

Введение Комбинированные анаэробно-аэробные технологии очистки производственных сточных вод пищевых производств позволяют одновременно решать проблемы экологического характера и получать альтернативную энергию [1], поэтому общепризнанно являются энерго- ресурсосберегающими. Ранее были представлены результаты исследования процесса очистки сточных вод молокоперерабатывающего предприятия в комбинированной лабораторной установке. Показано, что с увеличением скорости потока эффективность работы анаэробной ступени уменьшалась, в то время как с ростом органической нагрузки эффективность работы лабораторной установки возрастала, причем пространственное разделение фаз анаэробной ступени существенно повышало эффективность очистки сточных вод [2]. Позднее эти данные были подвергнуты корреляционному анализу с последующей параметрической идентификацией ряда зависимостей, в частности, эффективности очистки сточных вод и скорости потребления органического субстрата от удельной органической нагрузки и гидравлической скорости потока [3]. Планировалось использовать выявленные корреляционные зависимости для математического моделирования и оптимизации процесса анаэробно-аэробной биологической очистки сточных вод предприятий по переработке молока. Экспериментальная часть Лабораторные пилотные установки для моделирования процесса биологической очистки сточных вод предприятия по переработке молока, условия проведения экспериментов и, наконец, результаты лабораторных опытов были описаны ранее [1]. В настоящей статье описывается алгоритм оптимизации процесса с использованием этих корреляционных зависимостей. При этом были приняты следующие допущения: Общее количество ступеней очистки $i_{\max}$ (в блок-схеме принято обозначение $I_{\max}$) принято равным четырем ($i_{\max}=4$), из них первая и вторая ступени - анаэробные, третья и четвертая - аэробные. Этот порядок ступеней соответствует ранее описанным [1] условиям проведения эксперимента. Удельную скорость потока D , сут⁻¹, и удельную органическую нагрузку L , мг O₂ • дм⁻³ • сут⁻¹, рассчитывали по ранее описанным формулам: $D = G / V_p$, где G - объемный расход жидкости, дм³ • сут⁻¹; V_p - объем биореактора, дм³; $L = S_{vx} \cdot D$, где S_{vx} - концентрация органического вещества во входящей жидкости, мг O₂ • дм⁻³. Основные обозначения параметров, использованные на блок-схеме представленного алгоритма, следующие: S_1 - концентрация органического вещества на входе в установку, мг O₂ • дм⁻³; S_i - концентрация органического вещества на выходе из ступени согласно требуемой эффективности очистки, мг O₂ • дм⁻³; S - фактическая концентрация органического вещества на выходе из установки, мг O₂ • дм⁻³; X_i - концентрация биомассы микробного сообщества на i -ой ступени установки, г • дм⁻³; G - объемный расход жидкости, дм³ • сут⁻¹; L_i удельная органическая нагрузка на i -ой ступени установки, мг O₂ • дм⁻³ • сут⁻¹; $L_{i \min}$, $L_{i \max}$ - минимальные и максимальные значения удельной органической нагрузки на i -ой ступени

установки, $\text{мг O}_2 \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$; Z_i - объем i -ой ступени установки, дм^3 ; N шаг итерации объема ступени биореактора, дм^{-3} ; P_i - удельная скорость изъятия загрязнений на i -ой ступени установки, $\text{г} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$; T_i время очистки сточных вод на i -ой ступени установки, сут ; T - общее время очистки сточных вод в установке, сут ; E - эффективность процесса очистки, %.

Результаты и их обсуждение

Блок-схема программы представлена на рисунке 1. Рис. 1 - Блок-схема алгоритма оптимизации процесса анаэробно-аэробной очистки сточных вод молочного производства

Для расчета времени пребывания очищаемой сточной воды на i -ой ступени биореактора использовали кинетическую формулу (1), учитывающую зависимость времени очистки T_i от удельной скорости изъятия загрязнений p_i и концентрации активной биомассы X_i :

$$(1) \quad T_i = \frac{V_i}{Q} \cdot \frac{S_{i \text{ вх}} - S_{i \text{ вых}}}{p_i \cdot X_i}$$

где $S_{i \text{ вх}}$ - концентрация органического вещества на входе в i -ую ступень, $\text{мг O}_2 \cdot \text{дм}^{-3}$; $S_{i \text{ вых}}$ - конечная концентрация органического вещества на выходе из i -ой ступени, $\text{мг O}_2 \cdot \text{дм}^{-3}$; p_i удельная скорость потребления (деструкции) органических загрязнений, $\text{г} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$; X_i - концентрация активной биомассы i -ой ступени установки, $\text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$.

Для реализации данного алгоритма на основе полученных в исследованиях численных результатов была разработана компьютерная программа, при помощи которой проводились расчеты. При этом принимались следующие экспериментально полученные и рассчитанные на их основе численные значения параметров процесса сточных вод молочного производства (Табл.1).

Таблица 1 – Численные значения параметров процесса очистки сточных вод молочного производства

Параметр	Ед. изм.	Численное значение
Объемный расход поступающей на очистку жидкости G	$\text{дм}^3 \cdot \text{сут}^{-1}$	$1,87 \pm 0,2$ ($3,6 \pm 0,7$)
Концентрации биомассы X_i на 1-4 ступенях	$\text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$	$X_1 = 5,0-7,0$ $X_2 = 5,0-7,0$ $X_3 = 3,0-3,5$ $X_4 = 1,0-1,5$
Концентрация органических загрязнений в очищаемой жидкости S_1	$\text{мг O}_2 \cdot \text{дм}^{-3}$	$3,46 \pm 0,83$ ($6,80 \pm 1,63$)
Интервал оптимальных значений удельной органической нагрузки по ступеням L_i	$\text{мг O}_2 \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$	$L_i \text{ min } L_i \text{ Limax}$
Требуемая эффективность очистки E	%	$E = 98-99$
Величины удельных скоростей деструкции органических загрязнений по ступеням		вычислялись с помощью ранее полученных аналитических зависимостей различного вида.

Численные значения коэффициентов этих зависимостей, принятые для расчетов, приведены в Табл.2.

Таблица 2 – Аналитические зависимости удельной скорости потребления органического вещества p от удельной органической нагрузки L по ступеням

Ступень	Вид зависимости
1 ступень	$p = -0,0005 \cdot L^2 + 0,0162 \cdot L - 0,078$
2 ступень	$p = 0,0054 \cdot L + 0,0008$
3 ступень	$p = 0,0095 \cdot L - 0,0025$
4 ступень	$p = 0,0167 \cdot L - 0,0002$

Задача оптимизации процесса анаэробно-аэробной очистки сточных вод молочного производства при задании величины определенной эффективности очистки, таким образом, сводилась к минимизации рабочих объемов биореакторов i -ой ступени, обеспечивающих максимально возможное значение удельной скорости деструкции органического вещества на

соответствующей ступени, полученное ранее из экспериментальных данных.

Выводы 1. Разработан алгоритм расчета показателей эффективности очистки сточных вод молочного производства с учетом удельной скорости изъятия органических загрязнений на каждой ступени. 2. Для реализации данного алгоритма на основе полученных в исследованиях численных результатов была разработана компьютерная программа. 3. Проведенные при помощи данной программы расчеты и оптимизация технологического процесса показали, что при учете влияния нагрузки на скорость изъятия органических веществ на последовательных этапах обработки сточных вод возможно 2-5 кратное снижение времени их очистки. 4. Использование предложенного алгоритма при проектировании и внедрении промышленных биотехнологий очистки сточных вод позволяет сократить капитальные и эксплуатационные расходы при сохранении высокой эффективности очистки сточных вод.