

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА БЕТАИНОВ

Волжанкина К.А., Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Королюк А.Л.

Волжанкина Ксения Алексеевна, Невиницын Владимир Юрьевич, Грименицкий Павел Николаевич
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.

E-mail: kseniyavolzhangina@mail.ru, nevinityn@isuct.ru, grim@isuct.ru

Королюк Антон Леонидович

АО Скоропусковский синтез,

пгт Скоропусковский, Россия. 141364, Московская область, Сергиево-Посадский район, пгт Скоропусковский, д. 63, строение 2.

E-mail: a.koroluk@sintez.ltd

В работе приводится описание технологии производства кокамидопропилбетаина, широко применяемого в химической промышленности в качестве поверхностно-активного вещества. Приведены современные тенденции в сфере автоматизации химического производства, характеризующиеся внедрением программируемых логических контроллеров и систем диспетчерского контроля и управления технологическим процессом. Рассмотрена технологическая схема многостадийного периодического процесса получения кокамидопропилбетаина и описаны ключевые этапы производства. Приведены основные требования к технологическому процессу, обеспечивающие стабильность и высокое качество конечного продукта. Предложена структура распределенной системы управления технологическим процессом на базе отечественных компонентов, что актуально в условиях импортозамещения. Система обеспечивает автоматизацию процессов дозирования, смешивания и контроля параметров реакции. Внедрение предлагаемой системы позволит снизить влияние человеческого фактора, улучшить управление ресурсами и повысить экономическую эффективность производства бетаинов.

Ключевые слова: технологический процесс, химическая промышленность, ПАВ, бетаин, автоматизация, система управления, ПЛК

AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BETAIN PRODUCTION

Volzhankina K.A., Nevinityn V.Yu., Grimenitsky P.N., Korolyuk A.L.

Volzhankina Kseniya Alekseevna, Nevinityn Vladimir Yur'evich, Grimenitsky Pavel Nikolayevich
Ivanovo State University of Chemical Technology,

Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.

E-mail: kseniyavolzhangina@mail.ru, nevinityn@isuct.ru, grim@isuct.ru

Korolyuk Anton Leonidovich

JSC Skoropuskovsky Sintez,

Skoropuskovsky sett., Russia. 141364, Moscow region, Sergiev Posad area, Skoropuskovsky sett., production zone, house 63, building 2.

E-mail: a.koroluk@sintez.ltd

The paper deals with the technology of cocamidopropyl betaine production, which is widely used in the chemical industry as a surfactant. Modern trends in the automation of chemical production are presented, which are characterized by the use of programmable logic controllers and supervisory control and data acquisition systems. The technological scheme of a multi-stage periodic process of cocamidopropyl betaine production is presented, and the key stages of production are described. The main requirements for the technological process ensuring the stability and high quality of the final product are given. A structure of a distributed control system for the technological process is proposed, based on domestic components, which is relevant in the context of import substitution. The system provides automation of the dosing, mixing, and reaction parameters control. The implementa-

tion of the proposed system will reduce the influence of the human factor, improve resource management, and increase the economic efficiency of betaine production.

Keywords: technological process, chemical industry, surfactants, betaine, automation, control system, PLC

Для цитирования:

Волжанкина К.А., Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Королюк А.Л. Автоматизация технологического процесса производства бетаинов. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 1. С. 113-119. DOI: 10.6060/snt.20268501.00013

For citation:

Volzhankina K.A., Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Korolyuk A.L. Automation of the technological process of betaine production. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 1. P. 113-119. DOI: 10.6060/snt.20268501.00013

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Современное химическое производство все больше опирается на принципы цифровой трансформации, где автоматизация технологических процессов перестаёт быть лишь инструментом повышения производительности, а становится стратегическим фактором обеспечения безопасности, устойчивости и конкурентоспособности [1]. Особенно это актуально для производства амфотерных поверхностно-активных веществ (ПАВ), таких как бетаины – высокофункциональные соединения, применяемые в косметической, фармацевтической и бытовой химии благодаря их мягкому действию, хорошей совместимости с кожей и стабильности в широком диапазоне pH [2]. Технология синтеза бетаинов, как правило, включает реакции алкилирования аминов с галогенуксусными кислотами или их производными, протекающих при строго контролируемых температурах, давлении и молярных соотношениях реагентов. Любое отклонение от оптимальных параметров ведёт к снижению выхода целевого продукта, образованию побочных продуктов и, в крайнем случае, – к аварийным ситуациям из-за экзотермичности реакций [3]. Традиционные методы управления такими процессами, основанные на ручном контроле и периодических замерах, не обеспечивают достаточной точности и оперативности. В условиях роста требований к качеству продукции и снижению допустимых отклонений (например, в соответствии с GMP и ISO 9001), необходим переход к автоматизированным системам управления, способным обеспечивать непрерывный мониторинг, анализ в реальном времени и автоматизированное реагирование на отклонения [4-6]. В этом контексте особое значение приобретают системы сбора данных и диспетчерского управления, построенные на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) и SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition).

Применение ПЛК в химической промышленности позволяет реализовать надежную, отказоустойчивую логику управления, интегрируя датчики температуры, давления, уровня, расхода и состава в единую управляющую архитектуру. SCADA-системы, в свою очередь, обеспечивают визуализацию технологического процесса через мнемосхемы, архивирование данных, генерацию отчетов и удаленный доступ к информации, что критически важно для диспетчерского центра управления. [7, 8].

Современные SCADA-платформы, такие как Siemens WinCC, ICONICS Genesis, AVEVA InTouch, или отечественные решения (MasterSCADA, Trace Mode, КРУГ-2000), поддерживают стандарты OPC DA, OPC UA и Modbus TCP, что обеспечивает совместимость с широким спектром промышленного оборудования и масштабируемость системы [9, 10].

Особое внимание в современных исследованиях уделяется безопасности процессов. В химическом производстве, особенно при работе с токсичными или коррозионно-активными веществами, система должна не только контролировать параметры, но и реализовывать аварийные сценарии: автоматическую остановку подачи реагентов, активацию систем вентиляции и сигнализацию оператору. Стандарты IEC 61511 и ISO 13849-1 требуют внедрения функциональной безопасности на уровне SIL-2/SIL-3, что возможно только при использовании сертифицированных ПЛК и резервированных коммуникационных каналов [11, 12].

Таким образом, современные тенденции в автоматизации химического производства указывают на необходимость создания специализированных, интегрированных систем сбора данных и диспетчерского управления, адаптированных под уникальные требования синтеза амфотерных ПАВ. Такие системы должны обеспечивать: непрерывный сбор и фильтрацию данных с про-

мышленных датчиков; визуализацию в реальном времени через SCADA-интерфейс; логику автоматического регулирования и аварийной остановки; архивирование данных для последующего анализа и оптимизации; соответствие стандартам промышленной безопасности и качества.

В отечественной практике, несмотря на растущий интерес к цифровизации, автоматизация процессов синтеза бетаинов остаётся недостаточно исследованной. Большинство производств до сих пор используют устаревшие аналоговые системы или частично автоматизированные линии без единой централизованной платформы управления. В этой статье мы рассмотрим технологическую цепочку производства кокамидопропилбетаина – одного из ключевых поверхностно-активных веществ, широко применяемого в косметике, моющих средствах и нефтедобыче. Предлагается архитектура автоматизированной системы для производства бетаинов, сочетающая надёжность и гибкость промышленного оборудования, а также требования современных стандартов управления качеством.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И ПРОЦЕССА

Технологическая схема процесса производства бетаинов представлена на рис. 1. Процесс разбит на три ключевых этапа, каждый из которых реализован в отдельном реакторе и сопровождается

контролем потоков сырья, температур и уровня смеси в аппаратах. На первом этапе в реакторе №1 (поз. 1) идет получение промежуточного продукта – диметиламинпропиламида кислот кокосового масла. Для этого в аппарат в необходимом количестве осуществляют загрузку кокосового масла (КМ) из мерника 5 (с подогревом) и в реакторе №1 включается мешалка. Далее осуществляется нагрев масла до температуры 90 °С за счет подачи пара в теплообменную рубашку аппарата. После нагрева до заданной температуры в реактор загружается диметиламинопропиламин (ДМАПА) из мерника (поз. 6), после чего смесь подогревается до 120-130 °С и выдерживается пять часов.

В это время происходит отгонка воды и примесей ДМАПА в вертикальный блочный теплообменник 4. Далее в реактор №1 осуществляется плавная загрузка второй части ДМАПА в течение двух часов и продолжается отгонка воды. Далее осуществляется барботаж азотом в течении 30 минут при температуре 120-130 °С для достижения заданного кислотного числа. При необходимости осуществляется дозагрузка ДМАПА в реактор. На заключительной стадии первого этапа в реактор №1 подается умягченная вода и идет контроль амидного числа. При этом температура смеси выдерживается при температуре 170-175 °С и идет отгонка остатков ДМАПА.

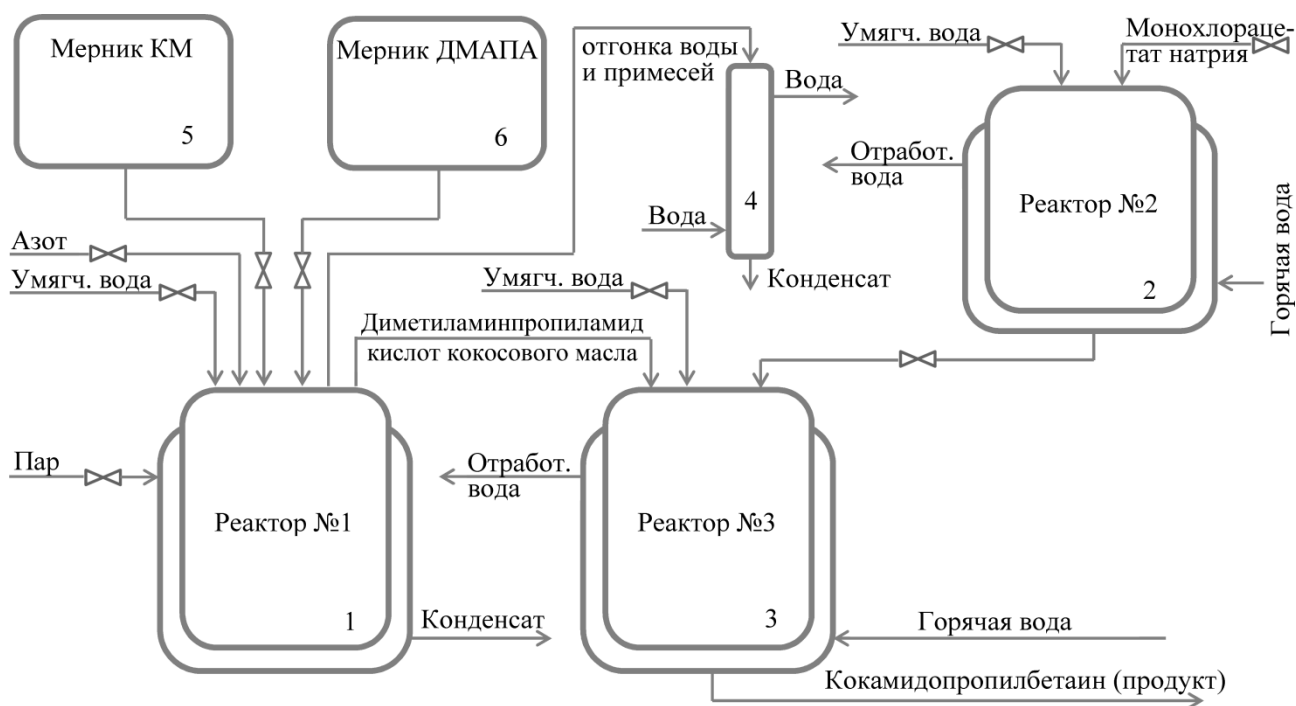


Рис. 1. Технологическая схема получения кокамидопропилбетаина
Fig. 1. Technological scheme of cocamidopropyl betaine production

На втором этапе в реакторе №2 (поз. 2) идет подготовка раствора монохлорацетата натрия. В аппарат загружают монохлорацетат натрия, умягченную воду и нагревают смесь до заданной температуры (65-80 °С) за счет подачи горячей воды в рубашку реактора.

На заключительном этапе диметиламинпропиламид кислот кокосового масла из реактора №1 (поз. 1) передвигают азотом в реактор №3 (поз. 3). Далее в реактор в необходимом количестве добавляется умягченная вода и подготовленный раствор монохлорацетата натрия, который подается самотеком из реактора №2 (поз. 2). В аппарате включается мешалка и происходит нагрев реакционной смеси до температуры 65-80 °С. Заданная температура выдерживается четыре часа за счет подачи горячей воды в рубашку реактора №3. Далее осуществляется отбор пробы на pH и содержание бетаина. Еще через час осуществляется повторный анализ. На заключительной стадии проводят удаление остатков монохлорацетата натрия из реакционной смеси, которая обладает цитотоксичными свойствами, что недопустимо в косметических и гигиенических составах. Для его деструкции применяют гидроксид натрия, который в условиях нагрева (80 °С) инициирует гидролитическое расщепление хлоруксусной группы

с образованием нетоксичного гликолят-иона и хлорида натрия. После завершения этой реакции pH среды корректируют соляной кислотой до диапазона 5,5–6,5, что не только стабилизирует структуру бетаиновой молекулы, но и предотвращает гидролиз амидной связи, сохраняя при этом прозрачность, однородность и эксплуатационные характеристики. Готовый продукт (кокаמידопропилбетаин) перемешивают при температуре 80 °С и выгружают из нижней части реактора через сливное отверстие.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ (КТС АСУТП)

Производство поверхностно-активных веществ, таких как кокаמידопропилбетаин, представляет собой сложный и многостадийный химический процесс, требующий строгого соблюдения температурных режимов, точного дозирования реагентов, контроля времени реакции и обеспечения экологической и производственной безопасности. На рис. 2 изображена трехуровневая функциональная архитектура распределенной системы управления, обеспечивающая стабильность технологического процесса получения кокаמידопропилбетаина, воспроизводимость и высокое качество конечного продукта.

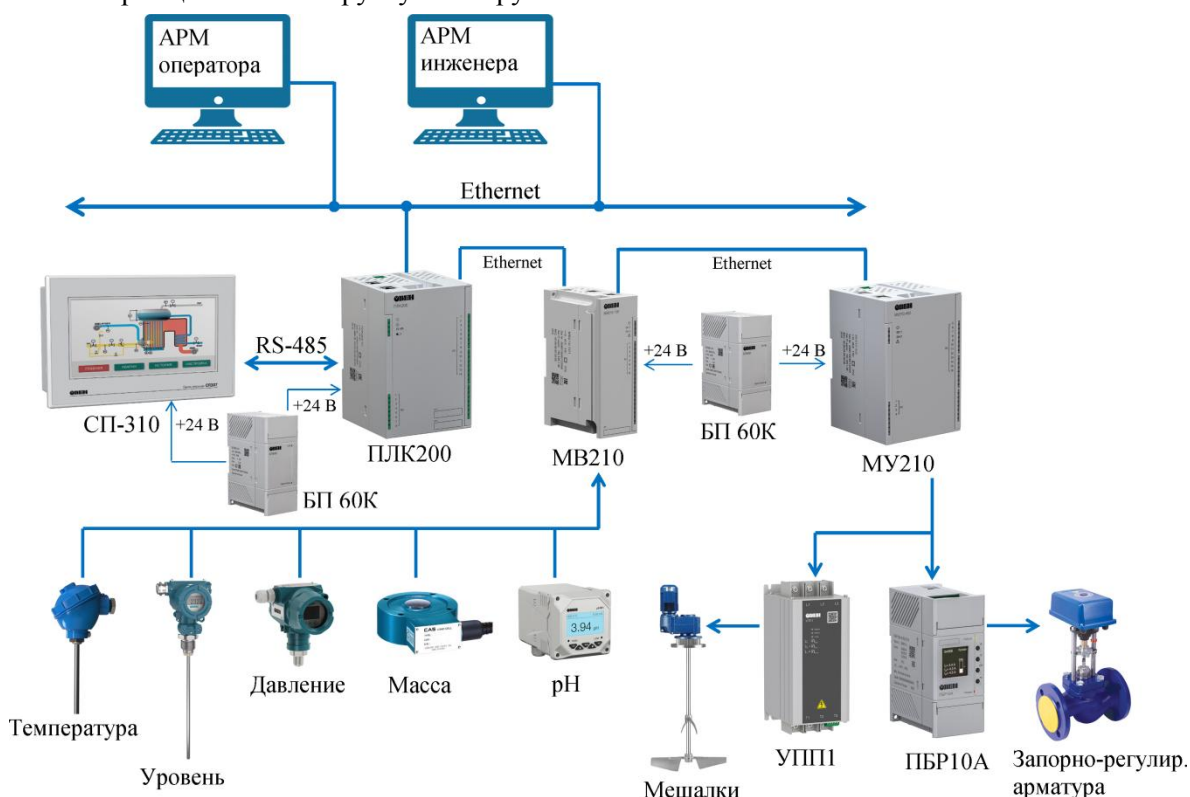


Рис. 2. Структура распределенной системы управления
Fig. 2. Structure of the distributed control system

Архитектура системы управления имеет трехуровневую структуру и включает в себя диспетчерский (операторский) уровень, контроллерный уровень (уровень ПЛК) и уровень датчиков и исполнительных механизмов (полевой уровень).

Диспетчерский уровень представлен удаленными персональными компьютерами, рабочими станциями, промышленными компьютерами и серверами. Рабочие станции верхнего уровня представляют собой автоматизированные рабочие места (АРМ) производственного персонала, обслуживающего технологический процесс: операторы, инженеры-технологи, наладчики, диспетчеры и т.д. На представленной схеме АРМ выполняют следующие задачи: сбор данных о параметрах технологического процесса и их обработка; визуализация информации о ходе технологического процесса; сигнализация о предаварийных и аварийных ситуациях; формирование сводок, журналов и отчетов; формирование команд оператора, направленных на изменение параметров настройки и режимов работы контроллеров.

На среднем уровне (контроллерном) располагается программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК200 с модулями расширения MB210 и МУ210, а также панель оператора ОВЕН СП-310. Питание приборов осуществляется постоянным напряжением с применением блоков питания ОВЕН БП60К. Контроллер ПЛК200 решает задачу непосредственного управления технологическим оборудованием, принимая сигналы с датчиков и выдавая управляющие сигналы на исполнительные механизмы. Одновременно с этим он решает еще одну важную задачу – передача информации о состоянии технологического процесса на компьютеры верхнего диспетчерского уровня посредством сети Ethernet. Панель оператора ОВЕН СП-310 представляет собой человеко-машинный интерфейс в виде сенсорного дисплея для визуализации хода процесса и управления режимами работы оборудования. Модуль расширения MB210 предназначен для увеличения числа каналов ввода контроллера и позволяет подключать датчики с аналоговым выходом. Прибор МУ210 представляет собой модуль дискретного вывода и необходим для управления исполнительными механизмами.

На нижнем полевом уровне находятся средства измерения технологических параметров процесса (датчики), запорно-регулирующая арматура и электроприводы управления мешалками. В качестве датчиков температуры предлагается использовать термопреобразователи сопротивления типа ОВЕН ДТС. Измерение уровня смеси в реак-

торах целесообразно осуществлять с применением емкостного уровнемера ОВЕН ДУ31. Для измерения давления на линиях подачи пара и жидкого теплоносителя выбран датчик избыточного давления ОВЕН ПД200. Взвешивание бункеров с сырьем и реакторов осуществляется с применением тензодатчиков силы CAS LS для взвешивания емкостей. Контроль pH среды осуществляется с помощью промышленного pH-метра ОВЕН pHM1.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим алгоритм и логику работы контроллера на примере загрузки исходного сырья в первый реактор, где идет процесс амидирования жирных кислот кокосового масла с целью получения промежуточного продукта.

Сначала осуществляется загрузка кокосового масла из соответствующего мерника путем открытия отсечного клапана на линии подачи масла. Для этого управляющий сигнал контроллера ПЛК200 через модуль дискретного вывода МУ210 идет на полупроводниковый пускатель с микропроцессорным управлением ПБР10А. Коммутирующий сигнал с прибора пуска поступает на отсечной клапан с электроприводом, при открытии которого осуществляется подача (самотеком) расплава кокосового масла. Необходимое количество загрузки масла осуществляется путем взвешивания первого реактора с помощью тензодатчика CAS LS. Аналоговый сигнал с датчика веса CAS LS в виде сигнала сопротивления идет на аналоговый вход модуля MB210 контроллера ПЛК200, который по достижению необходимого количества загрузки масла закрывает клапан подачи. Далее осуществляется запуск электропривода мешалки с помощью устройства плавного пуска УПП1 и начинается перемешивание масла в реакторе. Процесс перемешивания масла сопровождается его нагревом и поддержанием заданной температуры за счет управления регулирующим клапаном РУСТ 510-2, установленном на линии подачи пара в рубашку реактора. При этом осуществляется непрерывное измерение температуры смеси в реакторе с помощью термопреобразователей сопротивления типа ДТС. Сигнал с датчика температуры в виде унифицированного токового сигнала поступает на модуль аналогового ввода MB210 и далее в контроллер ПЛК200, где с применением алгоритма аналогового ПИ-регулирования осуществляется формирование управляющего воздействия в виде необходимого расхода пара, обеспечивающего заданную температуру в реакторе.

Управление регулирующим клапаном подачи пара осуществляется также с помощью пусковой аппаратуры ПБР10А с микропроцессорным управлением.

Как только в реакторе будет достигнута необходимая температура (90 °С), контроллер ПЛК200 подает сигнал на второй пускатель ПБР10А, происходит открытие запорного клапана на выходе второго мерника и в реактор осуществляется загрузка второго реагента (ДМАПА).

При этом система управления фиксирует момент начала добавления ДМАПА и запускает таймер выдержки. Далее управляющая программа контроллера автоматически изменяет задание регулятору температуры смеси в аппарате. Система управления обеспечивает стабилизацию температуры на уровне 120-130 °С в течении пяти часов за счет изменения подачи пара по ПИ-закону регулирования.

В процессе работы оператор видит на экране панели СП-310 графическую схему реактора, текущую температуру в аппарате, уровень, состояние мешалки, время выдержки и рекомендации по действиям. Все события фиксируются в журнале событий.

Аналогичным образом с применением контроллера ПЛК200 осуществляется управление последующими стадиями и режимами работы оборудования в соответствии с регламентом технологического процесса. Система автоматизации также обеспечивает безопасность работы оборудования путем реализации блокировок и аварийных остановов. Например, в ручном режиме оператор не имеет возможности включить мешалку без наличия жидкости в реакторе, нельзя подавать пар при низком уровне смеси в аппарате, запрещена подача азота при открытых люках. При превышении температуры, давления или уровня система автоматически останавливает подачу реагентов, включает аварийное охлаждение и подает сигнал на АРМ. Все операции, изменения параметров, аварии и сообщения оператора записываются в базу данных, что необходимо для аудита, сертификации и анализа причин брака.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внедрение автоматизированной системы управления позволит существенно повысить производительность и устойчивость технологического процесса синтеза кокаמידопропилбетаина.

Реализация непрерывного мониторинга ключевых параметров процесса – температуры, уровня, массы загружаемых компонентов и времени выдержки, а также регулирования температурных режимов, позволит минимизировать дрейф параметров продукта от серии к серии и исключить резкие отклонения, типичные для ручного управления. Особенно важным стало обеспечение точного соблюдения стадий нагрева и выдержки, критичных для полноты протекания реакций амидирования и алкилирования. Автоматическая коррекция подачи пара в зависимости от текущей температуры смеси предотвращает локальные перегревы и, как следствие, образование побочных продуктов деградации жирных кислот и избыточного амидирования. Контролируемое дозирование ДМАПА и раствора монохлорацетата натрия с учетом массы загрузки и текущего этапа процесса позволяет достичь стабильного соотношения реагентов, что напрямую влияет на выход целевого бетаина и его чистоту. Кроме того, автоматизированная процедура нейтрализации и доведения pH до требуемого диапазона (5,5–6,5) обеспечивает не только соответствие требованиям безопасности и стабильности конечного продукта, но и его органолептические характеристики – прозрачность, однородность и отсутствие посторонних примесей.

Реализованные технические блокировки (например, невозможность включения мешалки при уровне ниже критического, автоматическая остановка подачи пара при превышении температуры) исключают инциденты, связанные с нарушением последовательности операций. Также следует отметить, что предлагаемое решение на базе отечественных компонентов по совокупности параметров (стоимость, надежность и функциональность) является конкурентоспособным, особенно в условиях импортозамещения. Внедрение предлагаемой системы позволит снизить влияние человеческого фактора, улучшить управление ресурсами и повысить экономическую эффективность производства бетаинов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this paper.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Седяров О.И., Отрубянников Е.В., Пустовойт П.А., Польгуев А.И. Цифровая трансформация исследовательской, проектной и производственной деятельности в химических технологиях. *Промышленные процессы и технологии*. 2024. Т. 4. № 1(11). С. 86-98. DOI 10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-86-98.
2. Мансураева Л.М., Юсупова И.И., Булаев С.А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение. *Вестник магистратуры*. 2022. № 2-1(125). С. 30-35.
3. Чистофорова Н.В., Зубков Н.В. Автоматизация процесса изготовления поверхностно-активных веществ. *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2023. № 17. С. 214-220.
4. Устинов В.В., Гирш Т.А. GMP или ISO 9001 на производстве биофармпрепаратов: что выбрать? *Контроль качества продукции*. 2018. № 2. С. 18-20.
5. Сафаров И.М. Экономическая эффективность внедрения промышленной автоматизации на предприятиях обрабатывающей промышленности. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2025. Т. 8. № 5(158). С. 83-91. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.05.08.009.
6. Блиничев В.Н., Лабутин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Мионов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j
7. Вячина И.Н., Самышева Е.Ю. Интеграция SCADA-систем и ERP-платформ: влияние на экономическую эффективность управления производственными процессами. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2025. Т. 8. № 5(158). С. 54-64. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.05.08.006.
8. Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Лихач Д.С., Субботин П.А. Разработка автоматизированной системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления ректификационной установкой. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 2(78). С. 85-92. DOI 10.6060/snt.20247802.00012.
9. Абраменко Д.М. Обзор SCADA систем: ключевые тенденции рынка. *Энергоэксперт*. 2025. № 2(94). С. 12-15.
10. Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Отлягузов Д.С., Ваниякин И.К. Интеграция Delphi приложений с системами промышленной автоматизации через стандарт OPC. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 2(82). С. 83-88. DOI 10.6060/snt.20258101.00010.
11. Кузнецов П.А., Тынченко Я.А., Колесник В.В. К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств. *Информатика. Экономика. Управление*. 2022. Т. 1. № 1. С. 217-228. DOI 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228.
12. Рогова Е.С. Коммуникационные протоколы функциональной безопасности в промышленной автоматизации. *Автоматизация в промышленности*. 2024. № 7. С. 3-8. DOI 10.25728/avtprom.2024.07.01.
1. Sedlyarov O.I., Otrubyannikov E.V., Pustovojt P.A., Polguev A.I. Digital transformation of research, design and production activities in chemical technologies. *Industrial processes and technologies*. 2024. V. 4. N 1(11). P. 86-98. (in Russian). DOI 10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-86-98.
2. Mansuraeva L.M., Yusupova I.I., Bulaev S.A. Surfactants: properties and application. *Bulletin of the Magistracy*. 2022. N 2-1(125). P. 30-35. (in Russian).
3. Chistoforova N.V., Zubkov N.V. Automation of the process of manufacturing surfactants. *Bulletin of Angarsk State Technical University*. 2023. N 17. P. 214-220. (in Russian).
4. Ustinov V.V., Girsh T.A. GMP or ISO 9001 in biopharmaceutical production: which to choose? *Product quality control*. 2018. N 2. P. 18-20. (in Russian).
5. Safarov I.M. Economic efficiency of industrial automation implementation in manufacturing enterprises. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2025. V. 8. N 5(158). P. 83-91. (in Russian). DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.05.08.009.
6. Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G. N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinitsyn V.Yu., Ponomareva Yu, N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of developing energy- and resource-saving processes, reactor systems and intensive equipment, modeling and optimal control. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. Issue. 7. P. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j
7. Vyachina I.N., Samysheva E.Yu. Integration of SCADA systems and ERP platforms: impact on the economic efficiency of production process management. *Economics and Management: Problems and Solutions*. 2025. V. 8. N 5(158). P. 54-64. (in Russian). DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.05.08.006.
8. Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Likhach D.S., Subbotin P.A. Design of an automated system for data acquisition and supervisory control of a rectification unit. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 2(78). P. 85-92. (in Russian). DOI 10.6060/snt.20247802.00012.
9. Abramenko D.M. SCADA Systems Review: Key Market Trends. *Energoexpert*. 2025. N 2(94). P. 12-15. (in Russian).
10. Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Otyaguzov D.S., Vanyaykin I.K. Integration of Delphi applications with industrial automation systems using the OPC standard. *Modern high technologies. Regional application*. 2025. N 2(82). P. 83-88. (in Russian). DOI 10.6060/snt.20258101.00010.
11. Kuznecov P.A., Tynchenko Ya.A., Kolesnik V.V. On the issue of taking into account hazards in the analysis of the reliability of automated process control systems for hazardous industries. *Computer science. Economics. Management*. 2022. V. 1. N 1. P. 217-228. (in Russian). DOI 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228.
12. Rogova E.S. Functional safety communication protocols in industrial automation. *Automation in industry*. 2024. N 7. P. 3-8. (in Russian). DOI 10.25728/avtprom.2024.07.01.

Поступила в редакцию(Received) 27.11.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 18.01.2026