вод, относится к палочковидным формам, большая часть которых попадает в природные воды вместе со сточными из системы биологической очистки. Оставшаяся часть микроорганизмов относится к сапрофитам, населяющим водоем, и составляет 18%, которые питаются продуктами распада органических веществ. Результаты количественного определения микроорганизмов, проведенного по методу Коха, выражают в колониеобразующих единицах (КОЕ) в 1 см<sup>3</sup> исследуемого субстрата.

Расчет коэффициента учета микроорганизмов осуществлялся с помощью численного моделирования на основе программы MathCad 15.

### Основная часть исследования

На первом этапе рассмотрены подходы исследователей в области идентификации параметров модели биохимического окисления сточных вод различной степени очистки – Streeter H.W., Phelps E.B. (1925), Базякина Н.А. (1948), Терио Э.Д. (1937), Thomas R. Camp (1963), Шишкин А.И. (1989), Готовцев А.В. (2010) [2-6]. Следует отметить, что все подходы основаны на определении констант биохимического окисления эмпирическим или лабораторным методами.

Предложенный подход по идентификации параметров модели биохимического окисления сточных вод, который учитывает не только концентрацию органического вещества, выраженную в биохимическом потреблении кислорода (БПК) и растворенного кислорода, но и концентрацию микроорганизмов, участвующих в процессе биохимического окисления:

$$\frac{dC_{OB}}{dt} = -kC_{OB}^m C_{O_2}^n C_B^p, \quad (1)$$

где  $k$  – константа биохимического окисления органических соединений;  $C_{OB}$  - концентрация органических загрязнений по БПК, мг/дм<sup>3</sup>,  $C_{O_2}$  - концентрация растворенного кислорода мг/л,  $C_B$  – концентрация микроорганизмов или количество микроорганизмов, содержащихся в 1 дм<sup>3</sup> воды, участвующих в процессе окисления;  $m$ ,  $n$ ,  $p$  — константы соответственно для показателя БПК, растворенного кислорода и концентрации микроорганизмов, специфичные для данного типа сточных вод, определяются эмпирическим путем по данным лабораторных и натуральных исследований.

О росте микроорганизмов в естественных субстратах или в питательных средах судят по изменению количества их клеток или биомассы в единице объема. Методы определения этих показателей могут быть

прямыми (подсчет клеток под микроскопом, взвешивание) или косвенными. Косвенные методы основаны на измерении параметров, величина которых зависит от количества или биомассы микроорганизмов. Выбор метода зависит от целей исследования, свойств питательной среды или субстрата, а также особенностей роста и морфологии микроорганизмов.

Для расчета кислородного режима водоемов, а также для определения динамики изменения количества растворенной в воде органики используются мономолекулярная и бимолекулярная модели [3].

При большом дефиците кислорода и в условиях анаэробного режима кривая кислородного прогиба, построенная по уравнениям Стритера-Фелпса дает неправдоподобную картину – отрицательное значение растворенного кислорода в воде.

Профессором Шишкиным А.И. предложена схема процесса, в основе которой лежит положение о том, что скорость изменения БПК пропорциональна не только значению БПК, но и концентрации растворенного кислорода. В данном случае исследовалась применимость моно- или бимолекулярной модели для конкретного типа стоков с разной степенью очистки – очищенные или неочищенные. При этом, мономолекулярная модель записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_{\text{БПК}}}{dt} = -k_1 \cdot C_{\text{БПК}}^0 \\ \frac{dC_{\text{O}_2}}{dt} = -k_1 \cdot C_{\text{БПК}}^0 + k_2 \cdot (C_{\text{O}_2\text{пр}} - C_{\text{O}_2}) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{БПК}}$  – концентрация органического углерода по БПК, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{O}_2}$  – концентрация растворенного в воде кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{O}_2\text{пр}}$  – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре, мг/дм<sup>3</sup>;  $k_1$  – коэффициент биохимического окисления (минерализации), сут<sup>-1</sup>;  $k_2$  – коэффициент реэрации (обогащение кислородом), сут<sup>-1</sup>;  $t$  – время, сут.

Бимолекулярная модель записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_{\text{БПК}}}{dt} = -\alpha \cdot C_{\text{БПК}} \cdot C_{\text{O}_2} \\ \frac{dC_{\text{O}_2}}{dt} = -\alpha \cdot C_{\text{БПК}} \cdot C_{\text{O}_2} + \beta \cdot (C_{\text{O}_2\text{пр}} - C_{\text{O}_2}) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент биохимического окисления для бимолекулярной модели,  $\beta$  – коэффициент реэрации по бимолекулярной модели.

Процесс описывается системой уравнений Фелпса-Стритера. Система имеет ограниченный диапазон применимости: при больших дефицитах кислорода в условиях анаэробного режима кривая кислородного прогиба, построенная по уравнениям Фелпса-Стритера дает количественно неправдоподобную картину – отрицательное значение величины концентрации кислорода в воде, чего быть не может. Отсюда следует, что при такой концентрации БПК применять мономолекулярную модель нельзя. В этом случае можно использовать бимолекулярную или новую трехкомпонентную модель [3].

Кислородный режим оказывает большое влияние на процессы самоочищения, то есть окисление органических примесей и жизнедеятельность гидробионтов – организмов, населяющих водоем.

Основными факторами, зависящими от концентрации растворенного кислорода и влияющими на кислородный режим, являются температурный режим, гидрологический режим, уровень рН, легкоокисляемые и трудноокисляемые органические вещества, биогенные элементы и их производные, а также видовое разнообразие фито- и зоопланктона, донные отложения, сапробность водного объекта.

Обосновано применение взаимодополняемых интегральных параметров сточных вод сульфат-целлюлозного предприятия для внутрипроизводственного эколого-аналитического контроля и нормирования [7]. На основе литературы по теме работы и нормативных документов, в том числе ИТС 1 НДТ «Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона» [8-9], выбраны репрезентативные показатели качества сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности – БПК<sub>полн</sub>, метанол лигнин

вод до контрольного створа в водоеме с учетом всех специфических показателей. Основным показателем окисления вещества является скорость его биохимического окисления.

Расчет скорости константы биохимического потребления кислорода осуществляется по общей формуле [10]:

$$k_1 = \frac{1}{t} \lg \left( \frac{C_t}{C_{2t} - C_t} \right) \quad (4)$$

где  $C_{2t}$ ,  $C_t$  – соответственно потребление кислорода по экспериментальным данным за время  $2t$  и  $t$ .

Сложность применения бимолекулярной модели заключается в отсутствии данных по значениям коэффициента  $\alpha$ . Для его определения в области применения мономолекулярной модели находится решение задачи в графическом виде. Оно единственно правильно, поэтому графический вид решения задачи по бимолекулярной модели совпадает с ним.

Растворенное и взвешенное органическое вещество природных вод является основным регулятором метаболизма водных экосистем. Общий органический углерод, из которого состоят органические соединения, по способности к биоокислению подразделяется на лабильный (который подвергается биохимическому окислению) и консервативный (водное гуминовое вещество - высокомолекулярный комплекс, помимо углерода состоящий из биогенных веществ и металлов, содержащихся в озере). Лабильная фракция озерного органического вещества значительно меньше консервативной, которая непрерывно находится в экосистемном круговороте веществ, то есть биологически доступная часть органического вещества, выраженная в показателе БПК<sub>полн</sub> [11].

Тримолекулярные реакции можно рассматривать, как сложный процесс состоящих их двух бимолекулярных стадий. На первой стадии из двух частиц образуется промежуточная, которая реагирует с третьей молекулой и образуется продукт, в данном случае продуктом будет являться углекислый газ и вода:



Предложенная трехкомпонентная модель биохимического окисления органических веществ под воздействием растворенного в воде кислорода и микроорганизмов основана на бимолекулярной модели и записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_{OB}}{dt} = -\alpha \cdot C_{OB} \cdot C_{O_2} \cdot C_B \cdot n \\ \frac{dC_{O_2}}{dt} = -\alpha \cdot C_{OB} \cdot C_{O_2} \cdot C_B \cdot n + \beta \cdot (C_{O_2np} - C_{O_2}), \\ \frac{dC_B}{dt} = -\alpha \cdot C_{OB} \cdot C_{O_2} \cdot C_B \cdot n + \beta \cdot (C_{O_2np} - C_{O_2}) - \gamma \cdot C_B \end{cases} \quad (6)$$

где  $C_{OB}$  – концентрация органического вещества, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{O_2}$  – концентрация растворенного в воде кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_B$  – концентрация микроорганизмов, участвующих в процессе биохимического окисления, мг/дм<sup>3</sup>,  $C_{O_2np}$  – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре, мг/дм<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент биохимического окисления для бимолекулярной и трехкомпонентной моделей, сут<sup>-1</sup>;  $\beta$  – коэффициент реэрации для бимолекулярной и трехкомпонентной моделей, сут<sup>-1</sup>,  $\gamma$  – коэффициент учета микроорганизмов в ходе процессов окисления, определяется экспериментальным путем, сут<sup>-1</sup>;  $n$  – коэффициент согласования размерности (дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>/(мг)<sup>2</sup>, принятый за 1. Начальными условиями модели являются  $t = 0$  сутки;  $C_{OB} = C_{OB}^0$ , мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{O_2} = C_{O_2}^0$ , мг/дм<sup>3</sup>;  $C_B = C_B^0$ , мг/дм<sup>3</sup>.

С помощью данной модели на основе исходных данных, полученных экспериментальным путем в ходе ряда исследований для разных сезонов с учетом изменения гидрометеорологических характеристик (температура воды и воздуха, осадков, скорости течения), рассчитан коэффициент  $\gamma$  для органических соединений, который отражает процессы биохимического окисления с учетом деятельности микроорганизмов. Значение данного коэффициента выше, чем ранее предложенного коэффициента  $k$  (4), поскольку скорость окисления с учетом микроорганизмов выше.

После определения параметров модели биохимического окисления органических веществ проводится расчет нормативов допустимого воздействия при участии микроорганизмов ( $\gamma$ ) и платы за НВОС для отдельных показателей и на основе методики оценки самоочищающей способности водного объекта (рис. 1) формируются выводы о качестве водного объекта и могут быть предложены мероприятия, повышающие эффективность очистки и технологических процессов производства конечного продукта.

Идентификация параметров трехкомпонентной модели биохимического окисления щелочесодержащих сточных вод была проведена на основе экспериментальных данных, полученных в ходе исследования. Для расчета коэффициента, учитывающего процесс концентрации микроорганизмов в ходе окисления, применено программное обеспечение *MathCAD 15*.



Рис. 1. Алгоритм расчета параметров модели биохимического окисления загрязняющих веществ в сточных водах

Этапы алгоритма идентификации параметров модели:

1. Обозначить значения БПК, растворенного в воде кислорода и концентрацию микроорганизмов и присвоить им необходимые исходные значения.

Исходные данные для расчета задачи биохимического окисления, полученные экспериментальным путем в ходе исследований трансформации органического вещества от места выпуска сточных вод до контрольного створа, представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные для решения предложенной трехкомпонентной модели

t	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	C <sub>опр</sub>	v	H
°С	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	млн.кл./дм <sup>3</sup>	сут <sup>-1</sup>	сут <sup>-1</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	м/с	м
14,3	5,5	5,7	4,4	0,061	0,4	10,2	0,67	25

Задача сводится к определению коэффициента учета микроорганизмов в ходе процессов окисления и трансформации органического вещества.

Обозначим концентрации через букву  $x$  с соответствующими индексами:  $x_0 - c_1$  – значение показателя БПК,  $x_1 - c_2$  – концентрация растворенного кислорода,  $x_3 - c_3$  – концентрация микроорганизмов по КОЕ. При этом необходимо помнить, что в программе *MathCAD 15* индексы идут от нуля, не от единицы.

2. Задать начальные условия. Начальные условия задаются в виде матрицы:

$$x \equiv \begin{pmatrix} 5.5 \\ 5.7 \\ 4.4 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $c_1$  – величина БПК, равна 5,5 мг/дм<sup>3</sup>,  $c_2$  – концентрация растворенного кислорода равно 5,7 мг/дм<sup>3</sup>,  $c_3$  – концентрация микроорганизмов, равна 4,4 мг/дм<sup>3</sup>.

3. Записать дифференциальные уравнения в виде, требуемом системой *MathCAD 15* для расчетов.

Запись дифференциальных уравнений определяется требованиями записи той функции, которую необходимо использовать для расчетов и в программе *MathCAD 15* будет выглядеть следующим образом:

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} -0.061x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 \\ -0.061x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.4(10.2 - x_1)^2 \\ -0.061x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.4(10.2 - x_1)^2 - y \cdot x_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Буквой  $D$  обозначается дифференциальное уравнение в обыкновенных производных, она фигурирует в решающих функциях. В скобках  $t$  – время и переменная во времени величина.

4. Подобрать и правильно записать необходимую функцию для решения системы уравнений (4).

Для решения данного вида дифференциальных уравнений можно воспользоваться функцией *Bulstoer*. *MathCAD* дает следующее описание данной функции: «Возвращает матрицу значений решений для дифференциальных уравнений, указанных  $D$  с начальными условиями  $u_1, u_2$ , используя метод Бюрлих-Стоера:

$$Z := \text{Bulstoer}(x, 0, 20, 40, D) \quad (9)$$

В данном случае, исходя из опыта, можно рекомендовать проводить расчет в сутках и задавать продолжительность процесса порядка 10-50 суток, например, 30 суток.

Для функции необходимо указать саму переменную ( $x$ ) на интервале от 0 до 50, количество рядов выходной матрицы 40.

5. Построить графики зависимости концентраций БПК, растворенного кислорода и микроорганизмов, участвующих в процессе окисления, от времени.

6. Идентификация параметров модели биохимического окисления сточных вод. В ходе проведенного этапа моделирования и апробации тримолекулярной (трехкомпонентной модели) расчетным путем получен коэффициент  $\gamma$ , отражающий полноту биохимического окисления органического вещества с учетом взаимовлияния трех компонентов – органического вещества, растворенного кислорода и микроорганизмов, участвующих в процессе окисления. Значение коэффициента  $\gamma$  согласно проделанным исследованиям равно 0,6 сут<sup>-1</sup> и может являться параметром для многопараметральной конвективно-диффузионной модели трансформации загрязняющего вещества.

Методика идентификации параметров модели биохимического окисления, реализована на основе трехкомпонентной модели и применима для оценки и прогноза концентрации органических соединений, позволяет рассчитать параметры биохимического окисления загрязняющих веществ сточных вод, в том числе, коэффициент учета микроорганизмов и установить зависимости между величиной БПК, растворенного кислорода и количеством микроорганизмов в пробе в определенный момент времени. На

основе алгоритма идентификации параметров разработана методика оценки самоочищающей способности водоёма.

Методика оценки самоочищающей способности водоёма включает в себя несколько взаимосвязанных между собой этапов и основана на математической модели биохимического окисления (рис. 2).

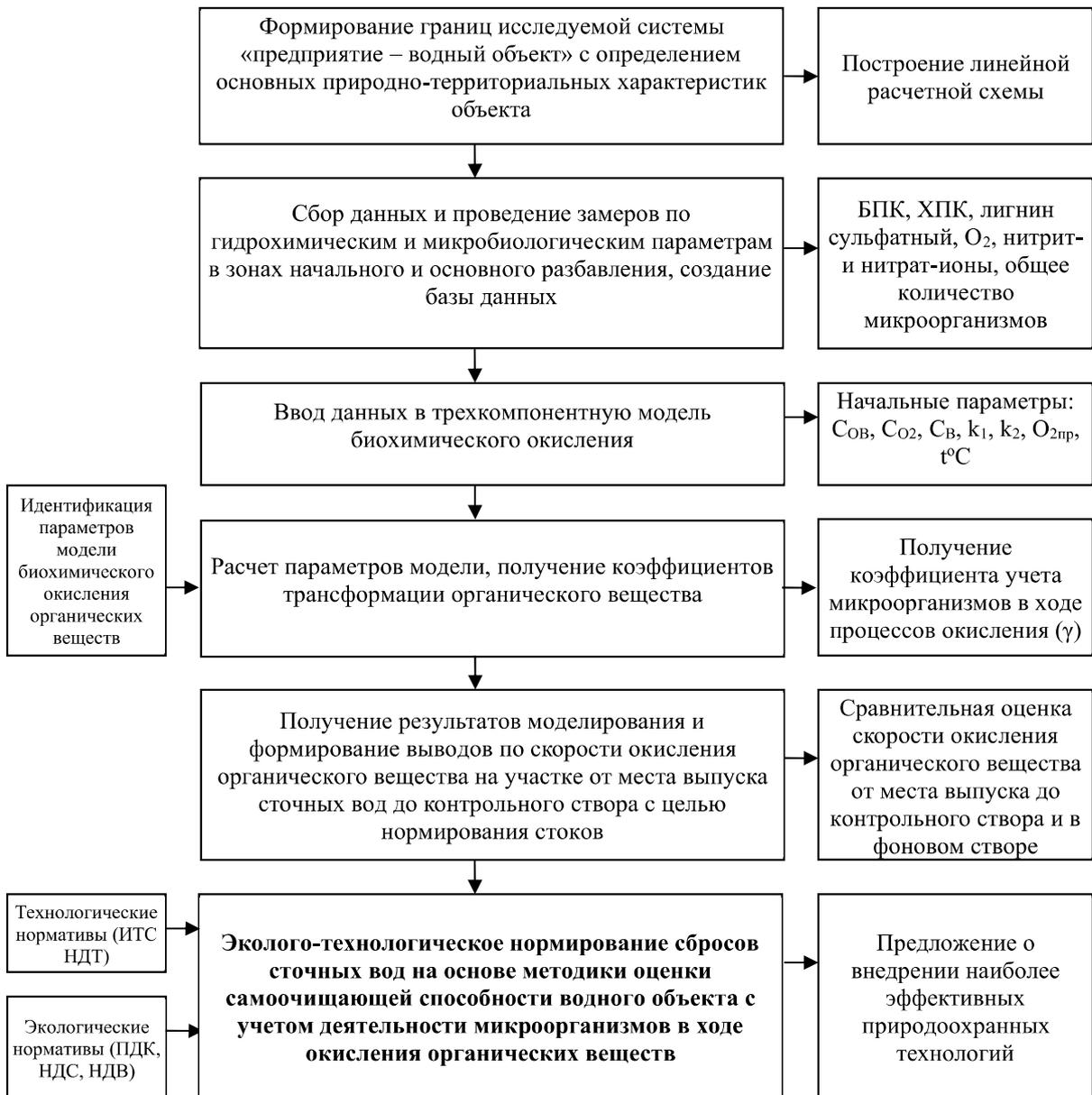


Рис. 2 - Методика оценки самоочищающей способности водного объекта

На следующем этапе определить репрезентативные показатели качества воды исследуемой зоны контроля, провести сбор данных и замеры по гидрохимическим и микробиологическим параметрам в зонах начального и основного разбавления. Сформировать базу данных по исследованным параметрам, отражающих специфику сточных вод (БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>полн</sub>, ХПК, метанол, лигнин сульфатный, фенолы, нитрат-ионы, нитрит-ионы, растворенный кислород, количество микроорганизмов, выраженных в КОЕ).

Далее осуществляется ввод начальных параметров, необходимых для введения в модель – концентрация органического вещества (на примере БПК<sub>полн</sub>), концентрация растворенного кислорода, количество микроорганизмов, участвующих в процессах окисления, выраженных в концентрации, коэффициент биохимического окисления, коэффициент реаэрации, температурный режим.

Согласно разработанному ранее алгоритму идентификации параметров модели биохимического окисления органических веществ, представленному в предыдущей главе, производится расчет параметров модели, получение коэффициентов трансформации органического вещества. В ходе расчета получают коэффициенты учета микроорганизмов в ходе процессов окисления ( $\gamma$ ).

После чего следует этап получения результатов моделирования и формирование выводов по скорости трансформации органического вещества. Проводится сравнительная оценка скорости окисления органического вещества от места выпуска до контрольного створа и в фоновом створе с целью оценки процесса утилизации загрязняющего органического вещества. Следует отметить, что необходимо учитывать не только химическую трансформацию вещества, но и процессы перемешивания в толще воды и осадения.

Процедура нормирования сточных вод завершается сравнением с нормативом репрезентативных показателей в контрольном створе и предложение мероприятий по корректировке технологических параметров производства и систем очистки согласно утвержденным наилучшим доступным технологиям в рассматриваемой отрасли.

Применение модели и методики отражено на примере расчета нормативов допустимого сброса в водный объект и установление размера платы за негативное воздействие на водный объект.

### Расчет нормативов допустимого сброса в водный объект от целлюлозно-бумажного предприятия с учетом концентрации микроорганизмов

Подробный расчет для показателя БПК<sub>полн</sub> приведен ниже. Исходные данные для расчета НДС с учетом микроорганизмов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета НДС по БПК<sub>полн</sub>

Сезон	С <sub>БПКполн</sub>	С <sub>БПК фон</sub>	С <sub>О2</sub>	С <sub>м/о</sub>	T	О <sub>2пр</sub>	k (БПК)	$\gamma$ (БПК)	q
	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	$\times 10^6$ КОЕ/дм <sup>3</sup>	°С	мг/дм <sup>3</sup>	сут <sup>-1</sup>	сут <sup>-1</sup>	тыс. м <sup>3</sup> /сезон
ПДК <sub>р/х</sub>	3,0	3,0	6,0/4,0						
весна	5,5	2,18	6,7	2,52	14,3	10,2	0,03	0,341	4284
лето	3,3	2,13	5,0	4,4	27	8,07	0,03	0,339	4083
осень	4,7	2,23	5,57	1,97	18	9,64	0,03	0,195	5049
зима	5,8	2,31	6,1	0,98	12	10,83	0,02	0,126	4450

где  $\gamma$  – коэффициент лабильности (способности к окислению) с учетом деятельности микроорганизмов.

Значение  $\gamma$  отражает скорость окисления органического вещества и получено расчетным путем на основе трехкомпонентной модели (6) биохимического окисления органического вещества. Исходные данные для расчета вспомогательных величин ( $\gamma$ ) по трехкомпонентной модели (табл. 3).

Таблица 3 – Исходные данные для расчета вспомогательных величин по трехкомпонентной модели

Глубина участка, м	Скорость течения, м/с	Расстояние до контрольного створа, м	Время добегаия, сут	k <sub>2</sub> , сут <sup>-1</sup>
25	0,05	500	0,12	0,02

Расчет допустимой концентрации (С<sub>НДС</sub>) и нормативов допустимого сброса НДС проведен для специфических показателей для целлюлозно-бумажного производства: БПК<sub>полн</sub>, лигнин сульфатный, метанол.

При этом для расчета НДС использована формула с коэффициентом скорости  $\gamma$ , учитывающая деятельность микроорганизмов:

$$C_{НДС} = n(ПДК e^{\gamma t} - C_{\phi}) + C_{\phi} \quad (10)$$

где ПДК - предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в воде, мг/дм<sup>3</sup>; С<sub>ф</sub> - условная фоновая концентрация загрязняющего вещества в водотоке выше выпуска сточных вод, определяемая в соответствии с действующими методическими документами по проведению расчетов условных фоновых концентраций химических веществ, мг/дм<sup>3</sup>; n - кратность общего разбавления сточных вод в водотоке; γ – введенный коэффициент учета микроорганизмов в ходе процессов окисления органического вещества, сут<sup>-1</sup>; t - время добегания от места выпуска сточных вод до расчетного створа, сутки.

Рассмотрено два случая расчета для сравнения полученных величин НДС без учета микроорганизмов и с учетом. В таблице 4 приведены все исходные данные для расчета за разные сезоны для исследуемого объекта.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета нормативов допустимого сброса

<i>Сезон</i>	<i>Весна</i>	<i>Лето</i>	<i>Осень</i>	<i>Зима</i>
T,оС	14,3	27,0	18,0	12,0
С <sub>БПК</sub>	5,5	3,3	4,7	5,8
С <sub>лигнин</sub>	15,0	12,0	39,0	16,6
С <sub>метанол</sub>	0,16	0,17	0,26	0,15
С <sub>О<sub>2</sub></sub>	6,7	5,0	5,6	6,1
С <sub>м/о</sub>	2,52	4,4	1,97	0,98
k (БПК)	0,03	0,03	0,03	0,02
γ (БПК)	0,341	0,339	0,195	0,126
k (лигнин)	0,04	0,03	0,04	0,03
γ (лигнин)	0,173	0,227	0,137	0,066
k (метанол)	0,04	0,045	0,05	0,04
γ (метанол)	0,533	0,181	0,117	0,371

Первый случай подразумевает, что С<sub>доп</sub> равен установленным значениям ПДК<sub>рыбхоз</sub>, тогда величина НДС рассчитана по формуле 1 (табл. 5).

Таблица 5 – Величины С<sub>доп</sub> и НДС за каждый сезон без учета микроорганизмов

<i>С<sub>доп</sub>, мг/дм<sup>3</sup> / НДС т/сезон без учета микроорганизмов</i>			
<i>Сезон / показатель</i>	<i>БПК<sub>полн</sub></i>	<i>Метанол</i>	<i>Лигнин сульфатный</i>
Зима	2,1 / 9,00	0,1 / 0,43	2,0 / 8,57
Весна	2,1 / 8,57	0,1 / 0,41	2,0 / 8,17
Лето	2,1 / 10,60	0,1 / 0,50	2,0 / 10,10
Осень	2,1 / 9,35	0,1 / 0,45	2,0 / 8,90

Во втором случае величина С<sub>доп</sub> рассчитана с учетом микроорганизмов по формуле 7, а величина НДС рассчитана по формуле 10 (табл. 6).

Значения С<sub>доп</sub> и НДС с учетом микроорганизмов возросли по сравнению с теми же величинами, но без учета деятельности микроорганизмов, что говорит о том, что микроорганизмы способны переработать большее количество органического вещества при сбросе в водный объект, что увеличивает самоочищающую способность водного объекта.

Таблица 6 – Величины  $S_{доп}$  и НДС за каждый сезон с учетом микроорганизмов

<b><math>S_{доп}</math>, мг/дм<sup>3</sup> / НДС т/сезон с учетом микроорганизмов</b>			
<b>Сезон / показатель</b>	<b>БПК<sub>полн</sub></b>	<b>Метанол</b>	<b>Лигнин сульфатный</b>
Зима	15,08 / 64,59	0,29 / 1,25	10,17 / 43,58
Весна	17,96 / 73,33	0,16 / 0,67	2,00 / 8,17
Лето	18,04 / 91,07	0,14 / 0,71	2,00 / 10,10
Осень	15,21 / 67,66	0,23 / 1,04	5,65 / 25,14

**Расчет платы за негативное воздействие от предприятий ЦБП**

По постановлению Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду" рассчитана плата за негативное воздействие от исследуемого целлюлозно-бумажного предприятия [12]. Ставка платы по показателям определена по Постановлению Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах" [13].

В таблицах 7 и 8 приведены результаты расчета с целью сравнения двух случаев для четырех сезонов, полученных по данным 2020 года, а также % снижения платы с учетом новой методики.

Таблица 7 – Общая плата за НВОС без учета микроорганизмов

<b>Сезон</b>	<b>БПК<sub>полн</sub></b>	<b>Метанол</b>	<b>Лигнин сульфатный</b>
Ед. измерения	руб/сезон	руб/сезон	руб/сезон
Зима	810607	211228	4779702
Весна	1271273	195259	4231200
Лето	1801182	365559	4428358
Осень	686867	1032331	3548624
Год	4569930	1804378	16987884

Учет микроорганизмов в расчете НДС позволяет увеличить норматив на 50-95% для показателей органического вещества (БПК<sub>полн</sub>, лигнин сульфатный, метанол). Изменение значений НДС влечет за собой изменение платы за сброс загрязняющих веществ, в этом случае плата за сверхнормативный сброс снижается, что приводит к уменьшению издержек предприятия по экологическим платежам.

Таблица 8 – Общая плата за НВОС с учетом микроорганизмов

<b>Сезон</b>	<b>БПК<sub>полн</sub></b>	<b>Метанол</b>	<b>Лигнин сульфатный</b>
Ед. измерения	руб/сезон	руб/сезон	руб/сезон
Зима	11215	5482	2020873
Весна	15676	5164	4231200
Лето	21676	207332	4428358
Осень	10098	567851	2268858
Год	58664	785829	12949288
<b>% снижения</b>	<b>98,7</b>	<b>56,4</b>	<b>23,7</b>

Таким образом, предложенные в работе научные разработки позволяют увеличить норматив для сброса органического вещества, специфичного для рассматриваемой отрасли, при разработке проекта

НДС и получении комплексного экологического разрешения для предприятий целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, а также снизить годовое значение платы для показателей, отражающих органические вещества за счет уменьшения платежей за сверхнормативный и сверхлимитный сброс – по БПК<sub>полн</sub>, плата снизится на 99%, метанол – на 55%, а лигнин сульфатный на 24 % за год.

### Заключение

В ходе работы проведено теоретическое обоснование показателей биохимического окисления органических веществ сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Рассмотрены процессы окисления легкоокисляемых и трудноокисляемых органических вещества, которые выражены в показателях БПК<sub>полн</sub>, метанол, лигнин сульфатный. Проведены экспериментальные исследования по определению взаимовлияния этих показателей с концентрацией растворенного кислорода и микроорганизмов, которые позволили определить основные параметры модели биохимического окисления органического вещества.

Введен и обоснован коэффициент учета деятельности микроорганизмов ( $\gamma$ ) в процессах биохимического окисления органических веществ в стоках сульфат-целлюлозного производства, который уточняет значение скорости окисления органического вещества.

На основе существующих моно- и бимолекулярных уравнений, описывающих процессы окисления в зоне дефицита кислорода и без дефицита кислорода, разработана трехкомпонентная модель биохимического окисления сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Данная модель позволяет рассчитать коэффициент учета деятельности микроорганизмов ( $\gamma$ ) в ходе окисления вещества.

Предложен алгоритм идентификации параметров модели биохимического окисления органических веществ в стоках сульфат-целлюлозного производства, который позволяет определить расчетную схему участка в зависимости от рассматриваемых условий – по моно-, би- и тримолекулярным уравнениям.

На основе трехкомпонентной модели разработана методика оценки самоочищающей способности водоёма, применяемая в условиях влияния стоков предприятия для целей прогноза и нормирования качества водных экосистем, на которые оказывается техногенное воздействие.

Предложенные модель и методика оценки самоочищающей способности водоёма позволяют оценить реальную нагрузку со стороны исследуемого предприятия, рассчитать допустимую концентрацию загрязняющего вещества и норматив допустимого сброса этого вещества с учетом деятельности микроорганизмов. При этом значение НДС будет больше в сравнении с ранее предложенными методиками, которые не учитывают микробиологическую составляющую окисления органического вещества.

В работе проведена оценка экономического эффекта с учетом применения трехкомпонентной модели и уточненной формулы расчета НДС, результаты которой показали, что годовое значение платы для показателей, отражающих органические вещества, снизится на 25-99%. Данная позиция указывается предприятием при разработке комплексного экологического разрешения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90128.*

### Литература

1. Базякина Н.А. Расчет константы скорости потребления кислорода при определении БПК сточной жидкости. – Санитарная техника. №2, 1933, с.17-24.
2. Боголицын К.Г., Москалюк Е.А., Костогоров Н.М., Шульгина Е.В., Иванченко Н.Л. Применение интегральных показателей качества сточных вод для внутрипроизводственного эколого-аналитического контроля производства целлюлозы // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 343–352 DOI: 10.14258/jsergm.2021027871
3. Готовцев А.В. Модификация системы Стритера–Фелпса с целью учета обратной связи между концентрацией растворенного кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы, 2010, т. 37, №2. С. 250–256.
4. Дружинин Н.И., Шишкин А.И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши /Л.: Гидрометеоиздат, 1989. - 329 с.
5. ИТС 1-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона (утв. Приказом Росстандарта от 15.12.2015

№ 1571) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200128661>. (Дата обращения – 12.12.2021).

6. Личутина Т.Ф., Боголицын К.Г., Гусакова М.А. Комплексная оценка негативного воздействия на окружающую среду предприятий ЦБП в соответствии с технологическими нормативами Европейского сообщества // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2011. – № 8. – С. 52–62.

7. Лозовик П.А., Рыжаков А.В. Трансформация, круговорот лабильных веществ и продукционно-деструкционные процессы в озерных экосистемах. // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. Journal of Siberian Federal University. Biology; 2017 № 10 (4) – с. 404-421. DOI: 10.17516/1997-1389-0042.

8. Постановление Правительства РФ N 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий от 31 декабря 2020 г.

9. Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду".

10. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах".

11. Терью Э.Д. Скорость потребления кислорода в загрязненных водах. Пер. с англ. В кн.: Вопросы загрязнения и самоочищения водоемов. Инст. комм, гигиены АН СССР, М., 1937.

12. Thomas R. Camp. Water and its impurities, VIII, 1963. -355 с.

13. Streeter H.W., Phelps E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River // U.S. Publ. Health Service Bull. . № 146. 1925. - pp. 1–75.

© **Строганова М.С.** – ассистент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (ФГБОУ ВО «СПбГУПТИД»), e-mail: [masha199407@list.ru](mailto:masha199407@list.ru); **Жильникова Н.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ФГАОУ ВО «СПбГУАП»), e-mail: [nataliazhilnikova@gmail.com](mailto:nataliazhilnikova@gmail.com).

UDC 676+504.064.2.001.18

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE SELF-PURIFYING CAPACITY OF WATER BODY UNDER THE INFLUENCE OF SULFATE -PULP PRODUCTION EFFLUENT

**M.S. Stroganova, N.A. Zhilnikova**

*The paper proposes a three-component model of biochemical oxidation of organic matter, describing the formation of water quality in a water basin area and taking into account not only specific indicators for effluents of a particular production, but also the presence and species composition of microorganisms involved in the processes of oxidation of organic substances. This model is based on the already existing bimolecular model of biochemical oxidation by Professor A.I. Shishkin. In order to improve this approach, a coefficient of accounting for microorganisms was introduced into the mathematical model, reflecting the rate of oxidation of organic matter. An algorithm for identifying parameters of the model of biochemical oxidation of organic substances is proposed to calculate the coefficient of accounting for microorganisms. The results of studies of wastewater from sulfate-pulp production by seasons and indicators of dissolved oxygen, the number of microorganisms and organic compounds specific to this type of wastewater are presented. A forecast is given and an assessment of the quality of the natural water of the lake at the site of the initial and main dilution of wastewater is made using methods of mathematical modeling of the processes of biochemical oxidation of organic matter. Based on the developed model, a methodology for assessing the self-cleaning ability of a reservoir has been formed, which allows assessing the permissible level of discharge of pollutants into the reservoir and reducing payments for the negative impact of wastewater from a sulfate-pulp enterprise on a water body by 25-99%, depending on the nature of the substance and the season of the year. As an example, the specific substances that are controlled at the wastewater discharge site of a sulfate-pulp enterprise and in the control section of a water body -  $BOD_{106}$ , methanol and sulfate lignin – are considered. The model and methodology proposed in the work allow to increase the standard of discharge of pollutants in accordance with the actual ability of the reservoir to self-purification, as well as to reduce the annual value of the fee for*

*negative environmental impact for indicators reflecting organic substances by reducing payments for excess discharge.*

**Keywords:** *three-component model of biochemical oxidation of organic matter, methodology for assessing the self-purification capacity of a water body, sulfate-pulp plant, wastewater of sulfate-pulp production.*

### References

1. Bazyakina N.A. Raschet konstanty skorosti potrebleniya kisloroda pri opredelenii BPK stochnoj zhidkosti. [Calculation of the oxygen consumption rate constant when determining the BOD of the waste liquid.] – Sanitarnaya tekhnika. [Sanitary equipment.] No. 2, 1933, pp.17-24. (In Russ.).
2. Bogolitsyn K.G., Moskalyuk E.A., Kostogorov N.M., Shulgina E.V., Ivanchenko N.L. Primenenie integral'nyh pokazatelej kachestva stochnyh vod dlya vnutriproizvodstvennogo ekologo-analiticheskogo kontrolya proizvodstva cellyulozy. [Application of integral indicators of wastewater quality for in-production ecological and analytical control of pulp production]. // Himiya rastitel'nogo syr'ya. [Chemistry of plant raw materials]. 2021. No.2. pp. 343-352 DOI: 10.14258/jcprm.2021027871. (In Russ.).
3. Gotovtsev A. B. Modifikaciya sistemy Stritera–Felpsa s cel'yu ucheta obratnoj svyazi mezhdud koncentraciej rastvorennogo kisloroda i skorost'yu okisleniya organicheskogo veshchestva [Modification of the system Streeter–Phelps with the aim of accounting for the feedback between the concentration of dissolved oxygen and oxidation rate of organic matter] // Vodnye resursy Water resources, 2010, vol. 37, No. 2. P. 250-256. (In Russ.).
4. Druzhinin N.I., Shishkin A. I. Matematicheskoe modelirovanie i prognozirovanie zagryazneniya poverhnostnyh vod sushi [Mathematical modeling and forecasting of pollution of the surface waters] / Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. - 329 p. (In Russ.)
5. ITS 1-2015. Information and technical guide to the best available technologies. Production of pulp, wood pulp, paper, cardboard (approved by Rosstandart Order No. 1571 dated 12/15/2015) [Electronic resource]. - Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200128661> . (Accessed 12.12.2021).
6. Lichutina T.F., Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A. Kompleksnaya ocenka negativnogo vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatij CBP v sootvetstvii s tekhnologicheskimi normativami Evropejskogo soobshchestva. [Comprehensive assessment of the negative environmental impact of CBP enterprises in accordance with the technological standards of the European Community] // Cellyuloza. Bumaga. Karton. [Cellulose. Paper. Cardboard]. - 2011. - No. 8. - pp. 52-62. (In Russ.).
7. Lozovik P.A., Ryzhakov A.V. Transformaciya, krugovorot labil'nyh veshchestv i produkcionno-destrukcionnye processy v ozernyh ekosistemah. [Transformation, the cycle of labile substances and productive and destructive processes in lake ecosystems] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya. [Journal of the Siberian Federal University. Biology]. 2017 No. 10 (4) - pp. 404-421. DOI: 10.17516/1997-1389-0042. (In Russ.).
8. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2398 "On Approval of Criteria for Classifying Objects that Have a Negative Impact on the Environment as Objects of Categories I and II, III and IV of December 31, 2020.
9. Decree "On the calculation and collection of fees for negative environmental impact" from 03.03.2017 N 255 (ed. from 17.08.2020).
10. Decree of the Government of the Russian Federation of 13.09.2016 N 913 (ed. of 24.01.2020) "On the rates of payment for negative environmental impact and additional coefficients".
11. Teryo E.D. Skorost' potrebleniya kisloroda v zagryaznennyh vodah. Per. s angl. V kn.: Voprosy zagryazneniya i samoochishcheniya vodoemov. [The rate of oxygen consumption in polluted waters]. Trans. from English. In the book: Issues of pollution and self-purification of reservoirs].// Inst. komm, Hygiene of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 1937. (In Russ.).
12. Thomas R. Camp. Water and its impurities, VIII, 1963. -355 p.
13. Streeter H.W., Phelps E.B. Investigation of pollution and natural purification of the Ohio River // USA Publishing House. Bull from the Health Service. . No. 146. 1925. - pp. 1-75.

© **Stroganova M.S.** – Assistant of the Department of Environmental Protection and rational use of natural resources; St-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, e-mail: [masha199407@list.ru](mailto:masha199407@list.ru); **Zhilnikova N.A.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of innovation and integrated quality systems department; St-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: [nataliazhilnikova@gmail.com](mailto:nataliazhilnikova@gmail.com).