

УДК 621.311.001

КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ ВОДООЧИСТКИ МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**В. Н. Штепа¹, В. В. Таберко², О. Н. Прокопеня³, В. И. Бакаленко⁴, С. В. Степанов⁵,
Д. В. Шункевич⁶**

¹ Д. т. н., доцент, заведующий кафедрой промышленной экологии УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: tproless@gmail.com

² Директор по автоматизации производства ОАО «Савушкин продукт», Брест, Беларусь, e-mail: savushkin@savmilk.ru

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru

⁴ К. т. н., доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: bakalenko@belstu.by

⁵ Д. т. н., профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия, e-mail: stepanovsv3@yandex.ru

⁶ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой интеллектуальных информационных технологий УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, e-mail: shunkevich@bsuir.by

Реферат

Выявлены негативные факторы воздействия загрязнений в сточных водах молокоперерабатывающих предприятий: недопустимое снижение концентрации кислорода в воде, эвтрофикация, нарушение штатного функционирования биологических коммунальных очистных сооружений. Выполнен анализ традиционной структуры локальных очистных сооружений молокоперерабатывающих предприятий, который указал на существенные недостатки в управлении их технологическими процессами. Установлено, что на большинстве производств применяются только системы диспетчеризации типа SCADA, что значительно снижает эффективность процессов принятия оперативных управленческих решений. На основе нотаций UML созданы диаграммы управления локальными очистными сооружениями и мойки оборудования цеха сухих молочных продуктов. Выявлено, что в такой процедурной схеме принятия решений основная когнитивная нагрузка остается на специалистах, что делает целесообразным применение для мониторинга водопотребления и управления очисткой сточных вод мультиагентных систем, которые позволяют создавать интегральную информационную экосреду с максимизацией интероперабельности. На основе методологии AOSE (Agent-Oriented Software Engineering) разработано архитектурное и алгоритмическое обеспечение многоагентного мониторинга очистки сточных вод и водопотребления молокоперерабатывающих предприятий. Обоснованы структура и задачи агента «Диспетчер верхнего уровня»; в рамках водопотребления и очистки сточных вод молокоперерабатывающего производства – это координация потоков, ресурсов и экологических рисков между цехами и локальными очистными сооружениями. Приведены потенциальные эффекты от внедрения такой системы в части улучшения OPEX (денежные затраты на электроэнергию, реагенты, утилизацию/хранение/переработку осадка сточных вод, фонд оплаты труда) и CAPEX (денежные затраты на избыточные инвестиции в модернизацию процессов водного цикла и оборудование); указаны позитивные ESG-метрики (уменьшения избыточных денежных затрат на аварийные сбросы и экологические нарушения).

Ключевые слова: молокопереработка, мультиагентная система, мониторинг процессов водопользования, локальные очистные сооружения.

CONCEPT OF MULTI-AGENT APPROACH TO MANAGEMENT OF WATER TREATMENT PROCESSES OF MILK PROCESSING ENTERPRISES

V. N. Shtepa, V. V. Taberko, O. N. Prokopenya, V. I. Bakalenko, S. V. Stepanov, D. V. Shunkevich

Abstract

Negative factors of the impact of pollution in the wastewater of milk processing enterprises were revealed: an unacceptable decrease in the concentration of oxygen in the water, eutrophication, violation of the normal functioning of biological municipal treatment facilities. Analysis of the traditional structure of local treatment facilities of milk processing enterprises was carried out, which indicated significant shortcomings in the management of their technological processes. It has been established that at most production facilities only SCADA dispatching systems are used, which significantly reduces the efficiency of operational management decision-making processes. Based on UML notations, diagrams have been created for managing local treatment facilities and washing equipment of the dry dairy products workshop. It was revealed that in such a procedural decision-making scheme, the main cognitive burden remains on specialists, which makes it expedient to use multi-agent systems for monitoring water consumption and managing wastewater treatment, which allow creating an integral information environment with maximizing interoperability. Based on the AOSE (Agent-Oriented Software Engineering) methodology, architectural and algorithmic support for multi-agent monitoring of wastewater treatment and water consumption of milk processing enterprises has been developed. The structure and tasks of the "Top Level Manager" agent are justified; in the framework of water consumption and wastewater treatment of milk processing production – this is the coordination of flows, resources and environmental risks between workshops and local treatment facilities. The potential effects of implementing such a system in terms of improving OPEX (cash costs for electricity, reagents, disposal/storage/processing of sewage sludge, payroll) and CAPEX (cash costs for excessive investments in modernization of water cycle processes and equipment) are given; positive ESG metrics are indicated (reducing excess cash costs for emergency discharges and environmental violations).

Keywords: milk processing, multi-agent system, monitoring of water use processes, local treatment facilities.

Введение

Сточные воды молокоперерабатывающих предприятий обладают высокой концентрацией органических загрязнителей и при попадании в окружающую среду могут вызывать гибель представителей флоры и фауны из-за дефицита кислорода, эвтрофикацию (цветение) водоемов. В результате их негативного воздействия может иметь место нарушение штатной работы коммунальных очистных сооружений (КОС) [1].

Целесообразно выделить следующие отрицательные эффекты такого антропогенного воздействия:

- недопустимое снижение концентрации кислорода в воде (высокое соотношение значений биологического потребления кислорода (БПК) и химического потребления кислорода (ХПК), поскольку отходы молокопереработки содержат значительные объёмы лактозы и жиров) [2];

- эвтрофикация (высокое содержание азота и фосфора провоцирует цветение водорослей и размножение сине-зелёных бактерий, что снижает светопрозрачность, инициирует гибель гидробионтов, также при отмирании водорослей выделяются токсичные газы) [2];

- нарушение штатного режима работы биологических КОС (залповые выбросы загрязнителей в сточные воды молокоперерабатывающих производств перегружают городские станции очистки, к примеру, лактоза способствует размножению нитчатых бактерий, разрушающих биоценоз активного ила) [1, 3]; молочная кислота и моющие средства (кислотные и щелочные растворы, используемые для СІР-мойки оборудования) быстро во времени значительно изменяют величину рН водных растворов, что губительно для многих водных организмов и микрофлоры почв, особенно для активного ила биологических КОС [3, 4].

При этом традиционная структура локальных очистных сооружений (ЛОС) таких производств включает в себя [3]: механическую и физико-химическую обработку; усреднение для обеспечения равно-

мерных параметров по расходу и концентрациям загрязнителей; биологическую редукцию загрязнителей; переработку осадков сточных вод. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУТП) ЛОС, как правило, способна в автоматическом режиме выполнять функции [5]: контроля и управления оборудованием, дистанционного регулирования, сигнализации и предотвращения аварийных и предаварийных ситуаций; автоматического формирования ретроспективы; оптимизации операционных режимов [6, 7]. Однако на большинстве ЛОС применяются только системы диспетчеризации типа SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), что значительно снижает эффективность принятия оперативных управленческих решений.

Постановка задачи

Анализ недостатков, присущих существующим системам выявленных в ходе мониторинга процессов водопользования молокоперерабатывающих предприятий и очистки их сточных вод, позволяет сделать вывод о целесообразности создания мультиагентной системы оперативного управления с целью улучшения ресурсоэффективности производства и повышения его экологической безопасности.

Структурный анализ процессов управления очисткой сточных вод и водопотребления (на примере мойки оборудования цеха сухих молочных продуктов) молокоперерабатывающих производств

На рисунке 1 представлен пример диаграммы вариантов использования (прецедентов) в нотации UML (Unified modeling language) ЛОС. Актёры – это внешние сущности, которые взаимодействуют с ней, чтобы достичь собственных целей или выполнить определённые задачи. Они обозначают роли, которые могут выполнять пользователи или другие системы в процессе работы с программным обеспечением АСУТП.

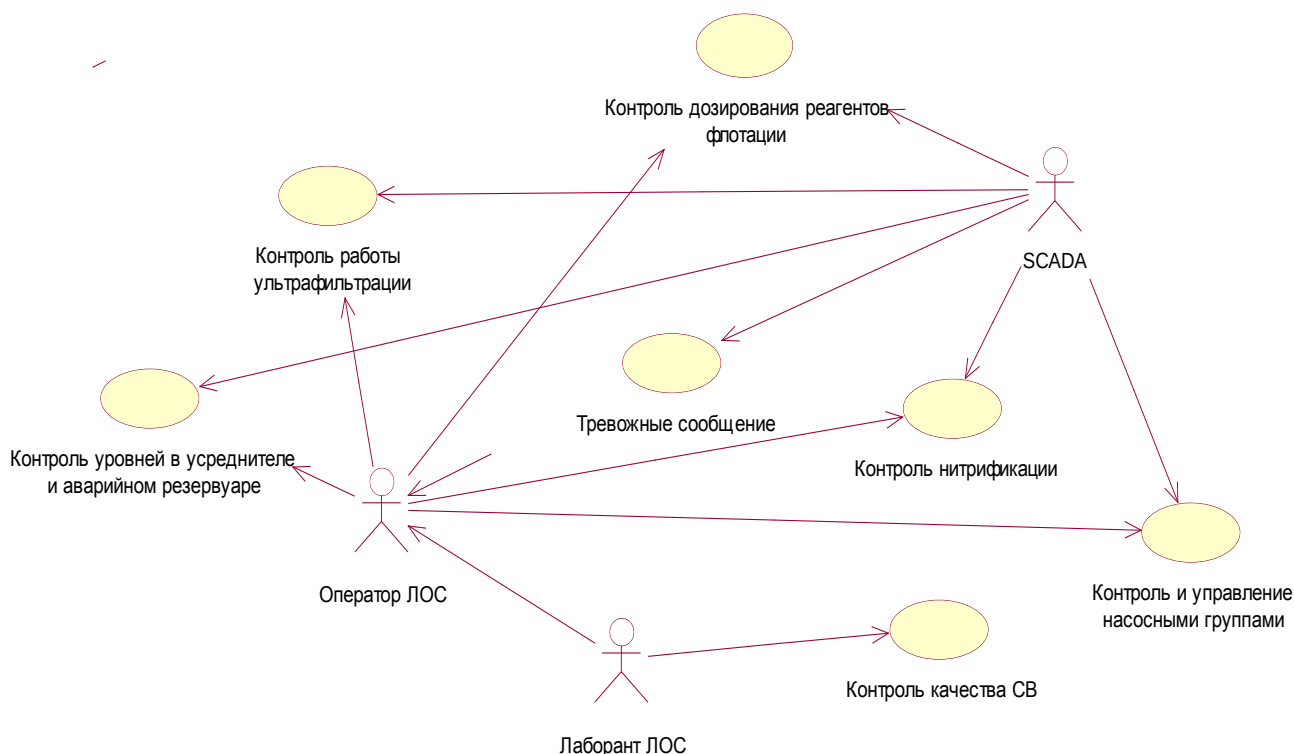


Рисунок 1 – Обобщённая диаграмма вариантов управления локальными очистными сооружениями

Варианты использования (прецеденты) – это действия или функции, которые системная среда предоставляет актёрам. Диаграмма (см. рисунок 1) показывает неоправданное перекрёстное управление ЛОС, как со стороны оператора-человека так и со стороны SCADA, и значительную несистемность (отсутствие единой информационной экосреды)

при поддержании необходимых режимов очистки СВ – абсолютно без координирующей аналитической поддержки такая ситуация приводит к отсутствию интероперабельности (способности различных программных и аппаратных комплексов взаимодействовать друг с другом: обмениваться данными, понимать их и использовать полученную информацию).

На практике аналогичная неинтероперабельность при принятии управленческих решений имеет место и в рамках планирования и реализации мойки технологического оборудования [1], к примеру, цеха сухих молочных продуктов (СМП) (рисунок 2).

Вместе с тем наличие SCADA-системы переводит операции ЛОС и мойки оборудования с уровня «ручного труда» на более высокий уровень контроля. В этой схеме SCADA (см. рисунки 1 и 2) выступает в роли информационной среды, которая агрегирует данные и предоставляет исполнительные механизмы, но «интеллект» системы (целеполагание, анализ трендов и выбор планов действий) полностью возложен на человека-оператора и инженерно-технологических работников (ИТР). Тогда функции оператора (лица, принимающего решения – ЛПР) следующие:

- определение установок для локальных контуров автоматики (например, изменение целеполаганий коррекции pH и/или расхода реагентов во флотаторе);
- анализ графиков (трендов) для выявления скрытых аномалий (например, причины плавного роста трансмембранного давления (ТМД) в установках ультрафильтрации СВ в течение недели);
- ручной запуск сложных кросс-узловых сценариев (команда на старт CIP-мойки (Cleaning in place), переключение СВ в резервную емкость при залповом сбросе).

Недостатками и ограничениями гибридного подхода (штатная работа SCADA вместе с оператором-человеком), несмотря на удобство визуализации, являются (на примере ЛОС) следующие:

- когнитивная перегрузка оператора («информационный шум»): например, в случае масштабного сброса сыворотки SCADA генерирует большое количество аварийных сигналов одновременно по всем узлам (падение кислорода, рост мутности СВ, увеличение ТМД) – человеку требуется значительное время (иногда недопустимое с точки зрения производственной безопасности), чтобы

отфильтровать второстепенные тревоги от первопричины и принять верное решение;

- сохранение фактора «слепого» времени реакции: SCADA показывает аварию на экране, но если оператор не отследил уведомление, то время физического реагирования на критическую ситуацию (например, прорыв жира на мембраны) может составлять от 15 до 40 минут;
- отсутствие автоматической оптимизации OPEX (Operating Expenditure – операционные затраты): SCADA стабилизирует значения параметров, которые ранее ввел человек. Если оператор установил завышенную уставку по расходу кислорода в биореактора (например, 4 мг/дм³ вместо 2,5 мг/дм³), то система будет перерасходовать электроэнергию, не выполняя необходимую коррекцию;
- человеческий фактор при оценке сложных взаимосвязей: SCADA не связывает параметры разных узлов в единую логическую модель. Как вариант, может иметь место демонстрация на мнемосхеме роста мутности СВ на флотаторе и повышения ТМД на мембранах. Проанализировать такие графики, сделав вывод о том, что флотатор не справляется с жиром и создаёт технологические опасности для ультрафильтрации и вовремя скорректировать дозы коагулянтов и флокулянтов – сложная многопараметрическая аналитическая задача, решение которой зависит исключительно от квалификации и внимательности оператора, с чем на реальных коммунально-промышленных объектах, в силу «кадрового дефицита», имеются значительные проблемы.

Соответственно, обосновано использовать для интеллектуального мониторинга (прогноза и контроля) и управления водопотреблением и очисткой сточных вод современные подходы, например, на основе мультиагентных систем (МАС) [8, 9], которые позволяют создавать интегральную информационную среду с максимизацией информационно-технологической интероперабельности.

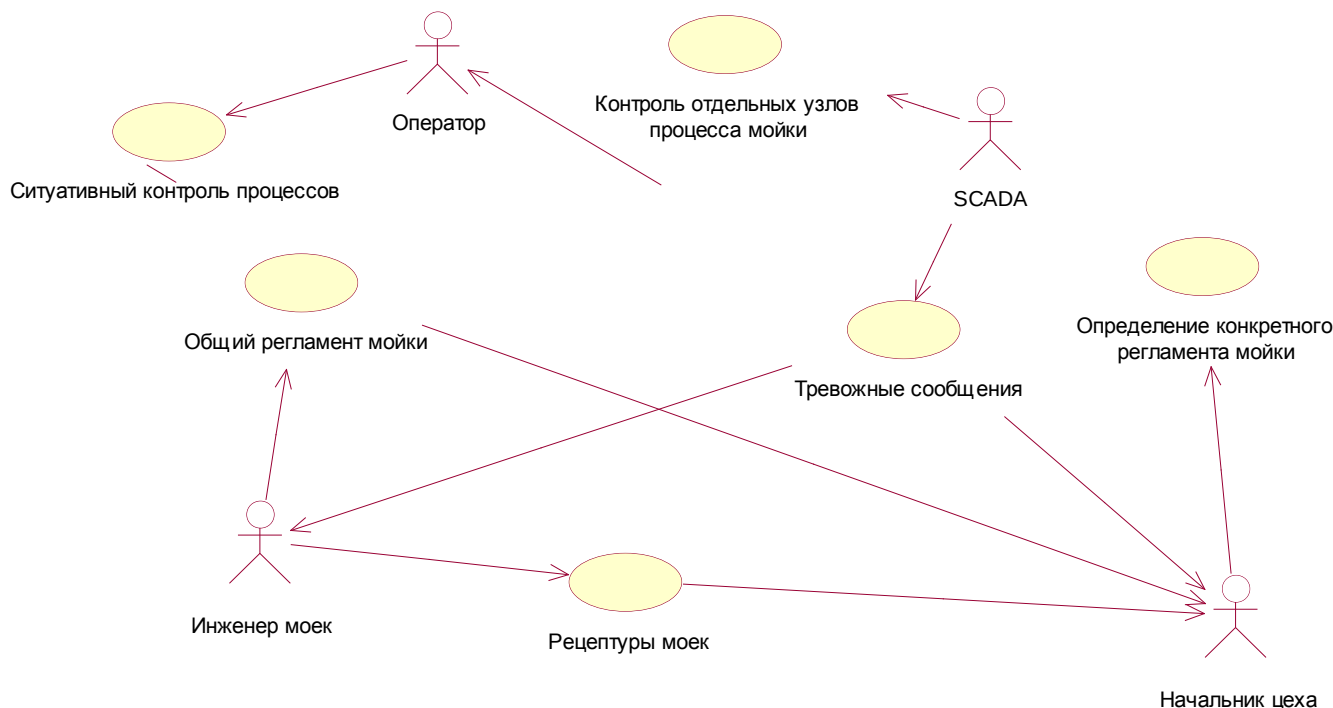


Рисунок 2 – Обобщённая диаграмма процесса управления мойкой цеха сухих молочных продуктов

Обоснование и создание мультиагентной системы управления очисткой сточных вод и водопотреблением молокоперерабатывающих предприятий

В целом создание мультиагентных систем – процесс обоснования и создания решений путем декомпозиции общей задачи на множество автономных интеллектуальных агентов, способных взаимодействовать друг с другом для достижения общей цели.

Процесс создания МАС включает следующие шаги [10–12]:

- 1) декомпозиция задачи – сложный процесс разбивается на параллельно выполняемые подзадачи;
- 2) определение ролей и компетенций – для каждой подзадачи назначается специализированный агент с ограниченной зоной ответственности;
- 3) выделение уровней (уровневая архитектура):
 - бизнес-логика – реализация конкретных функций внутри каждого агента;

– интеграционный слой – обеспечение взаимодействия через стандартизированные протоколы (например, FIPA-ACL (Agent communication language foundation for intelligent physical agents) или фреймворк JADE (Java agent development) [13];

4) проектирование взаимодействия – определение способов обмена данными и координации действий между агентами;

5) настройка автономии – каждый агент проектируется как самостоятельная единица, способная принимать решения без прямого внешнего управления, но в интересах всей системы.

В дальнейшем будет применён шаблон проектирования мониторинга использования водных ресурсов молокозаводом по методологии AOSE (Agent-Oriented Software Engineering) [14, 15]. В его рамках процесс агентизации (разработки MAC) представляет собой структурированный жизненный цикл, который решает задачу повышения эффективности потребления водных ресурсов и их очистки.

Вариант архитектуры MAC для мониторинга функционирования ЛОС молокозавода представлен на рисунке 3.

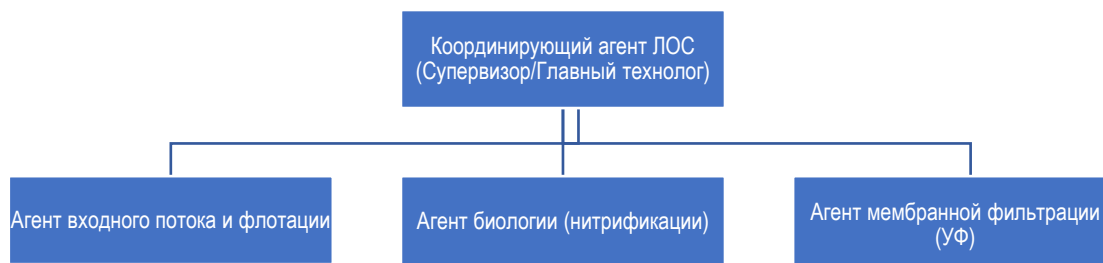


Рисунок 3 – Архитектура MAC мониторинга функционирования ЛОС

Роль «Агента входного потока СВ и флотации»: подача стабильного по pH и максимально очищенного от жиров субстрата на биологическую ступень водообработки.

Контролируемые параметры среды (Beliefs): объемы СВ в усреднителе и аварийном резервуаре, текущий pH, мутность, концентрация жиров на входе и выходе флотатора.

Доступные управляющие действия (Intentions): регулирование подачи СВ, дозирование кислоты/щелочи для коррекции pH, изменение рабочих доз коагулянта и флокулянта.

Протокол взаимодействия: предупреждает «Агента биологии» (биологической очистки) о недопустимом увеличении соотношения ХПК/БПК или риске проскока жира.

Роль «Агента биологии»: поддержание оптимальной экосистемы для бактерий-нитрификаторов и минимизация концентрации аммония (NH_4^+) на выходе.

Контролируемые параметры среды (Beliefs): уровень растворенного кислорода (DO), pH в аэротенке.

Протокол взаимодействия: передает «Агенту ультрафильтрации» данные о концентрации биомассы; запрашивает у «Агента входного потока и флотации» снижение расхода при дефиците кислорода.

Роль «Агента мембранной фильтрации»: обеспечение бесперебойного отвода очищенной воды (пермеата) при максимальном сохранении ресурса мембран.

Контролируемые параметры среды (Beliefs): трансмембранное давление, удельный поток.

Доступные управляющие действия (Intentions): переключение режимов работы (фильтрация/обратная промывка/химическая CIP-мойка), регулирование мощности фильтрационных насосов.

Протокол взаимодействия: при критическом росте ТМД отправляет запрос «Координирующему агенту» на остановку фильтрации для проведения экстренной мойки.

Роль «Координирующего агента ЛОС»: максимизация общей эффективности очистки при минимизации стоимости ресурсов (расхода электроэнергии и реагентов).

Контролируемые параметры среды (Beliefs): общий баланс СВ на ЛОС, текущие тарифы на электроэнергию, интегральные показатели сброса (отведения), запасы реагентов.

Доступные управляющие действия (Intentions): корректировка целевых установок для локальных агентов, инициация аварийных режимов (перевод стока в буферный резервуар).

Протокол взаимодействия: принимает телеметрию от всех агентов, координирует их действия при пиковых нагрузках и оптимизирует затраты в режиме реального времени.

Для цеха сухих молочных продуктов молокозавода рассмотрим конкретный пример агентизации узла CIP-мойки вакуум-выпарной установки (BBU).

Архитектура агентов для узла мойки BBU.

1. «Агент-датчик контура»:

– роль – непрерывный измерительный мониторинг физической среды;

– Beliefs (убеждения/знания (текущие) о параметрах объекта) – результаты измерений;

– Desires (желания/цели) – обеспечить точность и непрерывность данных; первично классифицировать состояние среды (например, идет фаза щелочной мойки, но параметры pH водного раствора ниже нормативных);

– Intentions (намерения/планы) – например, каждые 500 миллисекунд опрашивать OPC UA-сервер (Open platform communications unified architecture), фильтровать шумы датчиков, при отклонении параметров более чем на 5 % немедленно отправлять структурированное ACL-сообщение «Агенту-координатору».

2. «Агент-координатор» BBU:

– Роль – защита интересов конкретного технологического оборудования;

– Beliefs – например, предыдущий цикл варки длился 20 часов (потенциально сильное налипание белка на трубках каландра); текущий статус – «Требуется усиленная мойка»;

– Desires – добиться 100 % чистоты внутренних поверхностей;

– Intentions – сформировать запрос к «Агенту-рецепту» на подбор оптимальной программы очистки с учетом тяжести загрязнения; отклонять команды на запуск производства, пока «Агент-датчик» не подтвердит необходимую чистоту поверхностей (на основе электропроводности водного раствора).

3. «Агент-рецепт»:

– роль – экспертная система и база знаний стандартов мойки;

– Beliefs – хранит профили процессов мойки;

– Desires – минимизировать время простоя оборудования

при строгом соблюдении регламента безопасности;

– Intentions – получить данные от «Агента-координатора» BBU, рассчитать динамический профиль (например, увеличить время циркуляции щелочи на 10 минут из-за риска пригара) и передать эту инструкцию «Агенту CIP-станции».

4. «Агент CIP-станции»:

– роль – управление подачей реагентов, насосами и клапанами;

– Beliefs – например, в баке концентрированной щелочи осталось 200 литров; дозирующий насос № 2 исправен; насос возврата работает;

– Desires – удерживать заданные «Агентом-рецептом» параметры;

– Intentions – открывать клапан подачи концентрата короткими импульсами, отслеживая реакцию через «Агента-датчика».

Разработка архитектуры и алгоритмическо-технологической части МАС сквозного мониторинга ресурсоэффективности и экологической безопасности использования водных ресурсов

Традиционно в мультиагентных системах роль «Супер-агента» выполняет «Агент-диспетчер верхнего уровня» [16, 17]. В рамках водопотребления молокоперерабатывающего предприятия его задача – балансировать потоки, ресурсы и экологические риски между производством (например, цехом сухих молочных продуктов) и локальными очистными сооружениями.

1. Прогнозирование и планирование пиковых нагрузок.
 2. Динамическое управление гидравлическим и химическим балансом.
 3. Регулирование параметров повторного использования ресурсов.
 4. Интеллектуальный мониторинг мойки и экологический контроль.
- «Агент-диспетчер верхнего уровня» выступает в роли независимого цифрового аудитора:

– сквозной трекинг инцидентов – к примеру, если «Агент-Датчик» в цеху СМП зафиксировал утечку концентрированной щелочи (авария клапана), то «Агент-диспетчер верхнего Уровня» переводит ЛОС в «Режим нештатной ситуации» – СВ изолируются в аварийный бак, минуя активный ил азотенков;

– формирование «Зеленого паспорта» смены – автоматическая генерация отчетов: сколько сырья переработано, сколько кислоты, щелочи и других моющих средств потрачено, какой углеродный след и объемы ХПК/БПК отведены в городскую канализационную сеть (сброшены в природный водоём) после ЛОС.

Таким образом «Агент-диспетчер верхнего уровня» будет выполнять функцию технологического OLAP (Online analytical processing) и CALS (Continuous acquisition and lifecycle support) (рисунок 4) [18].

Вместе с тем принятие управленческих решений на уровне руководства предприятий обязательно сопровождается оценкой финансовой модели (денежных потоков). МАС мониторинга использования водных ресурсов за счет реализации эффективных режимов водного цикла улучшает (таблица 1) [19]:

- OPEX (operating expenditure) – денежные затраты на электроэнергию, реагенты, утилизацию/хранение/переработку осадка сточных вод, фонд оплаты труда;
- CAPEX (Capital Expenditure) – денежные затраты на инвестиции в модернизацию процессов водного цикла и оборудование; создание дополнительного производства переработки осадка сточных вод;
- ESG-метрики (Environmental, Social, Governance) – аварийные сбросы и экологические нарушения или денежные затраты на их предотвращение.

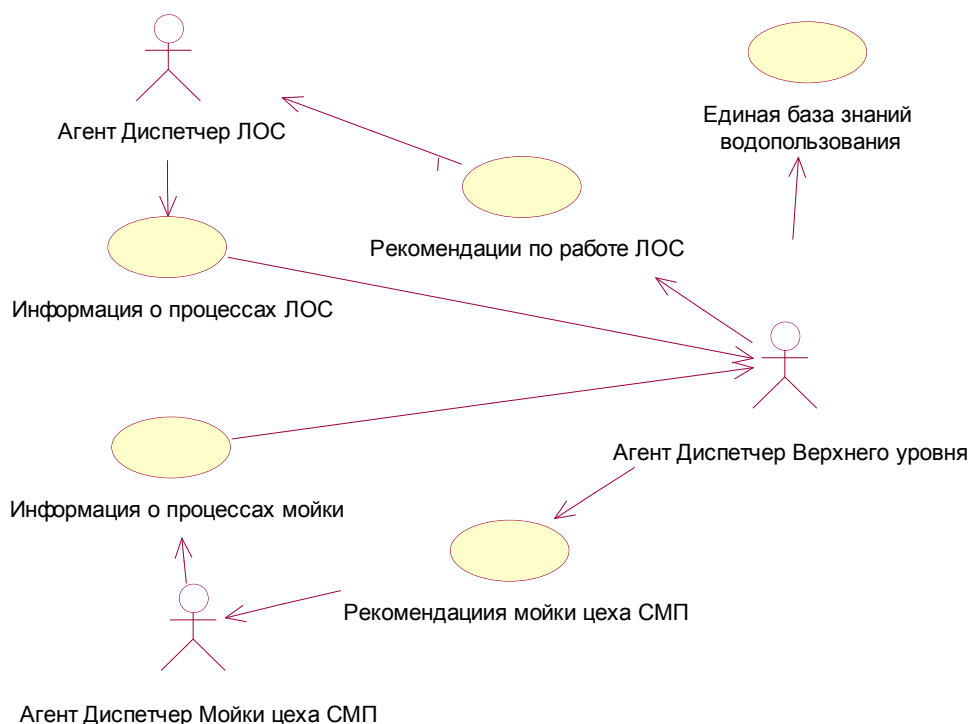


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования агентов МАС мониторинга водопотребления (мойки оборудования цеха СМП) и очистки сточных вод: «Диспетчера верхнего уровня», «Диспетчера ЛОС», «Диспетчера мойки цеха СМП»

Таблица 1 – Потенциальные эффекты от внедрения МАС мониторинга использования водных ресурсов молокоперерабатывающими производствами

Показатель	Потенциальный достигаемый эффект
OPEX	Снижение расхода: электроэнергии – до 30 % реагентов – до 15 % фонда оплаты труда – до 30 %
CAPEX	Уменьшение избыточных инвестиций в оборудование. Своевременная модернизация и реконструкция на основе более точного прогноза и оценки технического состояния – возможность повышения эффективности использования финансовых ресурсов
ESG	Риск аварийных сбросов и экологических нарушений – значительно ниже

Таким образом, можно сформулировать задачи интеллектуально-го мониторинга водопользования производства молочных продуктов:

– аналитическая обработка экспертных заключений, данных лабораторных анализов и информации от измерительных средств;

– формирование оперативных рекомендаций по действиям оператора SCADA ЛОС и производственных цехов в рамках задач технологического регламента;

- формирование оперативных логических прогнозов экологических рисков вызванных возможностью нерегламентной работы ЛОС и производственных цехов;
- формирование оперативных отчётов о выполнении целевых показателей КРП (расход электроэнергии и другие затраты);
- формирование оперативных логических прогнозов по работе технологического оборудования;
- интерфейсное взаимодействие с ИТР с целью обновления технологической базы знаний, например, на основе методологии OSTIS [8];
- особый акцент при разработке ПО необходимо сделать на интерфейсные решения, которые обеспечивают взаимодействие МАС с инженерно-технологическими специалистами; локальные контроллеры также представляют виртуальных актёров и должны реализовываться на основе мультиагентного подхода – им делегируются логическое ранжирование данных получаемых от измерительных средств;
- стратегическая задача – качественное повышение интероперабельности всей производственной информационной системы, куда включены и специалисты организации с дальнейшим переходом к объектовым (корпоративным) интеллектуальным платформам [20].

Заключение

Предлагаемый мультиагентный подход к управлению процессами очистки сточных вод предприятий молочной промышленности может быть использован для разработки инфраструктуры цифровой среды при решении разнородных задач интегрированного информационно-аналитического обеспечения:

- организации защищенного единого информационного пространства абонентов – участников интегрированной автоматизированной системы с целью обеспечения их информационного взаимодействия на этапах испытаний и эксплуатации оборудования и поддержки принятия решений;
- интеграции и каталогизации данных и знаний о водопользовании в процессах выработки и реализации управленческих решений, например на основе цифровых двойников (хронологии и ретроспективы по всем стадиям процессов применения на единых принципах интерпретации, обработки, анализа и представления информации);
- автоматизации процессов информационно-аналитического обеспечения на основе единой цифровой платформы непрерывной предиктивной, ретроспективной и дополненной аналитики и обработки распределенных данных и знаний, мониторинга и поддержки принятия управленческих решений, в том числе, в режиме реального времени.

Дальнейшие исследования актуально сфокусировать на создании математических моделей локального уровня (агентов), с учётом их дальнейшей интеграции в цифровую платформу ресурсопользования предприятия по производству молочных продуктов.

Список цитированных источников

1. Штепа, В. Н. Прикладные аспекты использования технологии OSTIS при информационном обеспечении цифровизации процессов водопользования молокоперерабатывающих предприятий / В. Н. Штепа, Э. Н. Муслимов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : сборник научных трудов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. В. Голенков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – Вып. 8. – С. 171–176.
2. Директива 2000/60/ЕС Европейского Парламента и Совета от 23 октября 2000 г., устанавливающая рамки для деятельности Сообщества в области водной политики // Официальный журнал Европейского Союза (Official Journal of the European Union). – 2000. – L 327. – 73 с.
3. Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky, Y. Chernysh, V. Shtepa [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 3744. – DOI: 10.3390/w15213744.
4. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / E. Molina-Navarro, P. Segurado, P. Branco [et al.] // Limnologia. – 2020. – Vol. 80. – P. 125742. – DOI: 10.1016/j.limno.2019.125742.
5. Штепа, В. Н. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения / В. Н. Штепа, Н. Ю. Золотых, С. Ю. Киреев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки: научный журнал. – 2023. – № 1. – С. 94–103.
6. Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks / V. Shtepa, M. Balintova, Ye. Chernysh [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 16. – P. 7551.
7. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования pH / В. Н. Штепа, В. А. Кудинов, О. Н. Прокопеня, Э. Н. Муслимов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 149–155. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-149-155.
8. Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения : монография / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина, Д. В. Шункевич [и др.]; под ред. В. В. Голенкова. – Минск : Бестпринт, 2023. – 1064 с.
9. Integrated Automation of Water Disposal in Terms of Interoperability of Monitoring and Control Processes / I. Voitov, V. Shtepa, M. Okhtilev [et al.] // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : research papers collection / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov (Editor in chief) [et al.]. – Minsk, 2025. – Iss. 9. – P. 193–198.
10. Поспелов, Д. А. Многоагентные системы – настоящее и будущее / Д. А. Поспелов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1998. – № 1. – С. 14–21.
11. Phan, T. Pathfinding in Multi-Agent Systems via Multi-Agent Reinforcement Learning / T. Phan, T. Gabor // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2026. – Vol. 40, No. 1. – P. 15–32. – DOI: 10.1007/s10458-026-09642-x.
12. Глущенко П. В. Активно-адаптивные электросети: интеллектуальный мультиагентный диагностико-прогнозирующий комплекс и интеллектуальный алгоритм мультиагента решений диагностического мониторинга / П. В. Глущенко // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2014. – № 8 (68). – С. 1–5.
13. Malik F. H. A review: Agents in smart grids / F. H. Malik, M. Lehtonen // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 131. – P. 71–79. – DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.004.
14. Multi-agent systems for grid energy management: A short review / R. Robin, B. Blunier, A. Miraoui [et al.] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2010. – P. 3341–3346. – DOI: 10.1109/IECON.2010.5675295.
15. Kiran, P. Multi-agent based systems on micro grid – a review / P. Kiran, K. R. M. V. Chandrakala, T. N. P. Nambiar // 2017 international conference on intelligent computing and control (I2C2). – IEEE, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/I2C2.2017.8321880.
16. Morstyn, T. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview / T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 3652–3666. – DOI: 10.1109/TSG.2016.2637958.
17. Poggi, A. Extending JADE for agent grid applications / A. Poggi, M. Tomaiuolo, P. Turci // 13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. – IEEE, 2004. – P. 352–357. – DOI: 10.1109/ENABE.2004.30.
18. Bellifemine, F. L. Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Chichester : John Wiley & Sons, 2007. – Vol. 7. – 300 p.
19. Карцан, И. Н. Современные поисковые системы в сети Интернет: анализ принципов работы и классификация / И. Н. Карцан, В. В. Кожевников, П. В. Зеленков // Вестник НИИ СУВБП : сб. науч. тр. / под общ. ред. Н. В. Василенко. – Красноярск : НИИ СУВБП, 2006. – Вып. 23. – С. 221–227.

20. Охтилев, М. Ю. Интеллектуальная информационно-аналитическая платформа управления организациями ВКХ / М. Ю. Охтилев, В. Н. Штепа, В. И. Баженов // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2025. – № 2. – С. 20–29.

References

1. SHtepa, V. N. Prikladnye aspekty ispol'zovaniya tekhnologii OSTIS pri informacionnom obespechenii cifrovizatsii processov vodopol'zovaniya molokopererabatyvayushchih predpriyatij / V. N. SHtepa, E. N. Muslimov // Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : sbornik nauchnyh trudov / Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki ; redkol.: V. V. Golenkov (gl. red.) [i dr.]. – Minsk, 2024. – Vyp. 8. – S. 171–176.
2. Direktiva 2000/60/ES Evropejskogo Parlamenta i Soveta ot 23 oktyabrya 2000 g., ustanavlivayushchaya ramki dlya deyatelnosti Soobshchestva v oblasti vodnoj politiki // Oficial'nyj zhurnal Evropejskogo Soyuza (Official Journal of the European Union). – 2000. – L 327. – 73 s.
3. Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky, Y. Chernysh, V. Shtepa [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 3744. – DOI: 10.3390/w15213744.
4. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / E. Molina-Navarro, P. Segurado, P. Branco [et al.] // Limnologica. – 2020. – Vol. 80. – P. 125742. – DOI: 10.1016/j.limno.2019.125742.
5. SHtepa, V. N. Obosnovanie i skhemy ispol'zovaniya ranzhiruyushchih izmeritel'nyh sistem ekologicheskogo monitoringa i intellektual'nogo analiza rezhimov vodootvedeniya / V. N. SHtepa, N. YU. Zolotyh, S. YU. Kireev // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki: nauchnyj zhurnal. – 2023. – № 1. – S. 94–103.
6. Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks / V. Shtepa, M. Balintova, Ye. Chernysh [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 16. – P. 7551.
7. Prediktivnoe upravlenie processom biologicheskoy ochistki stochnyh vod na osnove nejrosetevogo prognozirovaniya rN / V. N. SHtepa, V. A. Kudinov, O. N. Prokopenya, E. N. Muslimov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 149–155. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-149-155.
8. Tekhnologiya kompleksnoj podderzhki zhiznennogo cikla semanticheski sovместimyh intellektual'nyh komp'yuternyh sistem novogo pokoleniya : monografiya / V. V. Golenkov, N. A. Gulyakina, D. V. SHunkevich [i dr.]; pod red. V. V. Golenkova. – Minsk : Bestprint, 2023. – 1064 s.
9. Integrated Automation of Water Disposal in Terms of Interoperability of Monitoring and Control Processes / I. Voitov, V. Shtepa, M. Okhtilev [et al.] // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : research papers collection / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov (Editor in chief) [et al.]. – Minsk, 2025. – Iss. 9. – P. 193–198.
10. Pospelov, D. A. Mnogoagentnye sistemy – nastoyashchee i budushchee / D. A. Pospelov // Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. – 1998. – № 1. – S. 14–21.
11. Phan, T. Pathfinding in Multi-Agent Systems via Multi-Agent Reinforcement Learning / T. Phan, T. Gabor // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2026. – Vol. 40, No. 1. – P. 15–32. – DOI: 10.1007/s10458-026-09642-x.
12. Glushchenko P. V. Aktivno-adaptivnye elektroseti: intellektual'nyj mul'tiagentnyj diagnostiko-prognoziruyushchij kompleks i intellektual'nyj algoritm mul'tiagenta reshenij diagnosticheskogo monitoringa / P. V. Glushchenko // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauchnyj zhurnal. – 2014. – № 8 (68). – S. 1–5.
13. Malik F. H. A review: Agents in smart grids / F. H. Malik, M. Lehtonen // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 131. – P. 71–79. – DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.004.
14. Multi-agent systems for grid energy management: A short review / R. Robin, B. Blunier, A. Miraoui [et al.] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2010. – P. 3341–3346. – DOI: 10.1109/IECON.2010.5675295.
15. Kiran, P. Multi-agent based systems on micro grid – a review / P. Kiran, K. R. M. V. Chandrakala, T. N. P. Nambiar // 2017 international conference on intelligent computing and control (I2C2). – IEEE, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/I2C2.2017.8321880.
16. Morstyn, T. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview / T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 3652–3666. – DOI: 10.1109/TSG.2016.2637958.
17. Poggi, A. Extending JADE for agent grid applications / A. Poggi, M. Tomaiuolo, P. Turci // 13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. – IEEE, 2004. – P. 352–357. – DOI: 10.1109/ENABL.2004.30.
18. Bellifemine, F. L. Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Chichester : John Wiley & Sons, 2007. – Vol. 7. – 300 p.
19. Karcan, I. N. Sovremennye poiskovyie sistemy v seti Internet: analiz principov raboty i klassifikaciya / I. N. Karcan, V. V. Kozhevnikov, P. V. Zelenkov // Vestnik NII SUVPT : sb. nauch. tr. / pod obshch. red. N. V. Vasilenko. – Krasnoyarsk : NII SUVPT, 2006. – Vyp. 23. – S. 221–227.
20. Ohtilev, M. YU. Intellektual'naya informacionno-analiticheskaya platforma upravleniya organizatsiyami VKKH / M. YU. Ohtilev, V. N. SHtepa, V. I. Bazhenov // Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya. – 2025. – № 2. – S. 20–29.

Материал поступил 29.06.2026, одобрен 02.07.2026,
принят к публикации 22.07.2026