

Разработка нейронной сети для управления процессом хлорирования рециклового дихлорэтана с использованием виртуального анализатора

А. Д. Гайдукова • Е. А. Муравьева • Т. В. Григорьева

Уфимский государственный нефтяной технический университет

В статье представлен метод управления процессом хлорирования рециклового дихлорэтана, основанный на совместном использовании виртуального анализатора и нейронной сети. Виртуальный анализатор, реализованный в среде Simulink MATLAB, вычисляет ключевой параметр – активность дихлорэтана (АТ) – на основе уравнения состояния. Данный параметр совместно с технологическими переменными подается на вход нейронной сети, которая формирует управляющие воздействия на регулирующие клапаны. Обучение сети по алгоритму Левенберга–Марквардта позволило достичь высокой точности прогноза: коэффициент корреляции $R = 1$, среднеквадратичная ошибка $5.0177 \cdot 10^{-6}$. Предложенный подход позволяет повысить эффективность и стабильность процесса

Нейронная сеть; виртуальный анализатор; качество; активность.

ВВЕДЕНИЕ

Хлорирование рециклового дихлорэтана является ключевой стадией в производстве высокоценных хлорированных углеводородов, таких как трихлорэтан и перхлорэтилен. Эффективность этого процесса критически зависит от точного поддержания оптимального соотношения реагентов и контроля активности реакционной среды. Традиционные системы автоматического регулирования, основанные на стабилизации отдельных параметров (расходов, температуры, давления), часто не способны оперативно компенсировать колебания качества исходного сырья и изменения каталитической активности, что может приводить к снижению селективности целевой реакции, увеличению выхода побочных продуктов и перерасходу реагентов [Mur21]. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является применение методов искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей, способных выявлять сложные нелинейные зависимости между множеством технологических параметров и вырабатывать оптимальные управляющие воздействия. Однако для успешной работы такой системы необходим достоверный показатель текущего состояния процесса, который часто невозможно измерить стандартными аналитическими приборами в режиме реального времени.

В данной работе предлагается комплексное решение, сочетающее виртуальный анализатор и нейронную сеть для адаптивного управления узлом хлорирования. Виртуальный анализатор, реализованный на базе уравнений материального баланса и состояния, рассчитывает косвенный показатель – активность дихлорэтана в смесителе [Ras25]. Этот расчетный параметр, отражающий интенсивность протекания процесса, подается вместе с основными технологиче-

Гайдукова А. Д., Муравьева Е. А., Григорьева Т. В. Разработка нейронной сети для управления процессом хлорирования рециклового дихлорэтана с использованием виртуального анализатора // СИИТ. 2026. Т. 8, № 1(25). С. 68-74. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no1-p68](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no1-p68). EDN: PJUXYZ.

Gaidukova A. D., Muravyova E. A., Grigorieva T. V.. "Development of a neural network for controlling the chlorination process of recycled dichloroethane using a virtual analyzer" // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 1(25), pp. 68-74. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no1-p68](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no1-p68). EDN: PJUXYZ (In Russian).

скими переменными на вход нейронной сети. Сеть, обученная с использованием высокоточного алгоритма Левенберга–Марквардта, формирует управляющие сигналы для регулирующих клапанов, обеспечивая поддержание оптимального режима.

Целью настоящей работы являются разработка, моделирование и оценка эффективности системы управления процессом хлорирования на основе нейронной сети, использующей данные виртуального анализатора. В статье описаны структура виртуального анализатора, архитектура и процесс обучения нейронной сети, а также представлены результаты, подтверждающие высокую точность полученной модели.

ДАнные И ПЕРЕМЕННЫЕ

Краткая характеристика узла хлорирования

Изучив технологический процесс, было выявлено наиболее значимое место для расположения нейронной сети и виртуального анализатора. Узел технологической схемы представлен на рис. 1.

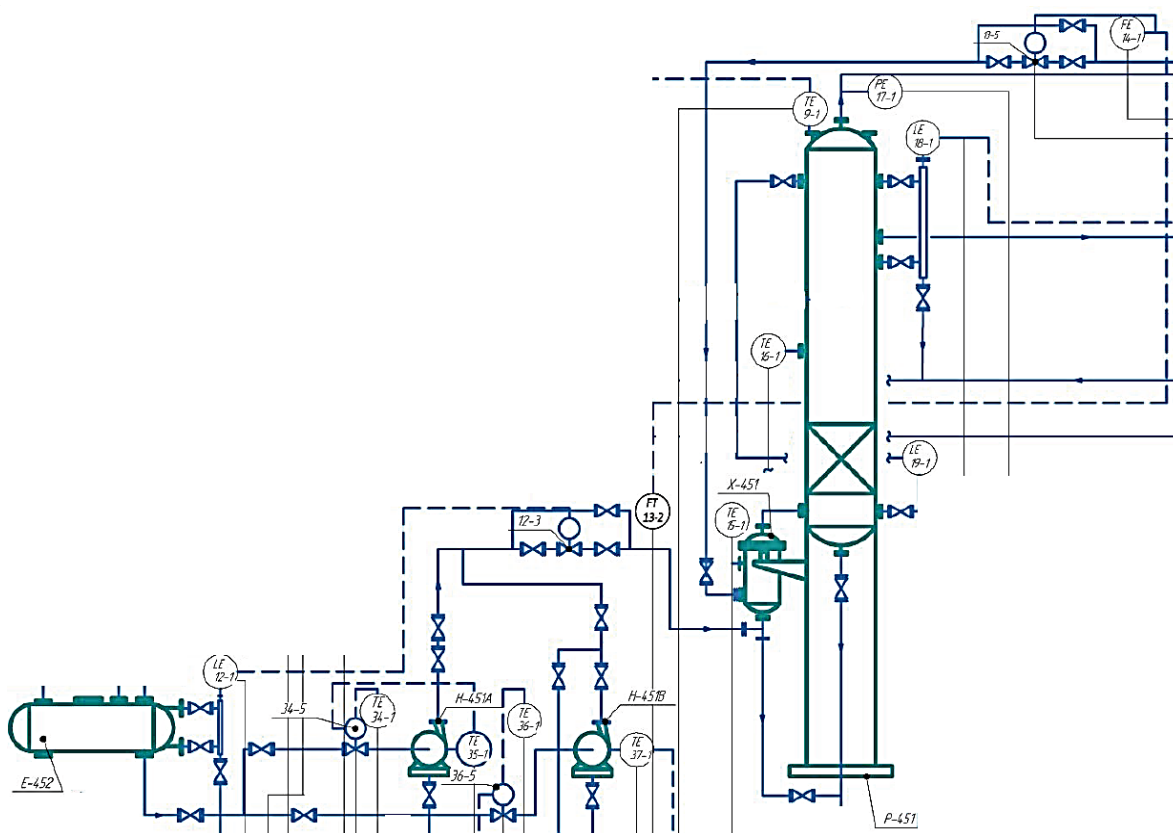


Рис. 1 Узел хлорирования дихлорэтана

Уровень в емкости (поз. *E-452*) в пределах 10–90% контролируется прибором (поз. *LE 12-1*) и поддерживается с помощью клапана (поз. *I2-3*), установленного на откачке жидкой фазы дихлорэтана в реактор хлорирования (поз. *P-451*). Из емкости (поз. *E-452*) насосом (поз. *H-451*) *A, B* сконденсировавшийся дихлорэтан подается в смеситель (поз. *X-451*). Расход дихлорэтана в пределах 6–14 м³/ч регистрируется прибором (поз. *FT 13-2*). В смеситель *X-451* параллельно с дихлорэтаном поступает поток испаренного хлора. Регулятор *FE 14-1* обеспечивает поддержание его объемного расхода в заданном диапазоне от 14 до 34 нм³/ч, основываясь на показаниях расходомера дихлорэтана *FT 13-2*. Температурный режим в аппарате контролируется прибором *TE 15-1*, показания которого должны находиться в интервале 60–80 °С. После смешения реагенты поступают в реактор (поз. *P-451*). Процесс хлорирования в реакторе (поз. *P-451*) осуществляется при температуре 70 °С и давлении 0.2 МПа (2.0 кгс/см²) в присутствии катализатора 0.02–0.05% масс. хлорного железа, образующегося за счет взаимодействия

стальных колец с хлором. Предусмотрен контроль температуры дихлорэтана в реакторе (поз. *P-451*) в пределах 60–80 °С прибором (поз. *TE 16-1*). Контроль давления в реакторе (поз. *P-451*) в пределах 0.15–0.22 МПа ведётся по прибору (поз. *PE17-1*).

Разработка виртуального анализатора

Чтобы достичь высокого уровня качества продукта, было необходимо высчитать параметр активности (или качества) дихлорэтана, поступающего из смесителя в реактор. При подсчете использовались формулы (1) и (2). Формула (1) позволила перевести объемный расход из нормальных условий в рабочие, с учетом текущих температуры и давления в смесителе [Мур216]. Далее, зная рабочий объемный расход и объем смесителя, высчитали непосредственно активность (или качество) дихлорэтана (2):

$$Q_{C_2H_4Cl_2} = \frac{Q_{C_2H_4Cl_2, н.у.}}{P_{н.у.}} \times T_{смесителя} \times \frac{P_{смесителя}}{T_{н.у.}}. \quad (1)$$

$$AT_{C_2H_4Cl_2} = \frac{Q_{C_2H_4Cl_2}}{V_{смесителя}}. \quad (2)$$

Параметры, поступающие на вход виртуального анализатора: $F_{двх, н.у.}$ – расход дихлорэтана на входе в смеситель при нормальных условиях; $P_{вх, н.у.}$ – давление при нормальных условиях; $T_{двх}$ – температура дихлорэтана на входе в смеситель; $T_{н.у.}$ – температура при нормальных условиях; $T_{смесителя}$ – температура в смесителе; M – мольный расход; R – универсальная газовая постоянная; $V_{смесителя}$ – объем смесителя; $P_{смесителя}$ – давление в смесителе [Абд21].

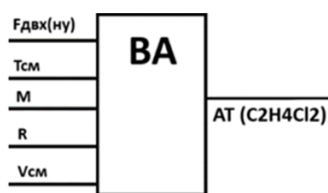


Рис. 2 Структурная схема виртуального анализатора

На рис. 2 представлена структурная схема программного модуля, выполняющего функции виртуального анализатора. Данный инструмент, разработанный в среде моделирования Simulink (пакет MATLAB), предназначен для расчета в реальном времени параметра, характеризующего активность (качество) дихлорэтана. Интерфейс и логика работы созданного виртуального анализатора проиллюстрированы на рис. 3 [Мед02].

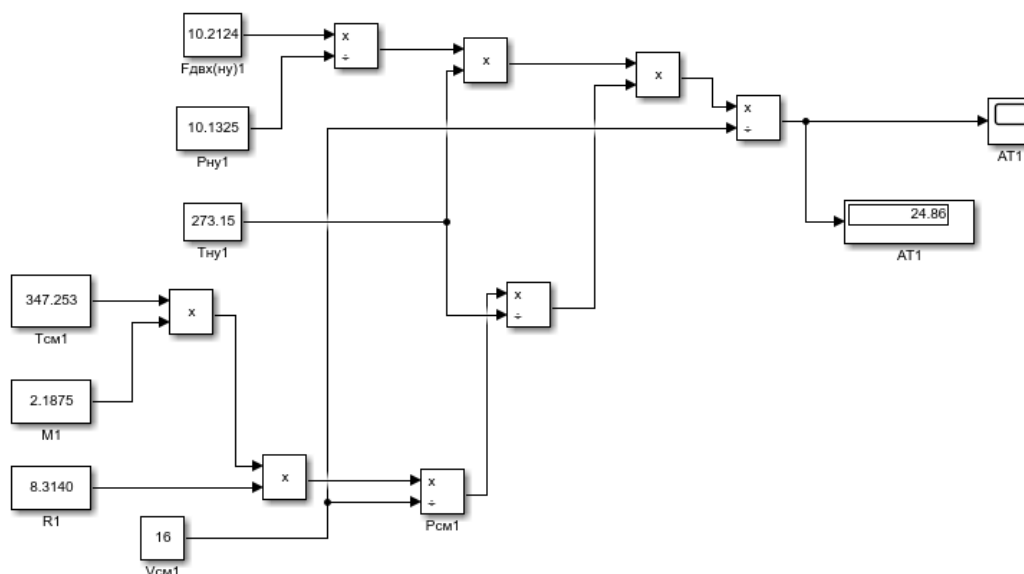


Рис. 3 Виртуальный анализатор, разработанный в среде MatLab

Архитектура нейронной сети

В качестве входных параметров для разработанной искусственной нейронной сети были выбраны ключевые технологические переменные, измеряемые на входе в смеситель: $F_{двх, н.у.}$ – объемный расход дихлорэтана, приведенный к нормальным условиям; $F_{хвх, н.у.}$ – объемный расход хлора, приведенный к нормальным условиям; $P_{вх}$ – давление в системе; $T_{двх}$ – температура потока дихлорэтана; $T_{н.у.}$ – температура при нормальных условиях; $T_{смесителя}$ – температура в смесителе; M – мольный расход; R – универсальная газовая постоянная; $V_{смесителя}$ – объем смесителя; $P_{смесителя}$ – давление в смесителе. На рис. 4 представлена структурная схема нейронной сети.

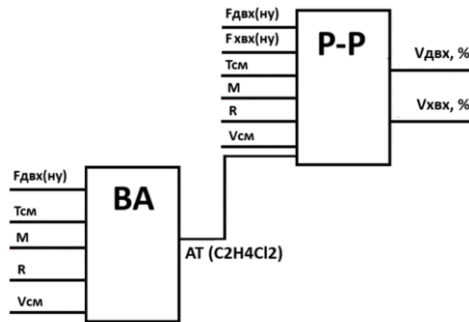


Рис. 4 Структурная схема нейронной сети

Разработка нейронной сети для управления регулирующим клапаном в узле хлорирования выполняется в программной среде MATLAB с привлечением специализированных пакетов Neural Network Toolbox и Simulink. Обучение модели планируется проводить на основе модифицированного алгоритма Levenberg-Marquardt, который эффективно решает задачи оптимизации методом наименьших квадратов [Ней17]. Созданная нейросеть интегрируется в среду Simulink с помощью функции gensim(net). Входными данными для блока нейронной сети (NNET) служат технологические параметры, а также показатель качества АТ, рассчитываемый виртуальным анализатором. Логика работы системы, представленная на рис. 5, заключается в следующем: виртуальный анализатор вычисляет текущую активность дихлорэтана (АТ); это значение вместе с данными от приборов *FE 14-1* и *FT 13-2* поступает на вход нейросетевой модели; на выходе блока NNET формируются управляющие сигналы, определяющие степень открытия регулирующих клапанов (поз. 12-3 и 13-5) [Мур24].

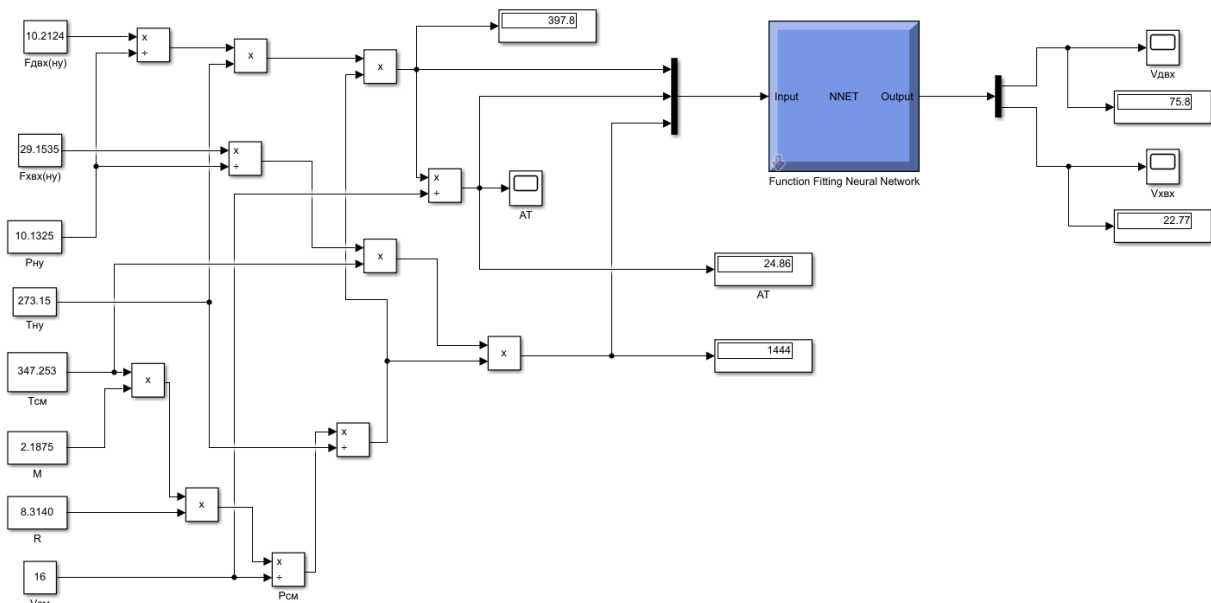


Рис. 5 Виртуальный анализатор и нейронная сеть в среде Simulink MATLAB

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 представлены интерфейсные окна, отображающие ход обучения нейронной сети в среде Simulink MATLAB.

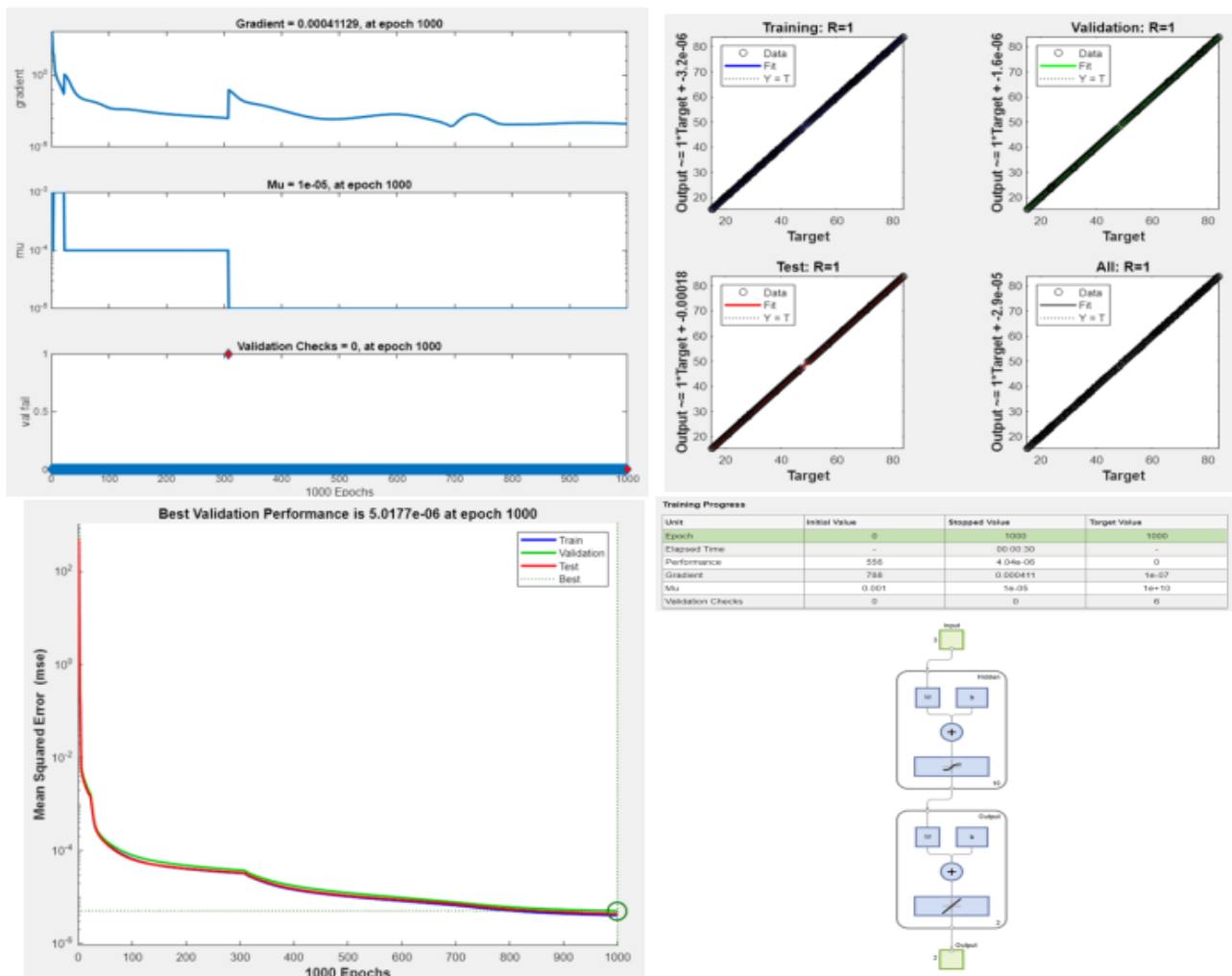


Рис. 6 Результаты обучения нейронной сети

Анализ графика обучения (Performance), доступного через одноименную кнопку, показал, что среднеквадратичная ошибка (MSE) достигла значения 5.0177×10^{-6} . Столь низкая величина ошибки свидетельствует о высокой точности и корректности обучения проектируемой управляющей сети [Рос24].

Дополнительную оценку качества обучения предоставляет анализ графиков регрессии. На них отображена зависимость сетевых прогнозов (выходных данных) от целевых значений (откликов) для наборов данных обучения (Training), проверки (Validation), тестирования (Test) и общего набора (All). Идеальному соответствию модели, при котором выходные данные равны целевым, соответствует расположение точек вдоль биссектрисы (линии под углом 45°). Во всех четырех случаях наблюдается именно такая картина. Коэффициент корреляции (R) для каждого графика равен 1, что указывает на наличие сильной функциональной связи между переменными и подтверждает высокую точность построенной нейронной сети.

График Gradient демонстрирует динамику изменения градиента в процессе обучения. Чем ближе его конечное значение к нулю, тем стабильнее и точнее прошел процесс обучения и тем надежнее будут результаты тестирования сети. В данном случае достигнутое значение градиента (Gradient = 0.00041129) является минимальным, что указывает на высокую точность и сходимость алгоритма обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённой работы была разработана и смоделирована интеллектуальная система управления процессом хлорирования, ядром которой стала нейронная сеть, работающая в связке с виртуальным анализатором. Ключевым достижением является создание виртуального анализатора, который в режиме реального времени рассчитывает интегральный показатель активности дихлорэтана (АТ), что решает проблему отсутствия прямых оперативных измерений качества реакционной среды. Разработанная нейронная сеть, использующая этот показатель, и данные технологических датчиков продемонстрировали исключительную точность при обучении по алгоритму Левенберга–Марквардта, что подтверждается достигн утой среднеквадратичной ошибкой порядка 5.0177×10^{-6} и коэффициентом корреляции $R = 1$ [Бул23].

Практическая ценность исследования заключается в переходе от классического регуляторного управления к адаптивной системе, способной компенсировать колебания в свойствах сырья и состоянии катализатора. Внедрение подобного решения позволит существенно повысить стабильность технологического режима, селективность целевой реакции и экономическую эффективность производства за счёт оптимизации расхода реагентов. Таким образом, представленная работа предлагает готовую методологию для модернизации систем управления процессами хлорирования, направленную на повышение их безопасности, надёжности и продуктивности. Дальнейшие исследования целесообразно направить на тестирование системы в контуре динамической имитационной модели полного технологического цикла для верификации её устойчивости в долгосрочной перспективе [Кос06].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- | | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [Ras25] | Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., Karimli V. I., Abdullayeva N. A. Formation of structures in media containing oil // Systems Engineering and Information Technologies. 2025. Vol. 7, No. 2(21). P. 103–108. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p107 . EDN: UFZDNC. | Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., Karimli V. I., Abdullayeva N. A. "Formation of structures in media containing oil" // Systems Engineering and Information Technologies. 2025. Vol. 7, No. 2(21). P. 103-108. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p107 . EDN: UFZDNC. |
| [Абд21] | Абдрафикова Ф. Ф., Муравьева Е. А. Технология FMEA-анализа процесса добычи нефти // СИИТ. 2021. Т. 3, № 2(6). С. 50–57. DOI: 10.54708/26585014_2021_32650 . EDN: HUPBIQ. | Abdrfikova F. F., Muravyova E. A. FMEA analysis technology for the oil production process // SIIT. 2021. Vol. 3, No. 2(6). P. 50-57. DOI: 10.54708/26585014_2021_32650 . EDN: HUPBIQ. (In Russian). |
| [Бул23] | Булгакова А. В., Сафонова Т. В., Диденко А. Ю. Этапы разработки и внедрения нейронной сети в проект // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2023. № 1(45). С. 87–92. EDN: PRKZUT. | Bulgakova A. V., Safonova T. V., Didenko A. Yu. Stages of development and implementation of a neural network in the project // Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law, No. 1(45), 2023), pp. 87-92. EDN: PRKZUT. |
| [Кос06] | Костенко А. В., Мусаев А. А., Тураносов А. В. Виртуальный анализатор сырьевых потоков // Нефтепереработка и нефтехимия. 2006. № 1. С. 35–44. EDN: HTPNMN. | Kostenko A. V., Musaev A. A., Turanosov A. V. Virtual analyzer of raw material flows // Oil Refining and Petrochemistry. 2006. No. 1, pp. 35-44. EDN: HTPNMN. (In Russian). |
| [Мед02] | Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети в MATLAB 6. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с. | Medvedev V. S., Potemkin V. G. MATLAB 6 Neural Networks. Moscow: DIALOG-MEPhI, 2002. (In Russian). |
| [Мур21] | Муравьева Е. А., Габитов Р. Ф., Сабанов П. А. Система управления процессом разделения на цементном производстве // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: II Междунар. науч. конф. Красноярск, 2021. Т. 1889. С. 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022050 . EDN: CWSSVY. | Muravyova E. A., Gabitov R. F., Sabanov P. A. Separation process control system in the cement production facility // II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk, 2021. Vol. 1889. P. 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022050 . EDN: CWSSVY. (In Russian). |
| [Мур216] | Муравьева Е. А., Коченков А. В. Разработка интеллектуальной системы управления процессом подготовки и перекачки воды в охлаждающем контуре аммиачной станции // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13. С. 252–258. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-4-252-258 . EDN: TOMANJ. | Muravyova E. A., Kochenkov A. V. Development of an intelligent control system for the process of preparation and water transfer in the cooling circuit of an ammonia station // Nanotechnologies in Construction. 2021. Vol. 13. P. 252–258. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-4-252-258 . EDN: TOMANJ. (In Russian). |
| [Мур24] | Муравьева Е. А., Николаева А. И. Разработка нейронной сети для управления процессом пиролиза дихлорэтана с целью повышения эффективности процесса // СИИТ. | Muravyova E. A., Nikolaeva A. I. Development of a neural network for controlling the dichloroethane pyrolysis process in order to improve the process efficiency // SIIT. |

2024. Т. 6, № 4(19). С. 69–76. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p69](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p69). EDN: BJQRUV.
- [Ней17] Нейронные сети в Matlab: Уч. пособ. СПб.: Военмех, 2017. 165 с. ISBN 978-5-906920-72-0.
- [Рос24] Ростовцев В. С. Искусственные нейронные сети. 4-е изд. СПб: Лань, 2024. 197 с. ISBN 978-5-507-47362-5.
2024. Vol. 6, No. 4(19). Pp. 69-76. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p69](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p69). EDN: BJQRUV. (In Russian).
- Neural Networks in Matlab: a tutorial. Saint Petersburg: "Voenmekh", 2017. ISBN 978-5-906920-72-0.
- Rostovtsev V. S. Artificial Neural Networks. 4th ed. St. Petersburg: Lan, 2024. ISBN 978-5-507-47362-5. (In Russian).

ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

ГАЙДУКОВА Александра Дмитриевна

Уфимский государственный нефтяной технический университет. sasha.gaydukova.2002@mail.ru ORCID: [0009-0007-4214-4140](https://orcid.org/0009-0007-4214-4140)
Студ. спец. «Управление в технических системах», Институт химических технологий и инжиниринга (Стерлитамак).

МУРАВЬЕВА Елена Александровна

Уфимский государственный нефтяной технический университет. muraveva_ea@mail.ru ORCID: [0000-0002-7118-5570](https://orcid.org/0000-0002-7118-5570).
Зав. каф. АТИС, Институт химических технологий и инжиниринга (Стерлитамак), профессор. Д-р техн. наук (Уфимск. гос. нефт. техн. ун-т, 2014). Иссл. в обл. интеллектуальных систем управления сложными объектами и процессами.

ГРИГОРЬЕВА Тамара Владимировна

Уфимский государственный нефтяной технический университет. Bulgach2005@yandex.ru ORCID: [0000-0002-3893-4998](https://orcid.org/0000-0002-3893-4998).
Доцент каф. ИМФ, Институт химических технологий и инжиниринга (Стерлитамак). Канд. пед. наук (Уфимск. гос. нефт. техн. ун-т, 1989).

GAYDUKOVA Alexandra Dmitrievna

Ufa State Petroleum Technological University. sasha.gaydukova.2002@mail.ru ORCID: [0009-0007-4214-4140](https://orcid.org/0009-0007-4214-4140)
Student majoring in "Control in Technical Systems", Institute of Chemical Technology and Engineering in Sterlitamak.

MURAVYOVA Elena Aleksandrovna

Ufa State Petroleum Technological University. muraveva_ea@mail.ru ORCID: [0000-0002-7118-5570](https://orcid.org/0000-0002-7118-5570).
Head of the ATIS Department, Institute of Chemical Technology and Engineering in Sterlitamak. Professor. Doctor of Engineering Sciences (Ufa State Petrol. Techn. Uni., 2014). Research in: intelligent control systems for complex objects and processes.

GRIGORIEVA Tamara Vladimirovna

Ufa State Petroleum Technological University. Bulgach2005@yandex.ru ORCID: [0000-0002-3893-4998](https://orcid.org/0000-0002-3893-4998).
Associate Professor, Department of IMF, Institute of Chemical Technology and Engineering in Sterlitamak. Cand. of Pedagogical Sciences (Ufa State Petrol. Engineering Uni., 1989).

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Разработка нейронной сети для управления процессом хлорирования рециклового дихлорэтана с использованием виртуального анализатора.

Авторы: Гайдукова А. Д., Муравьева Е. А., Григорьева Т. В.

Аннотация: В статье представлен метод управления процессом хлорирования рециклового дихлорэтана, основанный на совместном использовании виртуального анализатора и нейронной сети. Виртуальный анализатор, реализованный в среде Simulink MATLAB, вычисляет ключевой параметр – активность дихлорэтана (АТ) – на основе уравнения состояния. Данный параметр совместно с технологическими переменными подается на вход нейронной сети, которая формирует управляющие воздействия на регулирующие клапаны. Обучение сети по алгоритму Левенберга–Марквардта позволило достичь высокой точности прогноза: коэффициент корреляции $R = 1$, среднеквадратичная ошибка $5.0177 \cdot 10^{-6}$. Предложенный подход позволяет повысить эффективность и стабильность процесса.

Ключевые слова: Нейронная сеть; виртуальный анализатор; качество; активность.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 12 января 2026 г.

Title: Development of a neural network for controlling the chlorination process of recycled dichloroethane using a virtual analyzer.

Authors: Gaidukova A. D., Muravyova E. A., Grigorieva T. V..

Abstract: This article presents a method for controlling the chlorination of recycled dichloroethane based on the combined use of a virtual analyzer and a neural network. The virtual analyzer, implemented in the Simulink MATLAB environment, calculates a key parameter—dichloroethane activity (AT)—based on an equation of state. This parameter, along with process variables, is fed to the input of a neural network, which generates control responses for the control valves. Network training using the Levenberg-Marquardt algorithm enabled high forecast accuracy: the correlation coefficient $R = 1$, and the root-mean-square error was $5.0177 \cdot 10^{-6}$. The proposed approach improves the efficiency and stability of the process.

Key words: Neural network; virtual analyzer; quality; activity.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 12 January 2026.