DOI https://doi.org/10.46845/2541-8254-2026-4(56)-64-64
УДК 681.518

ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БАРАБАННОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ



К. В. Васильцов, студент 2-го курса магистратуры
E-mail: vasiltsov_39@mail.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

Н. А. Долгий, кандидат технических наук, доцент
E-mail: dolgi@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

В данной работе представлен анализ эксплуатационных параметров установки барабанного фильтра, используемого для очистки сточных вод. Целью исследования является оценка эффективности и диагностика текущего режима работы установки с применением языковой модели, а также формирование практических рекомендаций по изменению настроек оборудования. Предложенный подход показывает, что языковая модель является удобным и эффективным инструментом для обработки информации.

Ключевые слова: *барабанный фильтр, водоочистка, оценка эффективности, анализ данных, языковая модель, оптимизация.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение барабанных фильтров широко распространено в системах очистки сточных вод на предприятиях аквакультуры и пищевой промышленности [1]. Принцип работы таких установок состоит в задержании механических взвесей на фильтровальном полотне, установленном на барабан [2]. При накоплении осадка пропускная способность фильтра снижается, что вызывает повышение уровня воды в приёмной камере установки. Автоматизированная система управления отслеживает этот параметр, и при превышении заданного порога запускается режим промывки, включающий в себя вращение барабана и запуск промывочного насоса. Подбор уставных значений технологических параметров в системе управления является достаточно сложной инженерной задачей, так как не всегда возможно исчерпывающе оценить работу устройств и учесть все влияющие факторы.

Для выявления скрытых закономерностей, оценки качества процесса и последующей корректировки настроек режима работы целесообразно применить языковую модель. С её помощью проводятся синхронизация и анализ временных рядов [3–5]. Оценка изменения технологических параметров позволит объективно охарактеризовать, в какой степени штатные уставки оптимальны для реальных условий работы оборудования, и сформировать конкретные предложения для их корректировки, а также по модернизации системы управления в целом.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Система фильтрации воды представляет собой бетонный резервуар с установленным в нём барабанным фильтром. Сточная вода сначала попадает в приёмную ёмкость, являющуюся своеобразным буфером для воды, где происходит снижение скорости потока. Из нее вода затекает во внутреннее пространство барабанного фильтра, на который натянуто фильтровальное полотно, представляющее собой микросетку из полимерного материала или нержа-

веющей стали. Механические частицы размером более чем диаметр ячейки сетки задерживаются на полотне, а фильтрат проходит в нижнюю часть установки, называющуюся камерой очищенной воды, откуда впоследствии вода направляется на ультрафиолетовое обеззараживание. В процессе фильтрации загрязнения скапливаются на микросетке, таким образом пропускная способность фильтра снижается, что вызывает повышение уровня в приёмной ёмкости. Это фиксируется аналоговым датчиком уровня и является сигналом для пуска мотор-редуктора, осуществляющего вращение барабана, или для начала полноценной промывки, во время которой включается промывочный насос, подающий чистую воду из специального резервуара на форсуночный узел над поверхностью барабанного фильтра. Высокий напор воды сбивает все загрязнения с внутренней части фильтровального полотна в шламовый лоток внутри барабанного фильтра, грязь из которого самотёком сливается в канализацию.

На рисунке 1 приведена электрическая принципиальная схема системы управления барабанным фильтром [6]. В качестве управляющего устройства используется программируемое реле ПР205 (АА1), информация на которое подается с датчиков уровня АА2 и давления АА3. Программируемое реле управляет режимами работы барабанного фильтра, формируя сигналы на мотор-редуктор и насос в зависимости от уровня воды в приемной ёмкости.

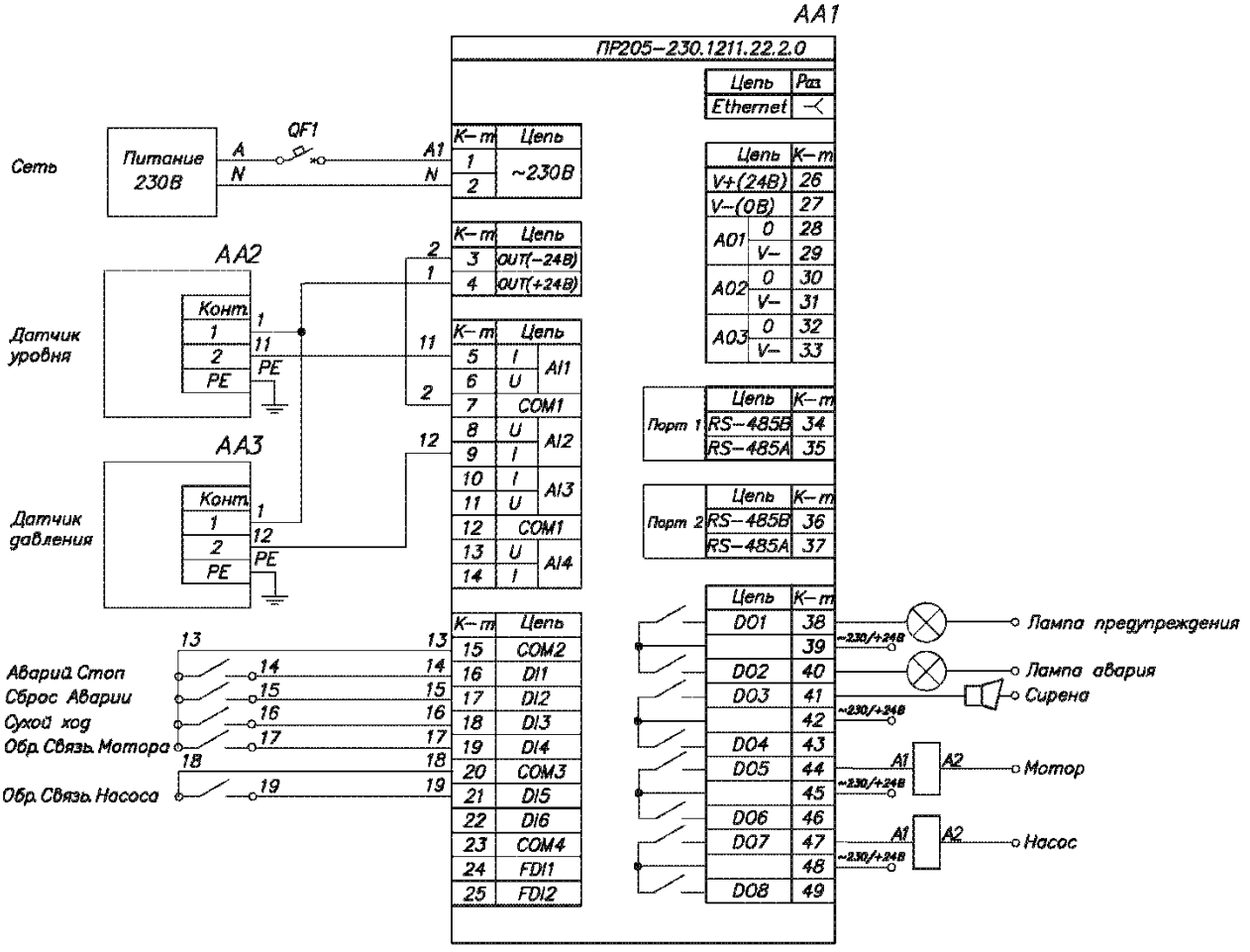

Рисунок 1 – Электрическая принципиальная схема системы управления барабанным фильтром

Исходные данные для анализа режима работы барабанного фильтра взяты из базы данных предприятия по выращиванию объектов аквакультуры. При архивировании параметров с типом значения REAL использованы следующие настройки: «Запись по изменению», «Мёртвая зона 0,01», «Минимальный период записи 1 с», «Максимальный период записи 1 мин». У параметров с типом BYTE записываются все значения. Экспорт данных осуществляется через интерфейс АСДКУ в формате «csv» (таблица 1).

Таблица 1 – Эксплуатационные данные установки барабанного фильтра

Уровень, м		Режим редуктора		Режим насоса	
Время	Значение	Время	Состояние	Время	Состояние
02.04.2026 12:00:02	1.12	02.04.2026 12:00:27	2	02.04.2026 12:00:54	2
02.04.2026 12:00:05	1.11	02.04.2026 12:00:35	1	02.04.2026 12:01:55	1
02.04.2026 12:00:09	1.11	02.04.2026 12:00:54	2	02.04.2026 12:02:14	2
02.04.2026 12:00:25	1.16	02.04.2026 12:01:55	1	02.04.2026 12:07:14	1
02.04.2026 12:00:28	1.16	02.04.2026 12:02:14	2	02.04.2026 12:08:16	2
02.04.2026 12:00:30	1.17	02.04.2026 12:07:14	1	02.04.2026 12:09:16	1
02.04.2026 12:00:38	1.13	02.04.2026 12:07:49	2	02.04.2026 12:09:37	2
02.04.2026 12:00:45	1.13	02.04.2026 12:07:56	1	02.04.2026 12:14:37	1
02.04.2026 12:00:48	1.14	02.04.2026 12:08:16	2	02.04.2026 12:15:38	2
02.04.2026 12:00:55	1.15	02.04.2026 12:09:17	1	02.04.2026 12:16:40	1
02.04.2026 12:01:07	1.12	02.04.2026 12:09:37	2	02.04.2026 12:17:00	2
02.04.2026 12:01:12	1.12	02.04.2026 12:14:37	1	02.04.2026 12:21:59	1
…	…	…	…	…	…

В интерфейсе управления барабанным фильтром введены следующие уставки: «Время наличия уровня для начала вращения 5 с», «Длительность вращения 7 с», «Время наличия уровня после вращения для начала промывки с вращением 20 с», «Длительность промывки с вращением 60 с», «Время наличия уровня после промывки с вращением для начала повторной промывки 20 с», «Длительность повторной промывки 300 с», «Периодичность перерыва повторной промывки 10 с», «Уровень срабатывания сигнала «верхний уровень» в барабанном фильтре для промывки 1,15 м», «Дельта отключения сигнала "верхний уровень" 0,05 м».

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является оценка эффективности и диагностика текущего режима работы барабанного фильтра в условиях повышенной нагрузки на основе интеллектуального анализа эксплуатационных данных (временных рядов уровня воды, состояния редуктора и промывочного насоса). Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи: синхронизация и анализ загруженных данных, выявление проблем в работе оборудования, количественная оценка эффективности штатных уставок при различных расходах воды, а также формирование практических рекомендаций по корректировке параметров и модернизации системы для снижения энергопотребления, уменьшения износа оборудования и повышения общего качества процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки эффективности работы установки барабанного фильтра и определения зависимостей анализ временных рядов (уровень, состояния редуктора и насоса) был выполнен на базе языковой модели DeepSeek R1. В диалоговую среду языковой модели были загружены подробное описание принципов работы системы, сырые данные и инструкция по анализу.

В процессе было сделано несколько итераций для получения приемлемых результатов. Программный модуль выполнил следующие операции:

- автоматическая синхронизация трёх потоков данных по временным меткам;
- анализ поведения уровня в приёмной ёмкости для каждого этапа фильтрации;
- оценка зависимости эффективности промывки от расхода воды.

Таким образом, автоматическое выполнение всех расчётов позволило избежать ручной обработки и в несколько раз ускорило процесс. Проверка адекватности результатов статистического анализа данных была проведена с помощью метода экспертной оценки путём исключения ложноположительных суждений.

Из экспортированных данных были сформированы три синхронизированных временных ряда (рисунок 2): уровень воды в приёмной ёмкости (метры), состояние мотора-редуктора (1 – выкл., 2 – вкл.) и состояние промывочного насоса (1 – выкл., 2 – вкл.). Для анализа выбран интервал, характеризующийся устойчивой проточностью 1300 м³/ч. Дополнительно подобран временной ряд, где приток воды в среднем составлял 1020 м³/ч, для сравнительной оценки эффективности уставок. Синхронизация временных рядов уровня, состояний редуктора и насоса позволила выделить в процессе последовательные циклы «подъём уровня – вращение – промывка». Это соответствует приведённому ранее алгоритму работы барабанного фильтра. Суммарное время работы редуктора – в среднем 48 мин 58 с за час (81,6 % времени), насоса – в среднем 48 мин 04 с за час (80,1 % времени).

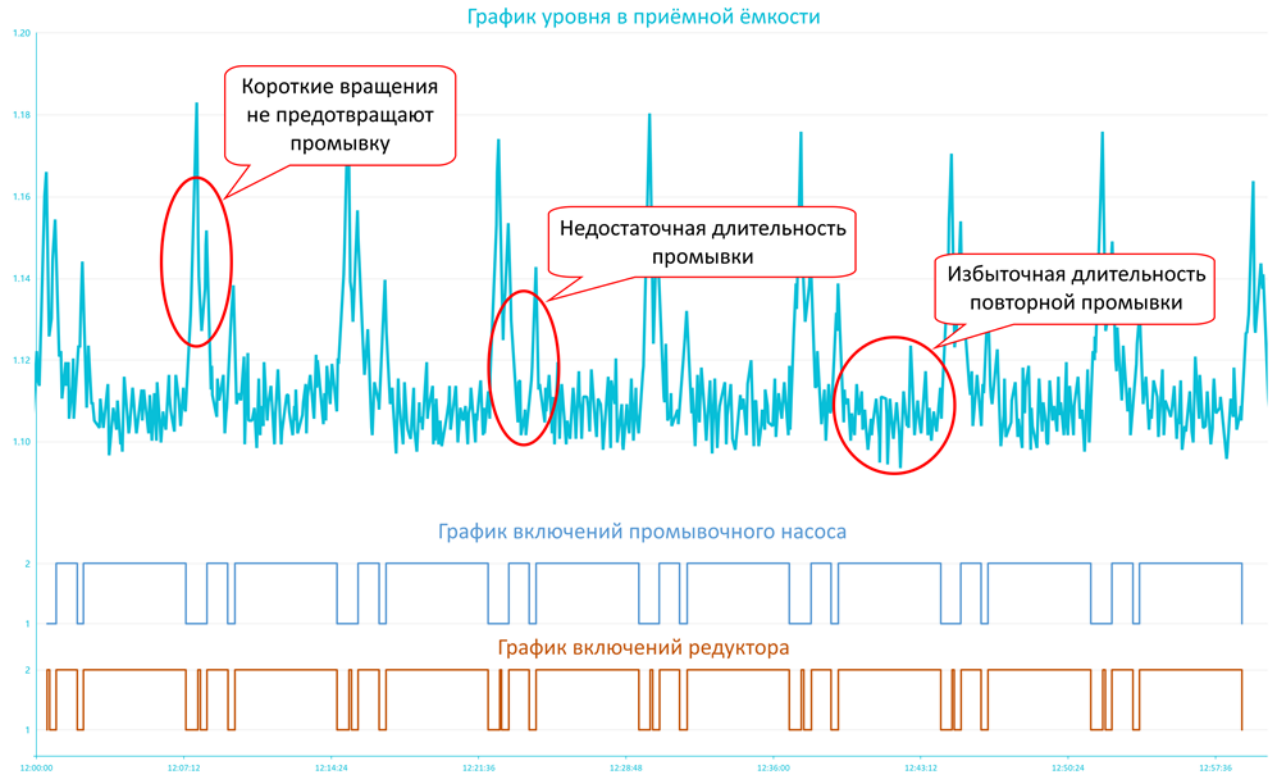

Рисунок 2 – Оценка временных рядов

Анализ эффективности коротких вращений показал, что за 7 с уровень воды в приёмной ёмкости снижается в среднем на 0,045 м. На момент вращения уровень составляет около 1,175 м, после завершения цикла уровень воды не опускался до значения 1,10 м, короткие вращения не позволяют снять сигнал «верхний уровень» и не предотвращают последующее включение промывки. Но это даёт наибольшую мгновенную скорость снижения уровня – около 0,56 см/с, что объясняется тем, что благодаря вращению меняется рабочая область сетки, и вода интенсивно уходит в течение первых секунд. 60-секундные промывки обеспе-

чивают среднее падение уровня 0,041 м. Лишь в 25 % случаев уровень достиг порога 1,10 м. В остальных случаях уровень фиксировался на отметке 1,11 м, что, согласно алгоритму управления, является сигналом для запуска повторной промывки длительностью 300 с. Повторные промывки демонстрируют более высокую эффективность. Во всех случаях уровень воды снижался до 1,08–1,09 м. Однако достижение необходимого эффекта происходит значительно раньше, чем завершится данный цикл. Судя по незначительному изменению уровня, через 90–120 с дальнейшая промывка становится малоэффективной, так как приток практически сравнивается с пропускной способностью.

Проанализировав аналогичным образом параметры при меньшем расходе (1020 м³/ч), установлено, что эффективность промывки была выше на 30–35 % по критериям достижения уставки уровня, скорости снижения и среднему остаточному уровню. При меньшей нагрузке доля циклов, в которых уровень опускался ниже 1,10 м, составила около 70 %, остаточный уровень фиксировался в диапазоне 1,08–1,09 м. Разница 2–3 см решающим образом влияла на необходимость запуска повторных промывок. Таким образом, снижение эффективности при росте расхода является существенным и требует корректировки уставок.

На основе выполненного анализа сформированы следующие изменения уставок (таблица 2). Их целью является снижение нагрузки на оборудование, уменьшение энергопотребления и сохранение качества фильтрации.

Таблица 2 – Рекомендации по изменению уставных значений

Уставка	Текущее значение	Рекомендуемое значение	Обоснование
Время наличия уровня для начала вращения	5 с	оставить	Фильтрует кратковременные всплески, не влияет на эффективность
Время наличия уровня после вращения для начала промывки с вращением	20 с	15 с	Достаточная пауза для оценки уровня
Время наличия уровня после промывки с вращением для начала повторной промывки	20 с	оставить	Разумная задержка перед аварийным режимом
Уровень срабатывания «верхний уровень»	1,15 м	оставить	Обоснован геометрией (погружение барабана на 1/3 диаметра)
Дельта отключения сигнала	0,05 м	оставить	Обеспечивает рабочий диапазон 1,10–1,15 м; увеличение дельты (снижение нижнего порога) привело бы к более редкому снятию сигнала и учащению повторных промывок
Длительность вращения	7 с	0 с (отключить)	При расходе 1300 м³/ч короткие вращения не достигают порога 1,10 м, не предотвращают промывку и лишь изнашивают редуктор. Отключение экономит 7 с за цикл (около 4 мин/ч)
Длительность промывки с вращением	60 с	120 с	При 60 с только 25 % циклов достигают 1,10 м; увеличение до 120 с обеспечит падение до 1,08–1,09 м при расходе 1300 м³/ч. Затраты на дополнительное время работы окупаются устранением повторных промывок
Длительность повторной промывки	300 с	оставить	При увеличении основной промывки до 120 с повторные промывки практически исчезнут. Но можно оставить эту настройку без изменений, на случай увеличения притока на фильтрацию
Периодичность перерыва повторной промывки	10 с	оставить	При сокращении длительности повторной промывки эта уставка теряет актуальность

В результате внедрения предложенных уставок удалось достичь стабильных и предсказуемых циклов промывки (рисунок 3). Так как длительность обычной промывки увеличилась в два раза, это позволило избежать длительных повторных промывок, которые используются в основном для режима при сверхвысоком притоке. При текущем количестве воды циклы промывок длятся в среднем 183 с, количество циклов в час:

$$\frac{3600\ \text{с}}{183\ \text{с}} = 19{,}7,$$

а суммарное время работы насоса и редуктора – 39,3 мин. Время, в течение которого оборудование находится во включенном состоянии, сократилось на

$$\left(1 - \frac{39{,}3\ \text{мин}}{48{,}5\ \text{мин}}\right) \times 100\ \% = 19\ \%.$$

Экономия электроэнергии составит:

$$\left(\frac{48{,}5\ \text{мин}}{60\ \text{мин}} \times (0{,}55\ \text{кВт} + 3\ \text{кВт}) - \frac{39{,}3\ \text{мин}}{60\ \text{мин}} \times (0{,}55\ \text{кВт} + +3\ \text{кВт})\right) \times 24\ \text{ч} \times 365\ \text{д} \approx$$

$$\approx 4768\ \text{кВт} \cdot \text{ч в год},$$

где мощность редуктора и насоса 0,55 кВт и 3 кВт соответственно. С финансовой точки зрения, принимая во внимание стоимость обслуживания и потребление электроэнергии, затраты, по приблизительной оценке, снизятся на

$$\left(1 - \frac{\left((0{,}55\ \text{кВт} + 3\ \text{кВт}) \times 10\ ₽\right) \times \frac{39{,}3\ \text{мин}}{60\ \text{мин}} + 19{,}7 \times (0{,}2\ ₽ + 0{,}8\ ₽)}{\left((0{,}55\ \text{кВт} + 3\ \text{кВт}) \times 10\ ₽\right) \times \frac{48{,}5\ \text{мин}}{60\ \text{мин}} + 24 \times 0{,}2\ ₽ + 16 \times 0{,}8\ ₽}\right) \times 100\ \% \approx 7{,}2\ \%,$$

где стоимость 1 кВт·ч электроэнергии для предприятия 10 руб., приведённые затраты на один пуск редуктора и насоса – 0,2 руб. и 0,8 руб. соответственно.

Таким образом, корректировка уставок уже даёт существенный положительный эффект, однако дальнейшее улучшение работы установки может быть достигнуто за счёт ряда аппаратных и алгоритмических изменений.

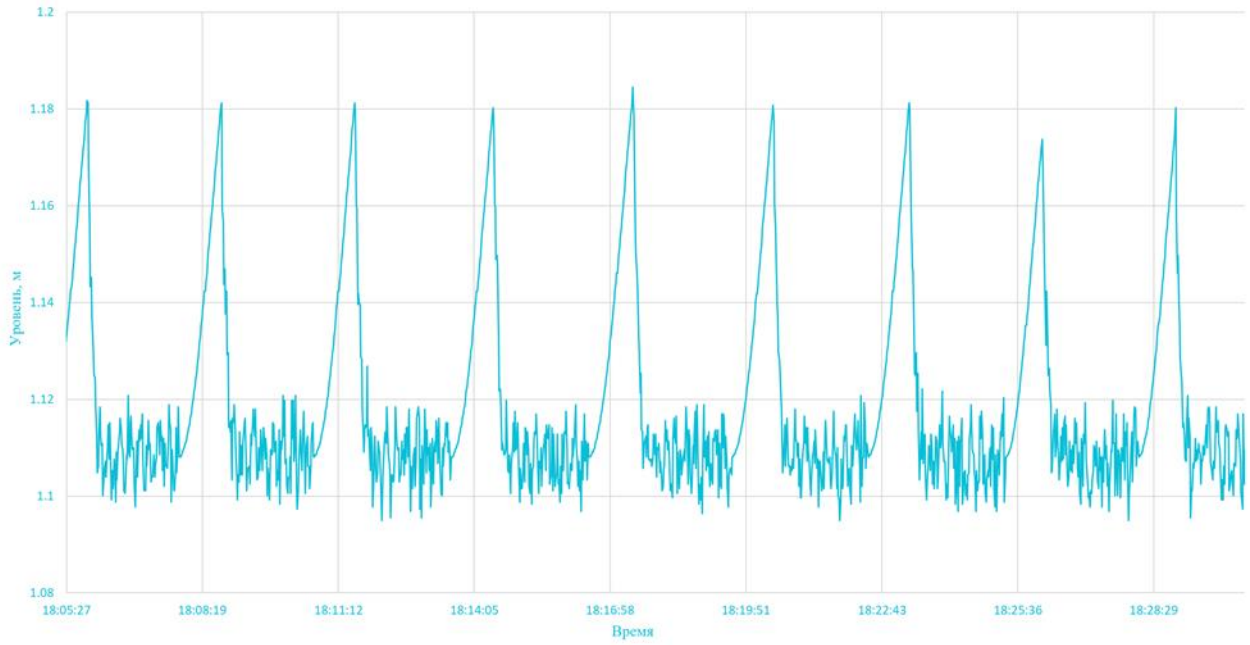

Рисунок 3 – График уровня в приёмной ёмкости установки после внедрения уставок

На основе выявленных закономерностей и количественных оценок были определены следующие направления по модернизации оборудования:

- внедрение адаптивного алгоритма управления барабанным фильтром с коррекцией режима работы по расходу воды (при малом притоке остаются кратковременные вращения,

которые приводят к уменьшению длительности промывки, при высоком кратковременные вращения исключаются, а цикл промывки увеличивается, что сэкономит энергию и снизит износ);

- замена барабанного фильтра на модель, предназначенную для фильтрации больших объёмов воды (частые промывки вызваны не только настройками, но и недостаточной площадью рабочей поверхности фильтра, из-за чего система работает на пределе);
- создание в долгосрочной перспективе прогностической модели загрязнения на основе методов машинного обучения и интеграция в систему управления (применение промышленных платформ, поддерживающих выполнение в реальном времени, установка обмена данными между моделью и АСУ ТП, это сгладит пиковые нагрузки и позволит перейти к предиктивному обслуживанию).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения данной работы на основе интеллектуального анализа эксплуатационных данных установлено, что штатные уставки барабанного микрофильтра не оптимальны, так как они не приводят к достижению целей, заложенных на этапе проектирования. Сформирована и обоснована корректировка параметров, которая позволила добиться стабильности и предсказуемости процесса фильтрации, а также сократить суммарное время работы оборудования и снизить энергопотребление. Для повышения эффективности системы были определены направления по модернизации, включающие в себя изменения аппаратной и программной частей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бритов, А. Н. Улучшение показателей состава воды в системе замкнутого водоснабжения при внедрении двухступенчатого механического барабанного фильтра / А. Н. Бритов, А. А. Васильев // Состояние и пути развития аквакультуры в Российской Федерации: Материалы V Национальной научно-практической конференции (Калининград, 22–23 октября 2020 г.) / Под ред. А. А. Васильева. – Калининград: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2020. – С. 38–42. – EDN JMDCGO.

2. Патент на полезную модель № 238686 U1 Российская Федерация, МПК B01D 33/06. Корпус фильтрующего элемента барабанного фильтра: заявл. 14.05.2025: опубл. 07.11.2025 / С. В. Федченко. – EDN GIIIKN.

3. Дубров, И. В. Интеллектуальная оценка энергоэффективности предприятий на основе анализа эксплуатационных данных / И. В. Дубров, А. И. Будников // Наука молодых – будущее России: Сб. научных статей 10-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 6 т. (Курск, 16 декабря 2025 г.). – Т. 5. Строительство. Градостроительство и архитектура. Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 124–127. – EDN XDOPDA.

4. Ледецкий, А. М. Подход к раннему выявлению нарушений в АСУ ТП на основе интеллектуального анализа эксплуатационных данных / А. М. Ледецкий, Т. Ю. Соколова // Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях: Сб. статей VI Научно-практической конференции с международным участием (Москва, 27–28 ноября 2025 г.). – Москва: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2025. – С. 58–62. – EDN TIYONF.

5. Ткаченко, А. Н. Разработка конфигурируемого микрофильтра для аквакультуры с адаптивной системой цифрового управления и дистанционным мониторингом / А. Н. Ткаченко, Д. В. Яковлев, В. А. Курочкина // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 2–4 марта 2022 г.) / Редколлегия: И. М. Донник [и др.]. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «ДГТУ-ПРИНТ», 2022. – С. 119–120. – DOI 10.23947/interagro.2022.119-120. – EDN DQOMLM.

6. Барабанный фильтр производства компании «Аквафермер»: от немецких аналогов до авторского изделия (инфографика). – URL: https://www.fishnet.ru/news/aquaculture_news/barabannyy-filtr-proizvodstva-akvafermer-ot-nemeckih-analogov-do-avtorskogo-izdeliya-infografika-/ (дата обращения: 02.04.26).

ASSESSMENT OF OPTIMALITY OF DRUM FILTER OPERATING MODES BASED ON INTELLIGENT ANALYSIS OF OPERATIONAL DATA

K. V. Vasiltsov, 2nd-year graduate student
E-mail: vasiltsov_39@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

N. A. Dolgii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: dolgi@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

This paper presents an analysis of the operational parameters of a drum filter unit used for wastewater treatment. The aim of the study is to evaluate the efficiency and diagnose the current operating mode of the unit using a language model, as well as to formulate practical recommendations for adjusting the equipment settings. The proposed approach demonstrates that the language model is a convenient and effective tool for information processing.

Keywords: *drum filter, water treatment, performance evaluation, data analysis, language model, optimization.*