

УДК 681.5
DOI

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СМЕСИТЕЛЬНО-ОТСТОЙНОЙ ЭКСТРАКЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ АКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

¹Кечкина Н.И. ORCID ID 0000-0002-9835-3327, ¹Хренова К.В.,

²Кечкин А.Ю. ORCID ID 0000-0002-8966-9127

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, Российская Федерация, e-mail: nataliyakechkina@yandex.ru

²Акционерное общество «ГосНИИ «Кристалл», Дзержинск, Российская Федерация

В статье рассматриваются проблемы, возникающие при реализации водной экстракции ценных компонентов из кубового остатка. Акриловая кислота находит применение в производстве полимеров, клеев, лекарств и косметики и т.д. Гидрохинон также имеет широкое применение, в том числе в производстве красителей, лекарственных средств, пищевых продуктов. Поэтому особое внимание в рассматриваемом процессе уделено извлечению гидрохинона и акриловой кислоты. Актуальность разработки эффективной системы управления обусловлена стремлением к количественному увеличению выхода гидрохинона и акриловой кислоты с сохранением высокого уровня качества целевых компонентов. Целью исследования является создание эффективной автоматизированной системы управления смесительно-отстойной экстракционной установкой, направленной на повышение степени извлечения этих компонентов в производстве акриловой кислоты. В исследовании реализован аналитический подход к построению математической модели с последующим моделированием динамических процессов в системе Simulink. Результаты моделирования позволили продемонстрировать влияние возмущающих воздействий, оказываемых на объект управления, и осуществить выбор концепции автоматизированной системы управления. Предложено реализовать комбинированную систему управления процессом водной экстракции ценных компонентов из кубового остатка, позволяющей компенсировать влияние возможных возмущающих воздействий. Представлены результаты сравнения показателей качества регулирования для системы с принципом управления по отклонению и комбинированной системы.

Ключевые слова: экстракция, математическая модель, возмущающие воздействия, комбинированная система управления

AUTOMATED CONTROL SYSTEM MIXING AND SETTLING EXTRACTION UNIT IN THE PRODUCTION OF ACRYLIC ACID

¹Kechkina N.I. ORCID ID 0000-0002-9835-3327, ¹Khrenova K.V.,

²Kechkin A.Yu. ORCID ID 0000-0002-8966-9127

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev",
Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail nataliyakechkina@yandex.ru

²Joint stock company State scientific research institute «Kristall», Dzerzhinsk, Russian Federation

The article discusses the problems that arise during the implementation of aqueous extraction of valuable components from the residue. Acrylic acid is used in the production of polymers, adhesives, medicines, and cosmetics, among other things. Hydroquinone is also widely used, including in the production of dyes, medicines, and food products. Therefore, the focus of this process is on the extraction of hydroquinone and acrylic acid. The development of an effective management system is crucial to increase the yield of hydroquinone and acrylic acid while maintaining a high level of quality. The purpose of this research is to create an effective automated control system for a mixing and settling extraction unit aimed at increasing the degree of extraction of these components in the production of acrylic acid. The study implemented an analytical approach to the construction of a mathematical model, followed by the simulation of dynamic processes in the Simulink system. The simulation results demonstrated the influence of disturbances on the control object and allowed for the selection of an automated control system concept. The study proposed the implementation of a combined control system for the aqueous extraction of valuable components from the residue, which compensates for the effects of potential disturbances. The results of comparing the quality indicators of the control system based on the deviation principle and the combined system were presented.

Keywords: extraction, mathematical model, disturbing effects, combined control system

Введение

Экстракция кубового остатка акриловой кислоты – процесс, связанный с извлечением акриловой кислоты и гидрохинона. Процесс экстракции осуществляется в узле экс-

тракции, содержащем динамический смеситель и сепаратор. Продукты экстракции находят широкое применение в различных отраслях промышленности, особенно в нефтехимической.

Рассматриваемый производственный процесс представляет собой сложную систему и сопряжен с необходимостью повышения качества экстракции ценных компонентов из кубового остатка, обеспечением безопасности и надежности производства. Решение данных проблем возможно за счет разработки оптимальной системы автоматического управления смесительно-отстойной экстракционной установкой, позволяющей осуществлять компенсацию влияния возмущающих воздействий. Так, в патенте Захидова Б.А., Мусаева Ф.С. представлена комбинированная система управления процессом экстракции в производстве фосфорной кислоты. Цель изобретения заключается в уменьшении потерь экстракционной фосфорной кислоты путем применения каскадного регулирования, что позволит повысить точность регулирования, эффективность процесса экстракции и уменьшить потери фосфорной кислоты на выходе [1]. В работе Олейниковой А.Ф., Ушатинской Н.П. представлено изобретение, целью которого является стабилизация качества получаемых продуктов и увеличение степени их извлечения. Достижение цели обеспечивается за счет того, что устройство дополнительно оснащено цепью коррекции по величине превышения нормы потерь целевого продукта совместно с побочным [2]. С учетом предложений по реализации управления экстракционными установками, представленных в патентах [3; 4], анализа существующих решений по автоматизации процесса экстракции выявлена необходимость принимать во внимание изменения компонентного состава и расхода исходного раствора, подаваемого в установку. В проанализированных источниках по теме исследования предлагается реализовать комбинированные системы управления, компенсирующие различные возмущающие воздействия и тем самым позволяющие повысить качество регулирования.

Объектом исследования является смесительно-отстойная экстракционная установка, предназначенная для извлечения гидрохинона и акриловой кислоты. Предмет исследования – система управления экстракционной установкой.

Цель исследования – разработка и последующее внедрение эффективной системы управления смесительно-отстойной экстракционной установкой в производстве акриловой кислоты, что позволит количественно увеличить долю извлекаемых гидрохинона и акриловой кислоты.

Для достижения поставленной цели в статье решены следующие задачи.

1. Разработка математической модели установки с учетом физико-химических явлений, происходящих в процессе.

2. Представление разработанной математической модели в системе графического моделирования Simulink [5] с последующим моделированием и оценкой степени влияния возмущающих воздействий на параметры процесса.

3. Разработка нескольких концепций автоматизированной системы и обоснованный выбор оптимальной.

Материалы и методы исследования

В исследовании применен аналитический подход к построению математической модели. Аналитический подход подразумевает исследование физических и химических процессов, происходящих в исследуемом объекте. При формировании уравнений использованы фундаментальные законы сохранения вещества и энергии [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Узел водной экстракции (рис. 1), предназначенный для выделения ценных компонентов из кубового остатка, таких как гидрохинон и акриловая кислота, включает динамический смеситель поз. ДС-1 и сепаратор с разделительной стенкой поз. С-2.

В рассматриваемом процессе химических превращений не происходит.

Целью эксплуатации узла является повышение степени использования сырья и снижения невозвратных потерь на производстве, которое достигается за счет увеличения выработки акриловой кислоты и снижения нормы гидрохинона.

Сформированная система допущений позволяет исключить из рассмотрения малозначимые явления и упростить математическую модель. При составлении уравнений учитывается: для динамического смесителя принята модель идеального смешения; объект имеет сосредоточенные координаты; потери вещества и энергии во внешнюю среду отсутствуют.

Математическое описание рассматриваемого объекта включает уравнения материального баланса по целевому компоненту и материального баланса по жидкой фазе для динамического смесителя, уравнение материального баланса по жидкой фазе для сепаратора [7]. Система перечисленных уравнений совместно с начальными условиями представляет математическую модель рассматриваемого технологического объекта управления (1). Оценка адекватности модели была выполнена с применением критерия Фишера.

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{ТВ}} \cdot x_{\text{ТВ}} + G_{\text{КО}} \cdot x_{\text{КО}} - G_{\text{см}} \cdot (1 - x_{\text{см}}) = \rho_{\text{см}} \cdot h_{\text{см}} \cdot S_{\text{апп1}} \cdot \frac{dx_{\text{см}}}{dt} \\ G_{\text{ТВ}} + G_{\text{КО}} - G_{\text{см}} = \rho_{\text{см}} \cdot S_{\text{апп1}} \cdot \frac{dh_{\text{см}}}{dt} \\ G_{\text{см}} - G_{\text{экс}} - G_{\text{раф}} = \rho_{\text{раф}} \cdot S_{\text{апп2}} \cdot \frac{dh_{\text{экс}}}{dt} \end{array} \right. , \quad (1)$$

$$\begin{array}{l} x_{\text{см}}|_{t=0} = x_{\text{см}}^{\text{зад}} \\ h_{\text{см}}|_{t=0} = h_{\text{см}}^{\text{зад}} \\ h_{\text{экс}}|_{t=0} = h_{\text{экс}}^{\text{зад}} \end{array}$$

где $G_{\text{ТВ}}$ – объемный расход технологической воды, м³/ч; $G_{\text{КО}}$ – объемный расход кубового остатка, м³/ч; $G_{\text{см}}$ – объемный расход смеси, м³/ч; $x_{\text{ТВ}}$ – концентрация технологической воды; $x_{\text{КО}}$ – концентрация кубового остатка; $x_{\text{см}}$ – концентрация кубовых остатков в смеси; $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси, кг/м³; $h_{\text{см}}$ – уровень смеси, м; $S_{\text{апп1}}$ – площадь поперечного сечения смесителя, м²; $G_{\text{экс}}$ – объемный расход экстракта, м³/ч; $G_{\text{раф}}$ – объемный расход рафината, м³/ч; $\rho_{\text{раф}}$ – плотность рафината, кг/м³; $S_{\text{апп2}}$ – площадь поперечного сечения сепаратора, м²; $h_{\text{экс}}$ – уровень экстракта в сепараторе, м.

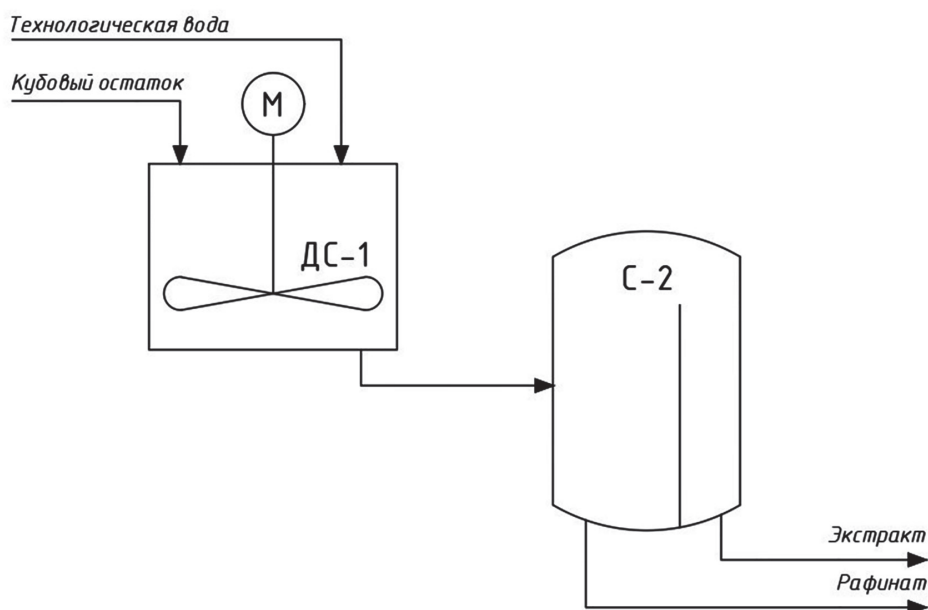


Рис. 1. Принципиальная схема объекта
Источник: составлено авторами

На основе математической модели разработана информационная схема технологического объекта управления (рис. 2), отражающая взаимосвязь между технологическими параметрами.

Переменными состояниями технологического процесса для динамического смесителя, т. е. параметрами процесса, которые необходимо регулировать, являются кон-

центрация и уровень смеси. Среди входных переменных, а именно характеристик входных материальных и энергетических потоков, которые изменяются в процессе, выделяют расходы технологической воды и кубового остатка, а также состав кубового остатка. Переменной состояния для сепаратора является уровень экстракта. Входной переменной – расход и состав смеси.

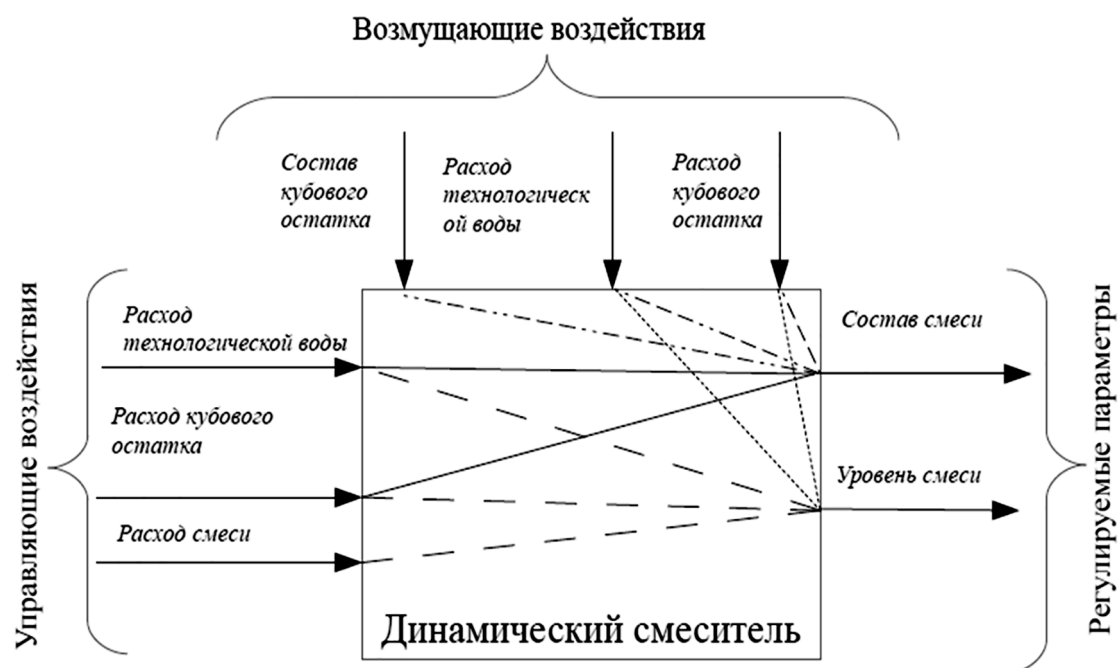


Рис. 2. Информационная схема для динамического смесителя
Источник: составлено авторами

Для математического моделирования нестационарных режимов объектов со сосредоточенными параметрами используются обыкновенные дифференциальные уравнения [8; 9]. Для имитационного математического моделирования динамических процессов использована система Simulink [5; 10], позволяющая реализовать принцип визуального программирования, в соответствии с которым, на основе разработанной математической модели, создается блок-схема исследуемой системы (рис. 3) и проводится ее анализ.

Динамическая характеристика объекта управления отображает информацию о его поведении в переходных процессах. В исследовании получены динамические характеристики объекта управления при действии следующих возмущающих воздействий: ступенчатые изменения состава кубового остатка на входе в динамический смеситель, расходов технологической воды и кубового остатка.

Полученные результаты являются основой для синтеза автоматических систем регулирования. Стоит отметить, что каждое из рассмотренных возмущающих воздействий оказывает достаточно сильное влияние на целевой показатель эффективности процесса. В этой связи вопрос разработки концепции автоматизированной системы, позволяющей компенсировать

или уменьшить их влияние, является актуальным [11].

Рассматриваемый объект является многомерным, требующим компенсации возмущающих воздействий [12]. Расход смеси и ее состав на выходе из динамического смесителя определяются расходами технологической воды и кубового остатка, а также концентрацией кубового остатка на входе в аппарат.

Предложено использовать комбинированную систему управления (рис. 4) на базе математической модели [13], позволяющей вычислить объемный расход смеси на выходе из динамического смесителя (формула 2), а также определить значение состава смеси на выходе из динамического смесителя с учетом технологических параметров потоков, поступающих в него (формула 3).

$$G_{\text{см}} = G_{\text{ТВ}} + G_{\text{КО}}. \quad (2)$$

$$x_{\text{см}} = 1 - (G_{\text{ТВ}} \cdot x_{\text{ТВ}} + G_{\text{КО}} \cdot x_{\text{КО}}) / G_{\text{см}}. \quad (3)$$

Выполнен расчет показателей качества процесса управления [14; 15] для системы регулирования концентрации кубового остатка в смеси на выходе из динамического смесителя с принципом управления по отклонению и системы с реализацией комбинированного управления (таблица). Графики переходных процессов для рассматриваемых систем представлены на рисунке 5.

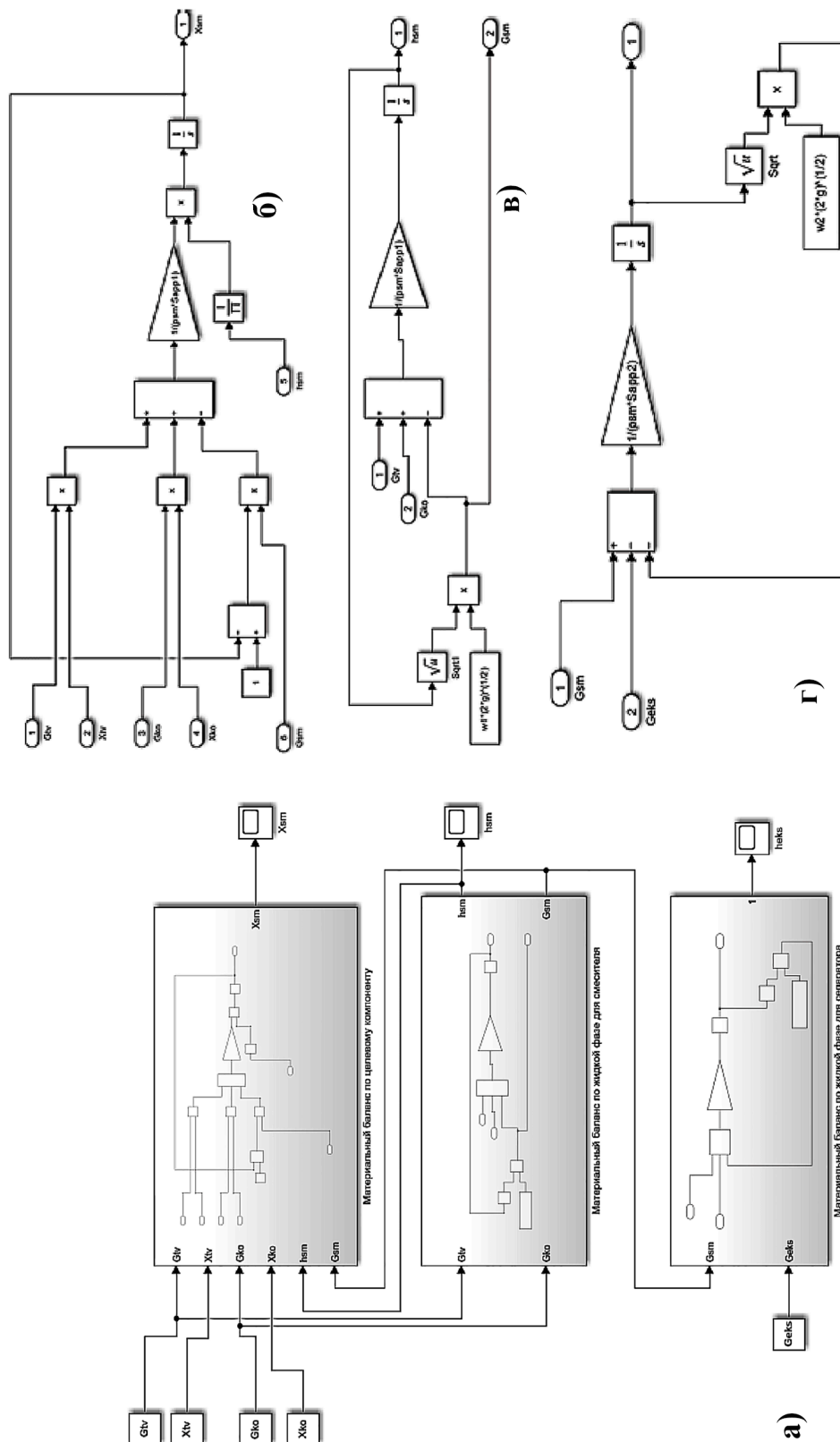


Рис. 3. Блок-схема модели объекта управления в системе Simulink: а – общий вид блок-схемы, б – блок-схема математического описания материального баланса по целевому компоненту, в – блок-схема математического описания материального баланса по жидкой фазе для смесителя, г – блок-схема математического описания материального баланса по жидкой фазе для сепаратора
Источник: составлено авторами

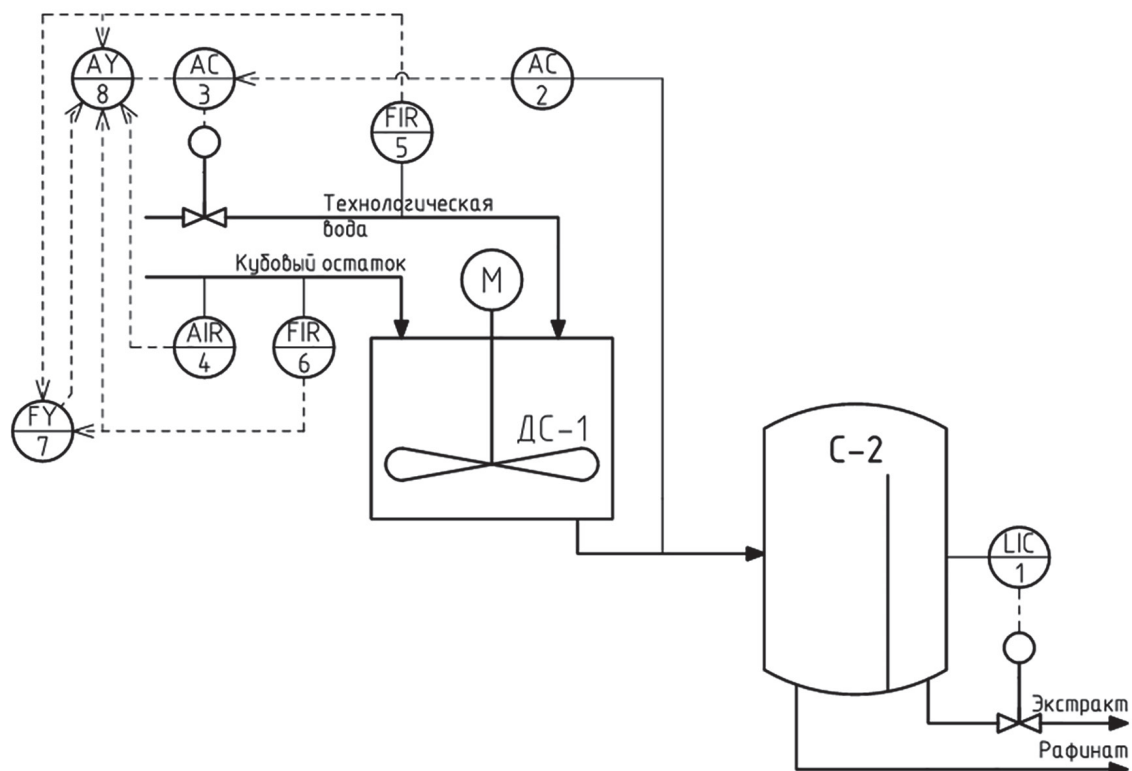


Рис. 4. Схема комбинированной системы управления
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

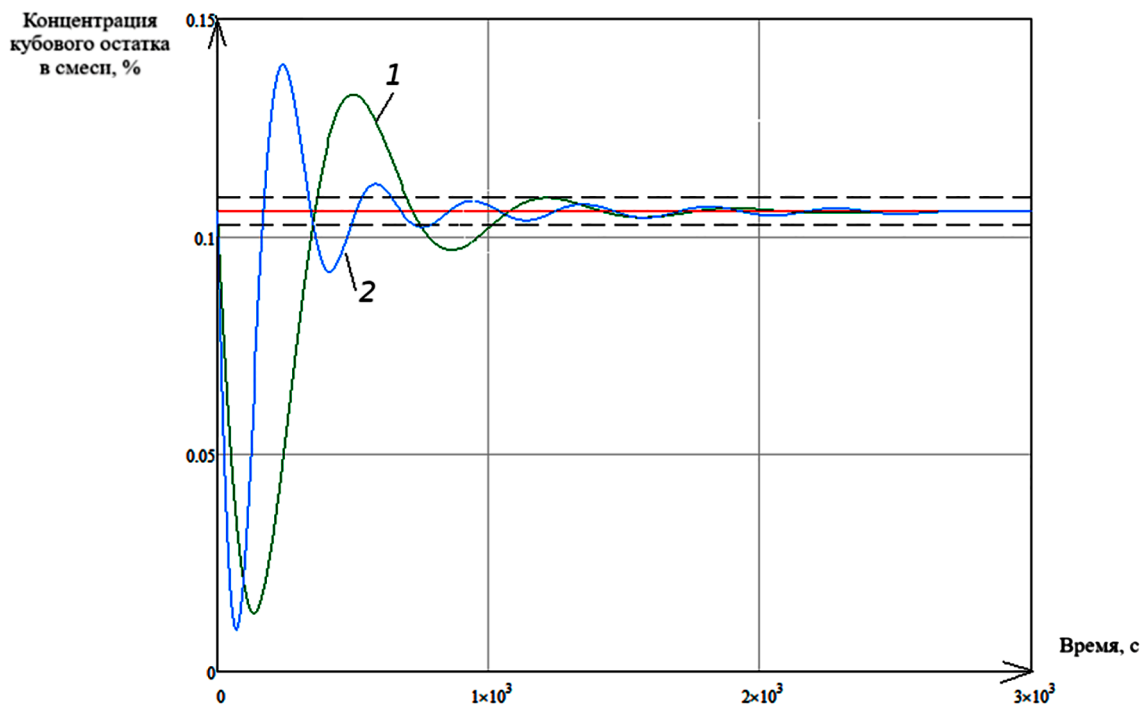


Рис. 5. Графики переходных процессов: 1 – переходная характеристика, полученная для системы с принципом управления по отклонению; 2 – переходная характеристика, полученная для комбинированной системы
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Критерии качества регулирования

Параметры	Система с управлением по отклонению	Комбинированная система управления
Статическая ошибка регулирования	0	0
Динамическая ошибка регулирования	0,0922	0,0951
Перерегулирование	28,5249	35,0158
Степень затухания	0,9056	0,8559
Время регулирования	1025	780
Интегральный квадратичный критерий	9,675	7,999

По результатам анализа полученных показателей качества регулирования установлено, что время регулирования и интегральный квадратичный критерий достигают наименьшего значения для системы с применением комбинированного управления.

Заключение

В работе выполнен анализ смесительной отстойной экстракционной установки в производстве акриловой кислоты как объекта управления. В рамках исследования была построена имитационная модель экстракционной установки. Данная модель позволила выявить зависимости между основными технологическими параметрами, включая расходы технологической воды и кубового остатка, концентрацию кубового остатка на входе в динамический смеситель; расходы экстракта и рафината на выходе из сепаратора.

Обоснована необходимость компенсации влияния возможных возмущающих факторов (расход и состав кубового остатка), действующих на технологический объект управления. В качестве решения предложено внедрение комбинированной системы управления процессом водной экстракции ценных компонентов из кубового остатка, которая позволит снизить влияние возмущающих воздействий и, как следствие, повысить качество конечного продукта. Выполнен расчет и сравнение показателей качества регулирования системы с принципом управления по отклонению и комбинированной системы. Сделан вывод о целесообразности применения для рассматриваемого объекта комбинированной системы управления.

Список литературы

1. Захидов Б.А., Мусаев Ф.С., Туляганов Ф.А., Касымов С.С., Аюпов Р.Х. Способ автоматического управления процессом экстракции / Патент СССР 893860. МПК C01B 25/22, G05D 27/00; заявлено 29.04.80; опубл. 30.12.81. [Элек-

тронный ресурс]. URL: <https://patents.su/3-893860-sposob-avtomaticheskogo-upravleniya-processom-ehkstrakcii.html> (дата обращения: 26.10.2025).

2. Олейникова А.Ф., Ушатинская Н.П. Устройство для автоматического управления процессом экстракции / Патент СССР 401380. МПК G05D 27/00 B01D 11/04; заявлено 10.05.72, опубл. 12.10.73. [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.su/3-401380-401380.html> (дата обращения: 26.10.2025).

3. Абдуллаев Ф.М., Гачаев Ш.К., Мамедов Н.С., Мехтиев М.М., Садыхов Ф.М., Шукюров М.Ш. Способ управления процессом жидкостной экстракции ароматических углеводородов // Патент СССР 1011152. МПК B01D 11/04 G05D 27/00; заявлено 25.11.81, опубл. 15.04.83. [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.su/3-1011152-sposob-upravleniya-processom-zhidkostnoj-ehkstrakcii-aromaticheskikh-uglevodorodov.html> (дата обращения: 26.10.2025).

4. Касьяненко В.П., Бузетти К.Д., Лю-си-юнь Д.Л., Умарова З.М., Грызенко А.В. Экстракционная установка // Патент РФ 2012110903/05. МПК B 01 D 11/02; заявлено 22.02.2012, опубл. 20.08.2012.

5. Юденков В.С., Бугай О.В. Моделирование с использованием системы Matlab + Simulink в учебном процессе // Труды БГТУ. Серия 4: Принт- и медиатехнологии. 2021. № 1 (243). С. 5-11. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45693101> (дата обращения: 16.10.2025).

6. Сидоров Д.В., Гаврина О.А., Берко И.А., Галкина О.Ю. Обзор методов построения математических моделей статических режимов для управления непрерывными технологическими процессами // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 4. № 12. С. 9-12. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27654109> (дата обращения: 16.10.2025).

7. Галицков С.Я., Галицков К.С., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Моделирование обжига керамики в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 227-237. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23840701> (дата обращения: 25.10.2025). EDN: UBSJCI.

8. Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Терехова А.А., Этков С.Э., Воронков Р.В., Гогорян М.Л., Дмитриев Д.Г. Разработка системы управления многосвязными технологическими процессами на примере пищевых производств // Вестник ТГТУ. 2023. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-upravleniya-mnogosvyaznymi-tehnologicheskimi-protsessami-na-primere-pischevyh-proizvodstv> (дата обращения: 08.10.2025).

9. Иванов М.С., Каурнакаев М.М. Исследование системы автоматического регулирования (САР) сложного многомерного теплового объекта // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина: Сбор-

ник научных трудов. Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2024. С. 84-90. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25721117> (дата обращения: 16.10.2025). EDN: MDVDOR.

10. Трошина Г.В. Моделирование динамических объектов в среде Simulink. Часть 2 // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 4 (82). С. 31 – 41. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-4-31-41. EDN: VQWFXH.

11. Смольянинов А.В., Ветохин В.В., Собенина О.В. Система автоматического управления щековой дробилкой // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-avtomaticheskogo-upravleniya-schekovoy-drobilkoj> (дата обращения: 23.10.2025).

12. Сафарова Айгюн Агамирза Кызы Разработка адаптивной системы управления для установки первичной переработки нефти масляного профиля // Вестник науки и образования. 2018. № 10 (46). [Электронный ресурс]. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-adaptivnoy-sistemy-](https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-adaptivnoy-sistemy-upravleniya-dlya-ustanovki-pervichnoy-pererabotki-nefti-maslyanogo-profila)

[upravleniya-dlya-ustanovki-pervichnoy-pererabotki-nefti-maslyanogo-profila](https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-adaptivnoy-sistemy-upravleniya-dlya-ustanovki-pervichnoy-pererabotki-nefti-maslyanogo-profila) (дата обращения: 26.10.2025).

13. Грудяева Е.К. Синтез системы управления технологическим процессом удаления соединений азота из сточных вод // Информационно-управляющие системы. 2015. № 4 (77). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-sistemy-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessom-udaleniya-soedineniy-azota-iz-stochnyh-vod> (дата обращения: 26.10.2025).

14. Грицюк С.В., Таранов А.А. Моделирование системы контроля предельного уровня налива нефтепродуктов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-sistemy-kontrolya-predelnogo-urovnya-naliva-nefteproduktov> (дата обращения: 24.10.2025).

15. Ванцов С.В., Васильев Ф.В., Хомутская О.В., Коробков М.А. Задачи управления технологическими процессами // Научное приборостроение. 2022. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zadachi-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami> (дата обращения: 26.10.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.