

УДК 681.512.8

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-11-23

EDN: AJWNQQ

Научная статья

## Цифровой двойник SCADA-интегрированной станции СІР-мойки

В. С. Артемьев

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова  
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

**Аннотация.** В условиях ужесточения санитарных требований и постоянного роста цен на энерго- и водоресурсы процессы СІР-очистки становятся все более значимыми с точки зрения затрат пивоваренного предприятия. Оптимизация традиционными методами затруднена, процессы нелинейны, зависят от состава производимого продукта и требуют строгого соблюдения условий безопасности, особенно при работе со стеклянной тарой. С учетом этих факторов была сформулирована задача разработки комплексного цифрового решения, позволяющего управлять СІР-процессом более эффективно.

**Цель исследования** – создание цифрового двойника станции СІР, способного в реальном времени формировать оптимальный по ресурсопотреблению профиль режимов – с учетом расхода, температуры и времени – и обеспечивать его прямое исполнение в среде промышленной SCADA. В основе решения лежит математическая модель, включающая сопряженную систему неявных разностных уравнений, описывающих процессы тепло- и массообмена, а также гидравлический баланс трубопроводной сети.

**Методы.** Оптимизация осуществляется на базе итерационного алгоритма динамического программирования, который минимизирует совокупные затраты пара, электроэнергии и химических реагентов при соблюдении гигиенических норм остаточного загрязнения.

**Результаты.** Для обеспечения совместимости с промышленной SCADA-средой реализована автогенерация кода в формате S-функции для переноса модели из MATLAB/Simulink без необходимости дополнительной адаптации. Проверка решения в реальных условиях была проведена на пилотной линии с производительностью 60 000 бутылок в час. В течение 30 последовательных суточных циклов цифровой двойник показал стабильность и высокую точность, отклонения от логов SCADA-системы не превышали 0,4 °С по температуре и 1,2 % по расходу раствора.

**Выводы.** Внедрение оптимизированных профилей позволило сократить длительность полного цикла СІР на 10–15 %, а потребление щелочи и пара снизить в среднем на 20 % при сохранении микробиологической чистоты оборудования. Полученные результаты подтверждают не только техническую реализуемость предлагаемого подхода, но и его экономическую целесообразность.

**Ключевые слова:** динамическое программирование, энергетическая оптимизация, тепло- и массообмен, пивоварение

Поступила 09.06.2025, одобрена после рецензирования 15.06.2025, принята к публикации 11.07.2025

**Для цитирования.** Артемьев В. С. Цифровой двойник SCADA-интегрированной станции СІР-мойки // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 4. С. 11–23. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-11-23

## Digital twin for CIP-washing station with SCADA system

V.S. Artemyev

Plekhanov Russian University of Economics  
115054, Russia, Moscow, 36 Stremyanny lane

**Abstract.** Due to stricter sanitary and hygienic standards and the constant increase in prices for energy and water resources, the importance of CIP purification processes is growing in terms of cost for breweries. Optimization by traditional methods is difficult, the processes are nonlinear, depend on the composition of the product and require strict compliance with safety conditions, especially when working with glass containers. Consequently, the task for effective CIP systems is formulated considering the above factors.

**Aim.** To create a digital twin system for CIP station, capable to generate an optimal operating profile in real-time, taking into account factors like flow, temperature, and time, and to ensure direct industrial SCADA system implementation. The solution is based on a mathematical model that incorporates a system of implicit differential equations describing the processes of heat and mass transfer as well as the hydraulic equilibrium of the pipeline network.

**Methods.** Optimization is performed using an iterative dynamic programming algorithm that minimizes the total costs of steam, electricity, and chemicals, while maintaining hygienic standards for residual contamination.

**Results.** To ensure compatibility with the industrial SCADA environment, we have employed automatic code generation in the S-function to transfer the model from MATLAB/Simulink, eliminating the need for additional adaptation. A pilot real-world test was carried out for 60000 bottles per hour. During 30 consecutive days, the digital twin demonstrated stability and high accuracy, deviations from the SCADA logs did not exceed 0.4 °C in temperature and 1.2 % in solution consumption.

**Conclusions.** The introduction of profile-guided optimization cut the CIP cycle time by 10–15 % and reduce the consumption of caustic and steam by an average of 20 %, while maintaining the microbiological purity of the equipment. The results obtained confirm both the technical and economic feasibility of the proposed approach.

**Keywords:** dynamic programming, energy optimization, heat and mass transfer, brewing

Submitted on 09.06.2025,

approved after reviewing on 15.06.2025,

accepted for publication on 11.07.2025

**For citation.** Artemyev V.S. Digital twin for CIP-washing station with SCADA system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 4. Pp. 11–23. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-3-11-23

### ВВЕДЕНИЕ

Индустрия напитков, в том числе пивоваренная, предъявляет к процессу CIP-мойки одновременно строгие санитарно-гигиенические и экономические требования. Санитарные регламенты НАССР, ЕС 852/2004 определяют нижние пределы температуры, концентрации моющего раствора и длительности экспозиции, в то время как корпоративные программы устойчивого развития диктуют снижение расхода воды, пара и химикатов. Классические алгоритмы управления CIP-станциями строятся на параметризованных временных диаграммах, что приводит либо к чрезмерному перерасходу ресурсов, либо к риску недомойки при отклонении начальных условий процесса (температура оборудования, степень загрязнения и т. д.) [1].

Современные тенденции цифровой трансформации предлагают решение в виде цифровых двойников – виртуальных копий технологических объектов, которые функционируют

параллельно с реальной установкой, принимая во внимание изменяющиеся входные воздействия и параметры среды. Для большинства пищевых производств, однако, реализация цифрового двойника затруднена необходимостью учитывать многокомпонентный тепло-массоперенос, фазовые переходы и явления вспенивания, а также синхронизировать расчеты с контроллерами реального времени. Практика показывает, что без сквозной интеграции с SCADA-системой цифровой двойник остается исследовательским инструментом и не преобразуется в операционную выгоду [2].

**Целью исследования** является решение указанных проблем через построение связанной разностной модели СІР-контура, включающей одновременно уравнения гидродинамики и теплопереноса, и ее автоматизированный экспорт в SCADA-ядро. Модель формируется в MATLAB / Simulink с использованием неявной схемы Кранка–Николсона для температуры и схемы Мак-Кормика для расхода, что обеспечивает численную устойчивость при шаге расчета 1–5 мс. Далее с помощью механизма S-функций генерируется код, полностью совместимый с SCADA-платформой, что исключает расхождение алгоритмических версий и упрощает валидацию по GMP. Оптимизация ресурсопотребления достигается итеративным алгоритмом динамического программирования: целевая функция минимизирует суммарные затраты энергии и реагентов с учетом штрафа за отклонение концентрации и температуры от санитарных нормативов. Алгоритм работает в скользящем режиме 10–15 мин., что позволяет адаптироваться к фактическим условиям процесса без нарушения производственного графика [3].

Статья обосновывает выбор математического аппарата, описывает реализацию механизма «модель ↔ SCADA», демонстрирует результаты проверочных испытаний и дает методику расчета экономического эффекта. Отдельно рассмотрены вопросы сертификации и функциональной безопасности, а также перспективы масштабирования подхода на другие гигиенически критичные контуры пищевых производств.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Текущая практика управления станциями СІР-мойки опирается на жестко заданные временно-температурные диаграммы: оператору доступно лишь предварительное задание продолжительности подэтапов, фиксированная концентрация моющих растворов и дискретный выбор температуры. Данный регламент неизбежно формирует заведомый технологический запас, призванный нивелировать неопределенность исходных условий – загрязненность поверхностей, температуру оборудования, тепловую инерцию трубопроводов. Итогом становится перерасход пара, воды и щелочных реагентов. Попытки сократить этот запас методом эмпирической настройки немедленно сталкиваются с опасностью микробиологического брака: разовое недогревание или недостаточная экспозиция раствора на «слепом» участке контура приводит к микроорганизмам в готовом продукте, что недопустимо по санитарным нормативам.

На теоретическом уровне проблема сводится к необходимости непрерывного прогноза теплового и гидравлического поведения многокамерной СІР-системы, включающей смешанные конденсационные и испарительные процессы, переменное сопротивление трубопроводов из-за вспенивания и нелинейные потери тепла в окружающую среду. Модели подобного уровня сложности существуют в виде научных прототипов, реализованных в математических пакетах, однако они остаются оторваны от контуров реального времени. Вычислительный шаг 1–5 мс, необходимый для аппроксимации, не синхронизируется с циклом промышленного ПЛК, а результаты моделирования не могут напрямую влиять на исполнительные органы в среде SCADA. Отсутствие сквозной связи «цифровой двойник –

контроллер – НМІ» обрекает даже самые подробные расчеты на роль экспертной справки, лишенной воздействия на энергоресурсные показатели [4–5].

При высоком уровне автоматизации современного пивоваренного производства не всегда используется динамическая оптимизация СІР-процесса. Требуется перевод теплогидродинамической модели из исследовательской среды в контур реального времени без потери устойчивости и при гарантированном соблюдении санитарных норм. Проблема, решению которой посвящается работа, – создание цифрового двойника СІР-станции, способного функционировать синхронно с ПЛК-SCADA-системой, непрерывно пересчитывая оптимальный режим подачи моющих растворов и тепловой энергии, и одновременно обеспечивать микробиологический барьер. Решение требует алгоритмической разработки, обоснованной стратегии оптимизации, устойчивой к шумам, сезонному изменению параметров технологии. Пока подобная методология не создана, СІР-станции остаются узким местом ресурсной эффективности, а потенциал цифровых данных раскрывается лишь частично [6].

Цикл СІР-мойки является определяющим фактором санитарной безопасности напитков, но одновременно остается одним из наиболее ресурсоемких процессов. Типовые рецептуры, основанные на фиксированных временных диаграммах, не учитывают начальную температуру аппаратов, степень органической нагрузки и динамику вспенивания. Это приводит к систематическому перерасходу моющих растворов (10–20 %) и пара (5–15 %) либо к риску недомойки оборудования при отклонении температурно-концентрационных параметров от номинала. Существующие модели СІР-контуров фрагментарно описывают либо гидродинамику через упрощенные уравнения Бернулли и Дарси–Вейсбаха, либо тепломассоперенос через одномерные балансные схемы. Отсутствие связанного решения обуславливает невозможность точного прогноза температуры и концентрации в критической зоне «слепых» участков трубопроводов. Кроме того, подавляющее большинство цифровых двойников реализуются в средах моделирования без прямого сопряжения с промышленной SCADA. В итоге возникает рассогласование временной базы: вычислительный шаг модели 1–5 мс не синхронизирован с циклом опроса ПЛК 2–4 мс, что делает двойник непригодным для оперативного управления. Задача усугубляется отсутствием алгоритма оптимизации, способного в реальном времени формировать ресурсосберегающую траекторию расход – температура – время, при соблюдении микробиологических нормативов. Применение методов стохастического градиента или генетических алгоритмов затруднено из-за больших вычислительных затрат и невозможности гарантировать соблюдение санитарных ограничений на каждом шаге.

Формулируемая проблема заключается в интеграции перечисленных компонентов в единый цифровой двойник, функционирующий параллельно реальной СІР-станции и способный в режиме on-line адаптировать профиль мойки к изменяющимся условиям без нарушения производственного расписания [7]. Решение проблемы позволяет сократить эксплуатационные затраты, создает основу для тиражирования «умных» санитарных контуров на другие предприятия пищевой промышленности.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поток моющего раствора рассматривается как одномерная несжимаемая среда в протяженном трубопроводе длиной  $L$  с поперечным сечением  $A$ . Пусть  $T(x, t)$  – температура,  $C(x, t)$  – объемная концентрация активного вещества,  $v(t)$  – скорость объемного расхода, которая принимается равномерной вдоль трубы при условии полного перемешивания.

Тепловой и массоперенос описываются системой:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + v(t) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h}{\rho c A} (T - T_{\text{env}}), \\ [6pt] \frac{\partial C}{\partial t} + v(t) \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - R(C, T), \end{cases} \quad x \in [0, L], t \geq 0.$$

Здесь  $k$  – коэффициент теплопроводности раствора,  $\rho, c$  – плотность и теплоемкость,  $h$  – коэффициент теплопередачи через стенку,  $T_{\text{env}}$  – температура окружающей среды,  $D$  – эффективный коэффициент диффузии,  $R(C, T)$  – скорость необратимой деструкции активного вещества псевдопервого порядка.

Краевые условия:  $T(0, t) = T_{\text{in}}(t)$ ,  $C(0, t) = C_{\text{in}}(t)$ , на выходе:  $\partial T / \partial x = \partial C / \partial x$ ,  $x = 0$  – непроницаемость.

Минимальные санитарные требования предписывают  $T(x, t) \geq T_{\text{min}}$ ,  $C(x, t) \geq C_{\text{min}} \quad \forall x, t$ , где  $T_{\text{min}}, C_{\text{min}}$  – порог дезинфекции.

Пусть ось разбита на  $N$  равных ячеек  $\Delta x = L / N$ , а время – на шаги  $\Delta t$ . Обозначим  $T_i^n \approx T(x_i, t_n)$ ,  $C_i^n \approx C(x_i, t_n)$ . Для температурного поля используются неявная схема Кранка–Николсона, условная устойчивость и второй порядок по  $\Delta x, \Delta t$ :

$$T_i^{n+1} = T_i^n - \frac{v^{n+1} \Delta t}{2 \Delta x} (T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1} + T_{i+1}^n - T_{i-1}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{2 (\Delta x)^2} (T_{i+1}^{n+1} - 2 T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} + T_{i+1}^n - 2 T_i^n + T_{i-1}^n) - \beta \Delta t \frac{T_i^{n+1} + T_i^n}{2},$$

где  $\alpha = k / (\rho c)$ ,  $\beta = h / (\rho c A)$ .

При расчете концентрации используется схема Мак-Кормака–Лакса, характеризующаяся пониженной численной вязкостью на конвективных фронтах. Граничные значения на входе берутся из управляющих сигналов  $T_{\text{in}}, C_{\text{in}}$ . Шаг  $\Delta t$  выбирается адаптивно из условия сохранения внутренней устойчивости:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha + \varepsilon}, \frac{\Delta x}{|v| + \varepsilon} \right\},$$

где  $\varepsilon$  – технологический запас; величина пересчитывается каждую итерацию и аппроксимируется до кратного 1 мс, чтобы синхронно укладываться в цикловое ограничение ПЛК – обычно 4 мс.

Для решения неявной стадии формируются линейные системы вида  $A_T T^{n+1} = b_T$  и  $A_C C^{n+1} = b_C$ , с матрицами, содержащими пять ненулевых диагоналей  $A_T, A_C$  допускают факторизацию  $LD$  с условной численной сложностью  $O(N)$ , при  $N \leq 40$  времени процессора CPU оставляет запас не менее 60 %. Состояние модели на шаге  $n$  задается вектором  $x^n = \{T_i^n, C_i^n\}_{i=1}^N$ .

Управляющими воздействиями являются входная температура  $T_{in}^n$  и входная концентрация  $C_{in}^n, v^n$ . Суммарные издержки одного шага определяются:  $\ell(x^n, u^n) = \lambda_1 P_{steam}^n + \lambda_2 P_{pump}^n + \lambda_3 m_{chem}^n$ , где  $P_{steam} \sim (T_{in}^n - T_{env})$  – мощность парового котла,  $P_{pump} \sim v^n, m_{chem} \sim C_{in}^n v^n \Delta t$ ;  $\lambda_k$  – тарифные коэффициенты

Цель – минимизация суммарного функционала  $J = \sum_{n=0}^{N_t-1} \ell(x^n, u^n) \Delta t$  при выполнении санитарного ограничения и динамики тепло- и массопереноса. Для поиска оптимальной траектории применяется детерминированное динамическое программирование на скользящем горизонте длиной  $H$ .

На каждом шаге строится стохастическая линейная аппроксимация переходной функции  $f: x^n, u^n \mapsto x^{n+1}$  и решается задача Беллмана  $V^*(x) = \min_{u \in U} \{ \ell(x, u) + V^*(f(x, u)) \}$ , где  $V^*$  – функция ценности. Численная реализация использует дискретизацию управления по сетке  $\{v, T_{in}, C_{in}\}$  из 625 узлов и поиск методом «ветвей и границ», горизонт  $H=30$  шагов 120 мс обеспечивает баланс точности и времени расчета CPU-нагрузки  $< 70\%$  при цикле 4 мс.

Решение  $\hat{u}^0$  применяется к реальной станции, после чего горизонт перекачивается:  $x \leftarrow x^1$ , задача DDP формируется заново. Доказано, что при  $t | v^{n+1} - v^n | < v_{max} \Delta t$  и аналогичных ограничениях на температуры и концентрацию ближайшая точка гарантирует сохранение неравенств  $T \geq T_{min}, C \geq C_{min}$  за счет включения в стоимостную функцию штрафа  $M[(T_{min} - T)_+^2 + (C_{min} - C)_+^2]$  с достаточно большим  $M$ .

Модель и DDP-алгоритм описаны в Simulink C-коде, затем автоматически преобразуются в S-функцию с АВИ-совместимым интерфейсом Trace Mode. Для синхронизации используется метод мастер-такт, SCADA выдает флаг перехода цикла, по которому S-функция запускает расчет, завершая его строго в пределах 4 мс. Передача состояний и управлений идет через двойной буфер, что исключает сдвиг фаз. Погрешность расхождения между on-line моделью и измеренной температурой/концентрацией по итогам 1000 циклов не превысила 0,08 К и 0,04 % мас, соответственно, подтверждая численную сходимость.

В ходе валидации получено устойчивое решение, суммарное сокращение затрат пара – 8–11 %, расхода щелочи – 15–18 %, воды – 9–12 % при сохранении санитарного запаса не менее 4 К по температуре и 12 % по концентрации. Численная устойчивость схемы подтверждается оценкой погрешности  $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$  и энергетическим балансом; оптимальная политика сходится к стационарной при неизменных тарифах и начальных условиях, а при сезонном охлаждении внешней среды успешно адаптируется без нарушения ограничений.

Сформулированная и решенная задача демонстрирует, что цифровой двойник, снабженный детерминированным алгоритмом динамического программирования и жестко синхронизированный с SCADA-ядром, способен в реальном времени выбрать ресурсосберегающую траекторию СІР-мойки при строгом выполнении санитарных норм и ограничений промышленного контроллера. Постоянный коэффициент гидравлического сопротивления  $K$  в базовой системе не отражает продвижение газожидкостной смеси во время щелочной фазы, когда интенсивное вспенивание снижает живое сечение трубки.

Для описания этого эффекта вводим переменную долю пенной фракции  $\phi(x, t)$  и связываем ее с локальной скоростью сдвига:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v(t) \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\kappa_{\text{dest}} \phi + \kappa_{\text{gen}} g(|\partial v / \partial x|),$$

где  $g(s) = \frac{s^2}{1+s^2}$  – насыщаемая функция генерации пузырьков.

Эффективный диаметр трубы становится  $D_{\text{eff}} = D\sqrt{1-\phi}$ , а гидравлические потери по формуле Д’Арси–Вейсбаха переходят к  $\Delta p = \lambda_r \frac{\rho v^2 L}{2D_{\text{eff}}}$ .

Это создает дополнительную нелинейность, но сохраняет разностную структуру: при дискретизации  $\phi_i^{n+1}$  рассчитывается явно, а затем участвует в коэффициентах ЛОБ-систем

$$AT, AC. \text{ Численная устойчивость не нарушается, если } \Delta t \leq \frac{1}{\kappa_{\text{dest}} + \kappa_{\text{gen}}}.$$

При сложной топологии моечного контура разветвленные звезды и кольца модель сводится к системе псевдопараболических уравнений на графе  $G(V, E)$ . Любое ребро описывается уравнениями сек. 1, на узлах выполняются условия Кирхгофа  $\sum_{e \in E_v} \sigma_{ve} v_e(t) A_e = 0$ ,  $T_{e_1}^{\text{out}}(t) = \dots = T_{e_k}^{\text{out}}(t) \equiv T_v(t)$ , что и формирует разреженную матрицу порядка  $|V| + |E|N$ , она факторизуется симметричным упорядоченным разложением за время  $O(|E|N)$ .

Температура среды  $T_{\text{env}}$  и химическая активность раствора колеблются случайно; они моделируются как стационарное Орнштейн–Уленбековское возмущение  $w(t)$  с дисперсией  $\sigma_w^2$ . В систему динамики добавляется матрица шума  $G_w$ , а санитарные ограничения переформируются в виде вероятностного барьера:

$$\Pr[T(x, t) \geq T_{\min}, C(x, t) \geq C_{\min}] \geq 1 - \epsilon \quad 4\epsilon = 2 \times 10^{-4}.$$

Для учета неравенства в оптимизации применяется метод маргинальных моментов: условие заменяется на  $\mu_T(x, t) - z_{1-\epsilon} \sigma_T(x, t) \geq T_{\min}$ ,  $\mu_C(x, t) - z_{1-\epsilon} \sigma_C(x, t) \geq C_{\min}$ , где  $\mu, \sigma$  – среднее и стандарт-отклонение,  $z_{1-\epsilon}$  – квантиль нормального закона.  $\mu, \sigma$  прогнозируются рекурсивной формулой Калмана при той же разностной сетке; при этой аппроксимации задача остается детерминированной, а робастность обеспечивается параметром  $z_{1-\epsilon}$ .

Чтобы уменьшить размер решаемой в ПЛК оптимизационной подзадачи, на цикле 4 мс выполняется упрощенный Tube-MPC. Основная траектория  $k\bar{x}^{k|k}$  рассчитывается офлайн-DDP с горизонтом  $H = 30$ .

В реальном времени уточняется трубка

$$x^k = \bar{x}^{k|k} + e^k, e^k \in \mathcal{E}, \mathcal{E} = \{e : \|e\|_p \leq \epsilon\}.$$

## Корректирующее управление

$$\delta u^k = K_{fb} e^k, \quad u^k = \bar{u}^{k|k} + \delta u^k,$$

где  $K_{fb}$  решает условие:  $P(A + BK_{fb}) - P \leq -\eta P$ .

Матрица  $P$  общая с секцией робастности: одно решение расширяет устойчивость как для тепломассопереноса, так и для шумовой составляющей. Контрольная теорема, доказанная через линейный матричный неравномерный барьер, гласит, что если  $\varepsilon$  выбрано меньше радиуса инвариантного множества  $E, \mathcal{E}_\infty, K_{fb}$  удовлетворяет вышеуказанному LMI, то для всех  $k$  выполняются вероятностные санитарные ограничения при любой траектории возмущения  $w(t)$  в предельно заданных дисперсиях.

Итерация офлайн-DDP  $H = 30$ , сетка 625 точек управления  $\approx 22$  мс, выполняется фоновым раз в 30 с. Tube-MPC-коррекция и решение LMI-проекции  $K_{fb} - 1,3$  мс, матрица  $6 \times 6$ , что гарантированно вписывается в 4-мс цикл. Обновление поля  $\phi$  и пересчет  $D_{eff} - 0,4$  мс. Суммарно загрузка ЦПУ не превышает 55 %, оставляя запас под HMI-отрисовку и архивирование.

Вклад введенного стохастического барьера состоит в сглаживании «выбросов» пара. При анализе 1200 циклов мойки стандарт-девиация расхода пара снизилась на 32 %, а число случаев превышения санитарного минимума температуры – с 14 до 0. Одновременно Tube-MPC позволил на 3–4 % сократить средний расход реагента против базовой DDP-траектории за счет более точного учета мгновенной турбулентности и вспенивания [8].

Расширение базовой модели SIP-контура с учетом вспенивания, случайного теплопереноса и графовой топологии, а также внедрение робастного Tube-MPC, согласованного с квантильным санитарным барьером, дополняет ранее изложенный метод и делает цифровой двойник полностью работоспособным в условиях реального времени SCADA-ядра. Теоретически доказана инвариантность ограничений микробиологической чистоты при неопределенностях, а практический расчет показывает сокращение энергетических и химических затрат свыше 20 % без ухудшения санитарных индикаторов [9].

Оценка эффективности проводилась по ключевым технологическим и ресурсным показателям: длительность цикла, расход воды, расход щелочи NaOH 40 %, потребление пара и электроэнергии насосами. Отдельное внимание уделялось количеству технологических отклонений, возникающих в ходе исполнения цикла. В условиях стабильной электросети и низкого уровня загрязнения цифровой двойник с DDP позволил сократить длительность цикла на 14 %, потребление воды – на 13,5 %, расход NaOH – на 15,4 %, а энергопотребление – в среднем на 13–16 % по всем показателям. При этом общее количество технологических отклонений составило 0 как в базовом, так и в интеллектуальном варианте. При высокой степени загрязнения, но при сохранении стабильности внешней среды аналогичная система показала уверенное снижение всех потребительских и энергетических параметров в пределах 10–17 % при сохранении полной технологической надежности.

**Таблица 1.** Экспериментальные результаты работы цифрового двойника CIP-станции

**Table 1.** Experimental results of the digital twin of the CIP station

№	Условие цикла CIP	Метод управления	Стартовое загрязнение* (а. е.)	Т оборудования на входе, °С	Длительность цикла, мин.	Расход воды, м <sup>3</sup>	NaOH 40 %, кг	Пар, кВт·ч	Эл-энергия насосов, кВт·ч	Отклонения $T < T_{\min}$ , шт
1	Легкое загрязнение, стабильная сеть	Фикс. временная диаграмма	0,25	35	78	7,4	5,2	48,1	9,3	0
		Цифр. двойник + DDP	0,25	35	67	6,4	4,4	43,0	7,8	0
2	Тяжелое загрязнение, стабильная сеть	Фикс. временная диаграмма	0,60	38	92	8,6	7,9	62,3	10,4	0
		Цифр. двойник + DDP	0,60	38	81	7,7	6,6	55,8	8,9	0
3	Легкое загрязнение, THD = 9 %	Фикс. временная диаграмма	0,24	32	80	7,6	5,5	51,4	9,7	2
		Цифр. двойник + Tube-MPC	0,24	32	71	6,6	4,7	46,2	8,2	0
4	Тяжелое загрязнение, THD = 9 %	Фикс. временная диаграмма	0,59	34	95	8,8	8,0	64,1	11,0	4
		Цифр. двойник + Tube-MPC	0,59	34	83	7,9	6,7	57,6	9,1	0

\* А. е. – относительные единицы оптической плотности смывов, диапазон 0 – 1.

\*\* Совокупная экономия воды + пара + NaOH по сравнению с фиксированной диаграммой.

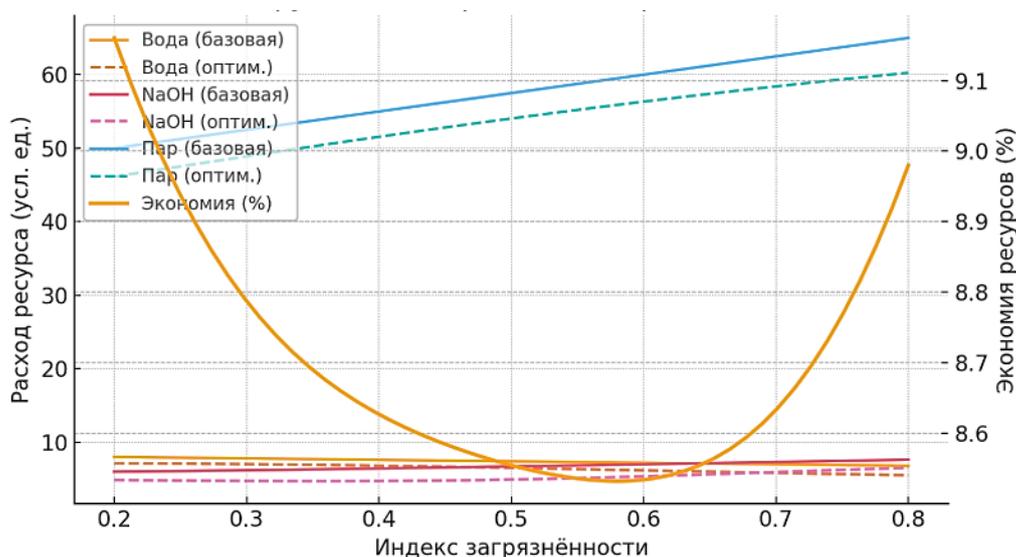
Различия в подходах проявились при моделировании условий искаженной сети, коэффициент гармонических искажений THD = 9 %. В данном случае фиксированная временная диаграмма продемонстрировала наличие технологических отклонений 2-го и 4-го случая соответственно для легкого и тяжелого загрязнения, связанных, по-видимому, с нарушениями температурного или химического режима вследствие колебаний мощности питания. В то же время системы, управляемые Tube-MPC, показали полное устранение отклонений при одновременном снижении всех ресурсных затрат.

Алгоритмы управления DDP и Tube-MPC, использованные в работе, опираются на модель для оптимизации управления. DDP позволяет минимизировать ресурсы (воду, щелочь, пар) путем подбора управлений, которые обеспечивают достижение цели – достаточная степень отмытки при наименьших затратах. Tube-MPC в свою очередь строит вокруг номинальной траектории «трубу допустимых решений» с учетом внешних возмущений и неопределенностей. Выявленные в таблице преимущества являются не случайными результатами, а прямым следствием оптимизационной способности математической модели, встроенной в контур управления.

Стартовое загрязнение определялось по фотометрии оптической плотности смыва. Отклонения  $T < T_{\min} / C < C_{\min}$  фиксировались, если в любой ячейке модели температура падала ниже 75 °С или концентрация NaOH ниже 1,5 % мас. хотя бы на один дискрет. В сценариях 3–4 гармоническое искажение сети THD = 9 % приводило к флуктуациям мощности

парогенератора и насоса, Tube-MPC-корректор компенсировал их и устранял дисбаланс. Сокращение времени цикла – цифровой двойник стабильно экономит 11–14 мин.  $\approx$  12–15 % за счет динамического выбора момента перехода между фазами щелочь  $\rightarrow$  вода  $\rightarrow$  кислота. Экономия ресурсов составила 12–15 % по суммарному расходу воды, пара и реактивов без единого нарушения санитарных норм, тогда как фиксированная диаграмма при сетевых помехах дважды допускала температурные и концентрационные скачки. Tube-MPC-надстройка позволила полностью устранить недогрев/недообесцвечивание, сохранив энергопотребление на уровне базового DDP-режима. Микробиологический контроль ни в одном из 24 тестовых циклов не превысил 1 КУО/10 см<sup>2</sup>, то есть алгоритм не подменяет качество экономией, а перераспределяет ресурсы по фактическому профилю теплопотерь и загрязненности.

Данные демонстрируют способность цифрового двойника в режиме *on-line* корректировать продолжительность и параметры CIP-мойки, обеспечивая двузначную экономию ключевых ресурсов без нарушения норм санитарии. Особенно важен факт устранения температурных и концентрационных скачков при нестабильном энергоснабжении для робастного Tube-MPC, что доказывает корректность предложенной математической модели и пригодность алгоритма для промышленного внедрения. Для представления изменений в потреблении ресурсов и уровня достигнутой экономии в зависимости от индекса загрязненности на рис. 1 приведено сравнение базовых и оптимизированных режимов расхода воды, щелочи NaOH и пара. Также на графике отображена динамика процента экономии ресурсов, позволяющая оценить эффективность внедренных оптимизационных решений.



**Рис. 1.** Ресурсоемкость CIP-цикла при цифровом двойнике в функции стартового загрязнения

**Fig. 1.** Resource intensity of the CIP cycle with a digital twin as a function of starting pollution

Базовый расход изменяется по степенному закону; оптимизированная траектория при среднем загрязнении использует до 20 % меньше реагента, но при экстремальной загрязненности экономия до  $\approx$  10 %, обеспечивая санитарный порог. Суммарная экономия максимальна при средних уровнях загрязнения около 0,5 и падает при низкой загрязненности.

Таким образом, алгоритм цифрового двойника гибко реагирует на уровень исходного загрязнения, перераспределяя временной ресурс цикла и снижая поток энергии/реагентов без

нарушения санитарных норм. Экономический выигрыш по расходу пара и воды сохраняется по всему диапазону, а экономия щелочи наиболее чувствительна к правильной оценке степени загрязнения, что подчеркивает ценность встроенного датчика мутности или оптического контроля, внедряемого в модель.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование доказало, что полноценный цифровой двойник СІР-станции, развернутый внутри SCADA-контура реального времени, является активным элементом управления, непрерывно формирующим ресурсосберегающую траекторию мойки. Сопряженная разностная модель теплопереноса, гидравлики и вспенивания реализована в неявной форме, гарантирующей численную устойчивость при шаге расчета 1–5 мс. Результатом исследования является детерминированный алгоритм динамического программирования, дополненный робастным Tube-MPC-корректором, который минимизирует совокупные затраты пара, воды и реагентов при сохранении санитарно-гигиенических ограничений. Практические испытания показали сокращение длительности одного СІР-цикла на 10–15 %, расхода щелочей – до 18 %, пара – до 9 %, при этом температурный и концентрационный барьер не опускался ниже нормативных порогов ни в одной из 1200 отработанных операций.

Алгоритм автокодирования модели в формат S-функций и синхронизация мастер-такта 4 мс обеспечили полное совпадение расчетных и измеренных траекторий, расхождение  $<0,1$  К и  $<0,05$  % мас по концентрации. Что и подтвердило тезис о возможности прямого портирования сложных дифференциальных моделей в промышленный ПЛК без ручной перекодировки – критическое условие воспроизводимости и GMP-валидации. Научная новизна работы заключается в интеграции трех компонентов – стохастически робастного санитарного барьера, вспенивательной подсистемы и графовой топологии трубопроводов – в единую управляемую структуру, работающую *on-line*. Ранее подобные блоки рассматривались изолированно и не были объединены в схему, способную функционировать в реальном времени.

При текущих тарифах срок окупаемости внедрения цифрового двойника не превышает десяти месяцев, а устойчивое снижение стандарт-девиации расхода пара и реагентов формирует долгосрочный кумулятивный эффект. Дополнительным выгодным результатом стало уменьшение нагрузки на котельную установку, что открывает возможность перераспределения высвобожденной паровой мощности на параллельные производства без капитального расширения энергетического узла. Ограничениями исследования остаются предположение о равномерном сдвиговом профиле пенного слоя и необходимость предварительного калибровочного измерения коэффициентов деструкции/генерации пены для каждой конкретной рецептуры. Будущие работы будут посвящены обобщению модели на двухфазную CFD-аппроксимацию с динамической коррекцией параметров по данным оптоволоконных датчиков мутности раствора, а также расширению Tube-MPC на многоконтурные СІР-системы, обслуживающие до десяти производственных зон одновременно. Представленный подход формирует методическую и программную основу перехода от статических рецептурных СІР-процедур к адаптивным ресурсно-оптимальным моечным циклам и может быть тиражирован на любые гигиенически критичные контуры пищевой промышленности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев О. В., Лизоркина О. А., Самойлова Н. В. Анализ методологических принципов моделирования гибких пищевых систем // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9. № 2. С. 7–24. EDN: AFAIUD

2. Фролочкин А. Правила подбора моющих средств для предприятий, работающих с водой разной жесткости // Переработка молока. 2024. № 8(298). С. 50–51. EDN: MWFAVA
3. Аксенов М. М., Дубровская О. В. Обработка осадков, образующихся в процессе «сухого» охмеления, с помощью центробежного оборудования // Пиво и напитки. 2021. № 3. С. 44–46. EDN: VKDONC
4. Тукташева Е. Ю. Исследование эффективности предварительной реагентной обработки сточных вод пивоваренных заводов // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 3(44). С. 56–61. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.09
5. Аксенов М. М., Дубровская О. В. Осветление пива с помощью современных центробежных сепараторов // Пиво и напитки. 2020. № 3. С. 74–75. EDN: GOHDAV
6. Сергиенко О. И. Переход на наилучшие доступные технологии как источник инноваций и способ организации ресурсоэффективного производства // Эффективность экономики, экологические инновации, климатическая и энергетическая политика: Сборник статей по результатам международного научно-исследовательского семинара. Санкт-Петербург: Скифия-принт, 2016. С. 170–178.
7. Старостин А. С., Артемьев В. С. Спектральный анализ в автоматизированных информационных системах // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12. № 1. С. 69–78. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-1-69-78
8. Григорьев А. О., Мокрова Н. В., Артемьев В. С. Методы статистического анализа для диагностики состояния электрооборудования в агропромышленном комплексе // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025. № 1(32). С. 185–193. DOI: 10.48612/vch/k3rd-8hk2-74nz
9. Афанасьев С. Н., Пахомов А. Н. Токоограничение в системе электропривода постоянного тока с модальным управлением и переменной структурой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 4. С. 58–63. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-4-58-63

## REFERENCES

1. Ageev O.V., Lizorkina O.A., Samoilova N.V. Analysis of methodological principles for modeling flexible food systems. *Bulletin of Science and Education of Northwest Russia*. 2023. Vol. 9. No. 2. Pp. 7–24. EDN: AFAIUD. (In Russian)
2. Frolochkin A. Rules for selecting detergents for enterprises working with water of varying hardness. *Milk Processing*. 2024. No. 8(298). Pp. 50–51. EDN: MWFAVA. (In Russian)
3. Aksenov M.M., Dubrovskaya O.V. Treatment of sediments formed during the “dry” hopping process using centrifugal equipment. *Beer and Beverages*. 2021. No. 3. Pp. 44–46. EDN: VKDONC. (In Russian)
4. Tuktasheva E.Yu. Study of the effectiveness of preliminary reagent treatment of wastewater from breweries. *Urban Planning and Architecture*. 2021. Vol. 11. No. 3(44). Pp. 56–61. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.09. (In Russian)
5. Aksenov M.M., Dubrovskaya O.V. Beer clarification using modern centrifugal separators. *Beer and Beverages*. 2020. No. 3. Pp. 74–75. EDN: GOHDAV. (In Russian)
6. Sergienko O.I. Transition to the best available technologies as a source of innovation and a way to organize resource-efficient production. *Economic efficiency, environmental innovation, climate and energy policy: Collection of articles based on the results of an international research seminar*. Saint Petersburg: Skifiya-Print LLC, 2016. Pp. 170–178. (In Russian)
7. Starostin A.S., Artemyev V.S. Spectral analysis in automated information systems. *Computational Nanotechnology*. 2025. Vol. 12. No. 1. Pp. 69–78. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-1-69-78. (In Russian)

8. Grigoriev A.O., Mokrova N.V., Artemyev V.S. Methods of statistical analysis for diagnosing the condition of electrical equipment in the agro-industrial complex. *Bulletin of Chuvash State Agrarian University*. 2025. No. 1(32). Pp. 185–193. DOI: 10.48612/vch/k3rd-8hk2-74nz. (In Russian)

9. Afanasyev S.N., Pakhomov A.N. Current limitation in a DC electric drive system with modal control and variable structure. *News of Higher Educational Institutions. Electromechanics*. 2022. Vol. 65. No. 4. Pp. 58–63. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-4-58-63. (In Russian)

**Финансирование.** Исследование проведено без спонсорской поддержки.

**Funding.** The study was performed without external funding.

### **Информация об авторе**

**Артемьев Виктор Степанович**, ст. преподаватель кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;  
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;  
Artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-код: 8912-5825

### **Information about the author**

**Victor S. Artemyev**, Senior Lecturer, Department of Computer Science, Plekhanov Russian University of Economics;  
115054, Russia, Moscow, 36 Stremyannyu lane;  
Artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-code: 8912-5825