

Введение К числу перспективных энерго- и ресурсосберегающих технологий очистки производственных сточных вод пищевых производств относятся комбинированные анаэробно-аэробные технологии, позволяющие одновременно решать проблемы экологического характера и получать альтернативную энергию в виде биогаза [1]. 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, что вызвано вымыванием неиммобилизованной взвешенной анаэробной биомассы, в то время как с ростом органической нагрузки эффективность работы лабораторной установки возрастала. С помощью пространственного разделения фаз анаэробной ступени удалось существенно повысить эффективность очистки сточных вод [2]. Целью настоящей работы являлось проведение в процессе лабораторного моделирования процесса биологической очистки сточных вод корреляционного анализа зависимостей эффективности очистки сточных вод и скорости потребления органического субстрата с удельной органической нагрузкой и последующей параметрической идентификации этих зависимостей. Выявленные корреляционные зависимости планируется в последующем использовать для математического моделирования и оптимизации процесса анаэробно-аэробной биологической очистки сточных вод предприятий по переработке молока. Экспериментальная часть При лабораторном моделировании процесса биологической очистки сточных вод были использованы как реальные сточные воды с действующего предприятия по переработке молока, производства сливочного масла, сухого цельного и сухого обезжиренного молока, так и модельные сточные воды аналогичного химического состава. Модельные сточные воды готовили с учетом ранее проведенного химического анализа основных качественных характеристик (ХПК, содержание жиров, содержание взвешенных веществ). Лабораторные пилотные установки включали анаэробный и аэробный этапы обработки сточных вод с суспензированной и иммобилизованной биомассой. Подробно они были описаны ранее [2] и включали в себя установку А с разделением анаэробной и аэробной ступени на две фазы, то есть соответственно биореакторы А1, А2 (аэробные), А3, А4 (анаэробные), и установку В без разделения ступеней на фазы, включая соответственно биореакторы В1 (анаэробный) и В2 (аэробный). Процесс биоочистки вели в условиях варьирования удельной скорости потока D и удельной органической нагрузки L путем изменения объемного расхода сточной воды G и ее химического состава, как описано ранее [2], до установившегося стационарного режима. Результаты и их обсуждение Учитывая те обстоятельства, что ключевыми параметрами, определяющими эффективность микробного метаболизма в непрерывных условиях культивирования, являются скорость потока очищаемой сточной воды и суммарная концентрация

органических веществ в ней, варьировали скорость протока и начальную концентрацию органических веществ в очищаемой сточной воде. Эти изменения приводили к пропорциональному изменению удельной органической нагрузки как на установку в целом, так и на отдельные ступени реактора. По результатам измерения суммарного содержания органических веществ (ХПК) [3] на входе и выходе из отдельных ступеней биореактора по ранее указанным формулам [2, 4] были рассчитаны величины удельной органической нагрузки L и эффективности очистки \mathcal{E} постадийно (табл. 1). Таблица 1- Средние значения нагрузки и эффективность очистки на последовательных этапах обработки сточных вод

Удельная органическая нагрузка L , кг ХПК•м-3•сут-1
 Эффективность очистки \mathcal{E} , %
 Установка А Режим 1 А1 9,89 44,4 А2 2,8 48,5 А3 0,89 4,4 А4 0,1 1,4
 Режим 2 А1 15,19 41,1 А2 4,37 42,4 А3 3,24 14,8 А4 0,11 1,1
 Режим 3 А1 18,42 29,7 А2 6,46 57,4 А3 3,17 10,2 А4 0,22 1,6
 Установка В Режим 1 В1 5,79 39,9 В2 1,21 35,8
 Режим 2 В1 10,78 51,4 В2 2,02 82,3
 Режим 3 В1 12,28 44,1 В2 2,59 37,3

По этим экспериментально полученным численным значениям эффективности очистки в отношении соответствующей удельной органической нагрузки, можно определить параметры корреляционной зависимости $\mathcal{E} = f(L)$.

При анализе корреляции указанных параметров было выяснено, что если на 1 ступени очистки отсутствует зависимость между эффективностью очистки и нагрузкой по органическому веществу (рис. 1), о чем свидетельствует низкое положительное значение коэффициента корреляции, равное 0,10, то на последующих ступенях установки наблюдаются корреляционные зависимости между рассматриваемыми параметрами (рис. 2-4) с высокими значениями коэффициентов корреляции.

Аналогичный корреляционный анализ был проведен для удельной скорости потребления органического вещества C , г•г-1•час-1, на отдельных ступенях. Коэффициенты линейной зависимости и коэффициенты корреляции также приведены в табл. 2. В результате корреляционного анализа экспериментальных данных, проведенного при помощи стандартной программы Microsoft Office Excel, были получены аналитические линейные зависимости, которые предполагается использовать при математическом моделировании процесса анаэробно-аэробной очистки сточных вод молочных производств с последующей их оптимизацией.

Рис. 1 - Корреляция эффективности очистки \mathcal{E} и удельной органической нагрузки L (А1)
 Рис. 2 - Корреляция эффективности очистки \mathcal{E} и удельной органической нагрузкой L (А2)
 Рис. 3 - Корреляция эффективности очистки \mathcal{E} и удельной органической нагрузкой L (А3)
 Рис. 4 - Корреляция эффективности очистки \mathcal{E} и удельной органической нагрузкой L (А4)

Таблица 2 - Корреляционные зависимости эффективности очистки \mathcal{E} (%) и удельной скорости потребления субстрата C (г• г-1•час-1) от удельной органической нагрузки L (кг ХПК• м-3•сут-1)

Сту-пень Зависимость Коэффициент корреляции $\mathcal{E} = f(L)$
 А1 $\mathcal{E} = - 1,44 \cdot L + 63,14$ 0,10
 А2 $\mathcal{E} = 5,20 \cdot L + 26,83$ 0,81
 А3 $\mathcal{E} = 4,41 \cdot L + 0,07$ 0,92
 А4 $\mathcal{E} = 8,56 \cdot L$

+ 0,09 0,79 C = f (L) A1 C = -0,0005•L2 + 0,0162•L - 0,078 1,0 A2 C = 0,0054•L + 0,0008 0,96 A3 C = 0,0095•L - 0,0025 0,98 A4 C = 0,0167•L - 0,0002 0,99 Низкое значение коэффициента корреляции параметров (0,10), то есть практически полное отсутствие взаимосвязи между нагрузкой и эффективностью очистки на первой ступени очистки определяется, вероятно, флуктуациями характеристик сточных вод, поступающих в установку. Первая ступень очистки в данном случае выполняет буферную функцию, нивелируя колебания качественных характеристик сточных вод перед их поступлением на последующие ступени их обработки. Выводы Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о положительной корреляционной зависимости эффективности очистки и скорости потребления органического субстрата от величины удельной органической нагрузки на установку в целом и на отдельные ступени процесса. Выявленные в результате корреляционного анализа зависимости эффективности очистки и скорости потребления органического вещества от величины удельной органической нагрузки указывают на возможность разработки алгоритма оптимизации процесса очистки сточных вод молокоперерабатывающих производств.