

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБОРОТНЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ

© А. Д. Воробьев¹, А. В. Бильдюкевич², Е. В. Воробьева¹,
Е. В. Лаевская^{1,*}, А. Р. Черникова¹

¹ Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, д. 9/1

² Институт физико-органической химии НАН Беларуси,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, д. 13

* E-mail: layeuskaya@gmail.com

Поступила в Редакцию 7 мая 2024 г.

После доработки 19 июля 2024 г.

Принята к публикации 21 августа 2024 г.

В статье рассматривается моделирование водно-химических процессов в оборотных системах охлаждения с использованием нейронной сети, обученной на основе большого массива параметров, с целью прогнозирования эффективности ингибиторов осадкообразования в промышленных условиях. В качестве входных параметров для модели нейронной сети использованы pH, жесткость, щелочность, индекс насыщения Ланжелье, коэффициент концентрирования солей, тип (полимер, фосфонат) и концентрации ингибиторов осадкообразования. Выходным параметром модели является транспорт кальция — показатель, характеризующий изменение концентрации ионов кальция в жидкой фазе. Полученные результаты демонстрируют высокий уровень корреляции между экспериментальными данными и результатами, рассчитанными с использованием обученной нейронной сети. Проведенные контрольные эксперименты подтверждают высокую эффективность прогнозируемой нейронной сетью композиции полимерного и фосфонатного ингибиторов осадкообразования.

Ключевые слова: ингибитор осадкообразования; водооборотные системы; моделирование; алгоритмы; нейронные сети

DOI: 10.31857/S0044461824030095; EDN: YATVGD

Образование минеральных отложений, в частности, карбоната кальция является одной из технологических проблем, связанных с использованием воды в промышленных оборотных системах охлаждения. Такие отложения на поверхностях аппаратов и трубопроводов снижают эффективность технологического оборудования, увеличивают эксплуатационные расходы и риски создания аварийных ситуаций. Для обеспечения эффективного функционирования водооборотных систем необходима химическая обработка

охлаждающей воды реагентами, ингибирующими кристаллизацию солей.*

В качестве ингибиторов осадкообразования в оборотных системах охлаждения промышленных предприятий широко используют производные фос-

* Водоподготовка: Справ. / Под ред. С. Е. Беликов. М.: Аква-Терм, 2007. С. 28–76.

The Nalco Water: Handbook / Ed. D. J. Flynn. McGraw-Hill, 2009. P. 154–236.

фоновых кислот [1, 2], биоразлагаемые полимеры синтетического (полиаспартат, полиэпоксисукцинат) и природного (модифицированный пектин, полисахариды) происхождения, поликарбоновые кислоты [3–5]. В последние годы при разработке новых полимерных ингибиторов используют подход, основанный на сополимеризации мономеров с различными функциональными группами [6, 7].

Ограничением к применению новых видов ингибиторов в охлаждающих оборотных системах предприятий является необходимость выполнения после лабораторных исследований стендовых испытаний, моделирующих реальные условия эксплуатации оборотных систем, а затем полномасштабных испытаний в промышленных условиях. В процессе испытаний и внедрения новых ингибиторов из-за непрогнозируемого влияния физико-химических факторов (состав водного раствора, pH, концентрация солей, температура и др.), влияющих на растворимость карбоната кальция, в системе возможно интенсивное осадкообразование и образование теплоизоляционного слоя на поверхностях трубопроводов и теплообменников, что является серьезной технологической проблемой и требует остановки и очистки водооборотной системы.

В связи с возможными техническими осложнениями в промышленных условиях преимущественно используют традиционные ингибиторы на основе фосфонатов, несмотря на отрицательные экологические последствия их применения (эвтрофикация природных водоемов при сбрасывании в них воды, содержащей фосфорсодержащие соединения [8]).

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки методологии оценки влияния ингибиторов осадкообразования на водно-химические процессы в оборотных охлаждающих системах и прогнозирования эффективности ингибирующего действия химических соединений различных классов в зависимости от параметров водооборотной системы и концентрации ингибитора.

Цель исследования — разработка метода моделирования водно-химических процессов в оборотных системах охлаждения с использованием алгоритмов искусственных нейронных сетей и его применение для прогнозирования эффективности ингибиторов осадкообразования на примере полимеров и фосфонатов.

Экспериментальная часть

Для моделирования водно-химических процессов и осадкообразования в оборотных системах охлаж-

дения в работе использовали искусственную нейронную сеть (далее — нейросеть) — многослойный персептрон с механизмом обратного распространения ошибки. Нейроны сети расположены на слоях входа, выхода и в скрытом слое. Количество входных нейронов соответствует числу входных переменных нейронной сети, количество выходных нейронов — числу выходных переменных, между входом и выходом существует скрытый слой, который может иметь любое количество нейронов [9, 10].

Исходными данными для обучения нейросети служили эксплуатационные параметры водооборотных систем химического предприятия ОАО «Завод горного воска» (за двухлетний период) и теплоэлектроцентрали Минская ТЭЦ (за однолетний период). В оборотных системах охлаждения данных предприятий использовали полимерный (полиакриловую кислоту) и фосфонатный (фосфонбутантрикарбоновой кислоты натриевая соль) ингибиторы осадкообразования. В общей сложности в процессе обучения, тестирования и валидации нейросетевой модели использовались результаты 560 экспериментов и наблюдений. Во избежание «переобучения» нейросети максимальная продолжительность обучения составляла не более 1000 эпох, либо процесс обучения автоматически останавливался, когда среднеквадратичное отклонение результатов перекрестной проверки изменялось незначительно в течение 100 последовательных эпох.

Наружный входной слой нейросети состоит из 7 нейронов, каждый из которых соответствует определенному параметру системы: pH; жесткость; щелочность; индекс насыщения Ланжелье, характеризующий разницу между текущим водородным показателем воды (pH) и показателем pH насыщенного раствора; концентрации фосфонатного и полиакрилатного ингибиторов; коэффициент концентрирования, характеризующий отношение концентрации солей в оборотной воде к их концентрации в добавочной воде.

Выходной слой представлен одной переменной (транспорт кальция, X), соответствующей отношению содержания ионов кальция в жидкой фазе к общему содержанию в системе. Расчет транспорта кальция основан на сравнении коэффициентов концентрирования, рассчитанных по значениям кальциевой жесткости и содержанию хлоридов. При эффективной реагентной обработке водооборотной системы данный показатель стремится к 100%, минимальное допустимое значение на практике составляет 85% [11, 12].

Скрытый слой состоит из 9 нейронов и служит для установления взаимосвязи и степени влияния исход-

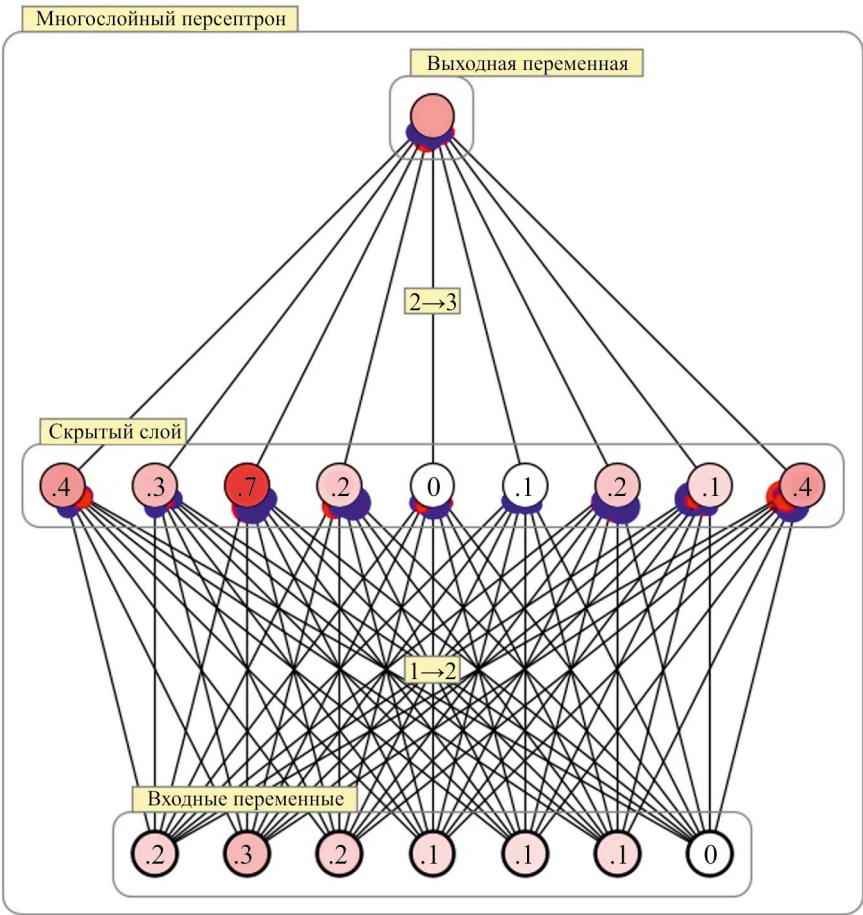


Рис. 1. Схематическое изображение модели нейросети.

ных параметров на основной показатель процесса. Схематическое изображение структуры нейросети представлено на рис. 1.

При моделировании процессов кристаллизации с использованием данных, предоставленных предприятиями, 60% экспериментальных показателей использовались для обучения нейросети, 30% — для контроля обучения, оставшиеся 10% — для тестирования и проверки достоверности разработанной модели. Для проектирования нейронных сетей и модели-

рования процессов кристаллизации в охлаждающих водооборотных системах использовали программное обеспечение Simbrain.

Для проведения расчетов в нейросетевой модели в качестве входных переменных вносили параметры воды случайно выбранных пяти наблюдений охлаждающей системы, которые указаны в табл. 1.

Стендовые испытания проводили на лабораторной установке PMAC SCL-30P-2A (Process Measurement & Control Systems) (рис. 2), моделирующей гидро-

Таблица 1

Параметры воды в охлаждающей системе для проведения расчетов с использованием нейросетевой модели

Параметры воды	Номер системы				
	1	2	3	4	5
рН	8.0	8.6	8.8	8.8	8.6
Щелочность, ммоль-экв·л ⁻¹	3.5	5.8	5.8	6.7	6.9
Жесткость, ммоль-экв·л ⁻¹	7.3	6.3	7.9	8.1	9.8
Коэффициент концентрирования	2.9	1.6	1.9	2.1	2.2
Индекс насыщения Ланжелье	1.4	1.5	2.5	2.6	2.5

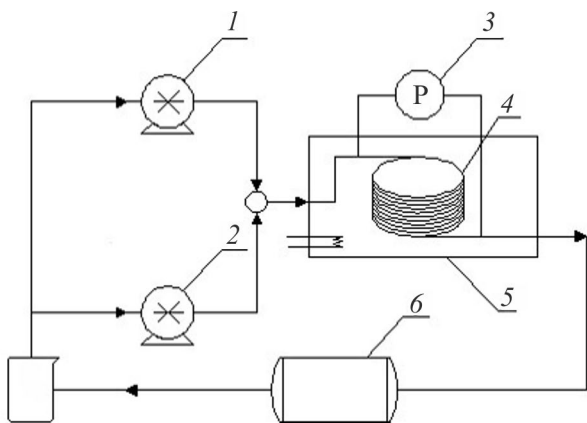


Рис. 2. Схема лабораторной установки, моделирующей гидродинамический режим оборотных систем охлаждения.

1, 2 — циркуляционный насос; 3 — дифференциальный манометр; 4 — металлический капилляр; 5 — термостат; 6 — теплообменное устройство.

динамический режим оборотных систем охлаждения. Для приготовления модельных растворов использовали $MgCl_2$, $CaCl_2$, $NaHCO_3$ (все — х.ч., ООО «Меркурий»). При проведении исследований на модельной установке растворы $MgCl_2$, $CaCl_2$, $NaHCO_3$ подавали в металлический капилляр при постоянном расходе $30 \text{ мл} \cdot \text{мин}^{-1}$. После смешивания и нагревания растворов до заданной температуры на внутренних стенках капилляра происходит образование осадка $CaCO_3$. В растворе солей, циркулирующем в оборотной системе установки, определяли концентрацию кальция в жидкой фазе и рассчитывали транспорт кальция.

При проведении стендовых испытаний для проверки адекватности математической модели задавали те же параметры воды (рН; жесткость; щелочность; индекс насыщения Ланжелье; концентрация ингибиторов; коэффициент концентрирования), которые использовались в качестве исходных данных в процессе обучения нейросети. Гидродинамический режим работы установки соответствовал режиму течения среды в промышленных системах охлаждения. Так, линейная скорость потока воды в модельной установке при внутреннем диаметре капилляра 0.8 мм и расходе $30 \text{ мл} \cdot \text{мин}^{-1}$ составляла $0.995 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, число Рейнольдса — 1680 , что соответствовало ламинарному режиму течения. Типовая линейная скорость потока в промышленных кожухотрубчатых теплообменных аппаратах принимается от 0.5 до $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, число Рейнольдса — от 1500 до $10\,000$ при внутреннем диаметре труб от 12 до 38 мм [13].

Ингибиторами осадкообразования служили полимеры: полиакриловая кислота с молекулярной массой 2.0×10^3 (Sigma-Aldrich, кат. № 192023), 5.0×10^3 (Sigma-Aldrich, кат. № 192031) и 8.0×10^3 (Sigma-Aldrich, кат. № 416029), полиаспартамовая кислота с молекулярной массой 6.0×10^3 (Sigma-Aldrich, кат. № P3418), полиметакриловая кислота с молекулярной массой 5.0×10^3 (Sigma-Aldrich, кат. № 674044), сополимер малеиновой и акриловой кислот с молекулярной массой $4.0 \times 10^3 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ (Sigma-Aldrich, кат. № 416053), сополимер Na-метакрилсульфоната с акрилатом натрия с молекулярной массой $4.0 \times 10^3 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ (Alfa Chemistry, кат. № ACM40623754), а также фосфонаты — натриевые соли аминотриметиленфосфоновой (Sigma-Aldrich, кат. № 72568) и фосфонбутантрикарбоновой кислот (Alfa Chemistry, кат. № ACM37971361-2).

Обсуждение результатов

Результаты сопоставления данных, полученных с использованием нейросети, и экспериментальных значений транспорта кальция, предоставленных предприятиями и не использованных для обучения и контроля обучения нейросети, свидетельствуют о высокой линейной корреляции ($R^2 = 0.9662$) между прогнозируемыми и реальными показателями транспорта кальция (рис. 3). Нейросетевая модель с девятью скрытыми нейронами характеризуется минимальными значениями среднеквадратического отклонения для спрогнозированного значения транспорта кальция.

С использованием разработанной модели нейросети получена прогнозная зависимость выходного параметра (транспорт кальция) от концентрации

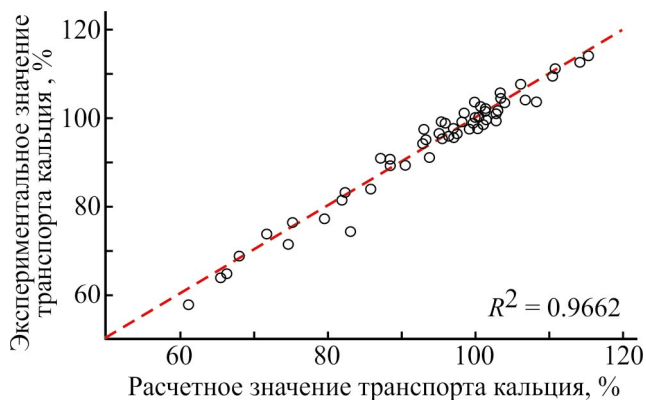


Рис. 3. Корреляция экспериментальных (предоставленные предприятиями) и расчетных (полученные с использованием нейросети) показателей транспорта кальция.

ингибиторов осадкообразования (в диапазоне концентраций от 3.0 до 27.0 мг·л⁻¹) — полиакриловой кислоты с молекулярной массой 5.0×10^3 и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислоты.

По данным математической модели, в присутствии в системе полимерного ингибитора в концентрации 7.0–13.0 мг·л⁻¹ транспорт кальция сначала увеличивается, а затем снижается (рис. 4, а). Повышение концентрации фосфонатного ингибитора приводит к увеличению выходного параметра X_m . С ростом концентрации ингибитора выше 10.0 мг·л⁻¹ этот показатель практически не меняется (рис. 4, б).

Повышение транспорта кальция при введении в систему ингибитора свидетельствует об увеличении содержания ионов кальция в жидкой фазе и замедлении кристаллизации карбоната кальция. Ингибирующее действие фосфоновых соединений обусловлено их влиянием на структуру кристаллизующегося карбоната кальция [1, 14]. Полимерные ингибиторы обладают более выраженным диспергирующим действием, позволяющим снизить скорость осаждения образовавшихся кристаллов. Другой возможный механизм действия полимерных ингибиторов основан на морфологическом изменении структуры кристаллического осадка благодаря селективной адсорбции молекул на активных центрах роста зародышей или поверхности образовавшихся кристаллов, что снижает скорость их роста [3, 15]. Снижение эффективности ингибирующего действия полимерного ингибитора при увеличении его концентрации может быть связано с взаимодействием молекул полимера, адсорбированных на разных частицах, что способствует их агрегации.

В стендовых испытаниях на модельной установке определены показатели транспорта кальция в системах с различными параметрами воды (рН; жесткость; щелочность; коэффициент концентрирования; индекс насыщения Ланжелье) в зависимости от концентрации полимерного и фосфонатного ингибиторов. Аналогичные параметры системы вводили в нейросетевую модель.

Результаты стендовых испытаний без ингибиторов показали снижение показателя «транспорт кальция» до 42.3%, что свидетельствует о низком содержании кальция в растворе и образовании осадка CaCO₃. Использование ингибиторов приводит к увеличению концентрации ионов кальция в жидкой фазе до 74.1–91.3 (табл. 2) и уменьшению осадкообразования.

Результаты сравнения расчетных (с использованием нейросетевой модели) и экспериментальных (полученных в результате стендовых испытаний) данных при одинаковых параметрах водной системы, представленные на рис. 5 в виде линейной зависимости, свидетельствуют о высокой корреляции (коэффициент детерминации $R^2 = 0.9789$) экспериментальных показателей транспорта кальция с показателями, прогнозируемыми моделью нейросети.

Результаты исследований на модельной установке позволяют провести сравнение эффективности ингибиторов осадкообразования различных классов и их композиций, однако без учета взаимного влияния постоянно изменяющихся параметров промышленной оборотной охлаждающей системы. Моделирование водно-химических процессов с использованием нейросети, обученной с привлечением большого массива экспериментальных данных, зависящих от состава

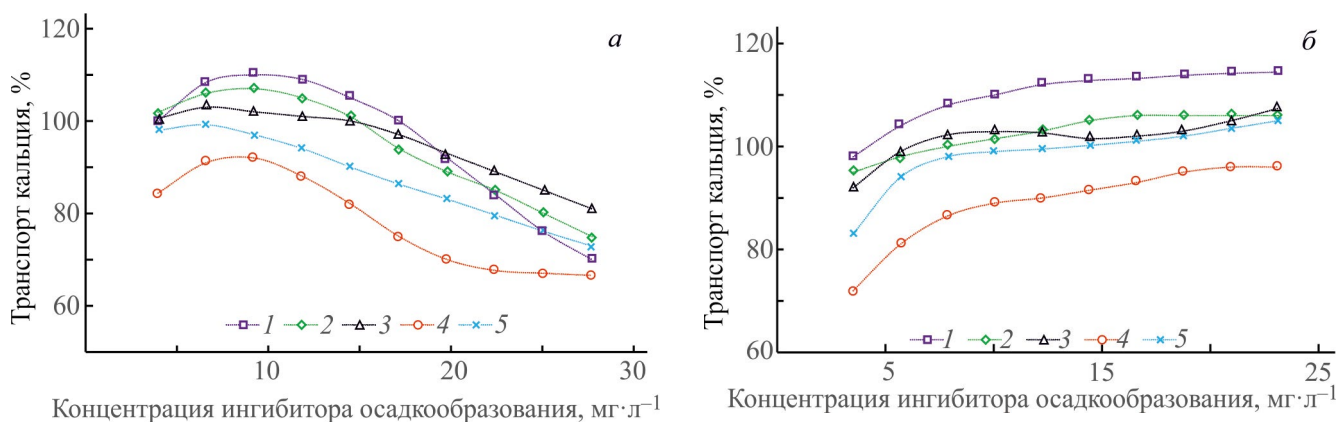


Рис. 4. Зависимость расчетного показателя транспорта кальция от концентрации ингибитора осадкообразования: полиакриловой кислоты с молекулярной массой 5.0×10^3 (а) и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислоты (б).

Модельная система с жесткостью (ммоль-экв·л⁻¹): 7.3 (1), 6.3 (2), 7.9 (3), 8.1 (4), 9.8 (5).

Таблица 2

Расчетные (с использованием нейросетевой модели) и экспериментальные (полученные на модельной установке) значения транспорта кальция в зависимости от условий модельных экспериментов

Условия модельных экспериментов							Транспорт кальция, %	
pH	щелочность, мг-экв·л ⁻¹	жесткость общ., мг-экв·л ⁻¹	коэффициент концентри- рования	индекс насыщения Ланжелье	концентрация натриевой соли фосфонбутантри- карбоновой кислоты, мг·л ⁻¹	концентрация полиакриловой кислоты, мг·л ⁻¹	эксперимент	расчет
8.5	4.6	5.8	1.8	1.3	4.2	4.2	74.1	80.0
8.8	6.0	7.9	2.4	2.5	3.6	3.6	74.5	81.0
8.3	3.5	7.7	2.3	1.8	3.6	3.6	77.0	82.0
8.4	3.6	7.8	2.5	1.9	3.8	3.8	75.7	82.2
8.5	7.0	7.5	2.3	1.5	12.6	12.6	76.0	83.1
8.8	6.2	7.5	2.4	1.7	8.4	16.8	76.9	84.0
8.6	6.1	7.6	2.2	2.3	5.1	5.1	79.0	85.1
8.4	3.5	7.9	2.3	1.9	3.8	3.8	80.0	85.2
8.9	6.2	7.5	2.3	1.9	8.4	16.8	78.3	86.1
8.7	7.8	8.4	2.2	1.9	12.6	12.6	80.7	87.8
7.1	4.7	5.7	1.7	0.6	4.6	4.6	82.4	89.0
8.5	3.6	7.1	2.2	1.9	5.3	5.3	81.0	90.1
8.7	5.6	6.7	2.0	2.3	7.7	7.7	83.9	90.4
8.6	6.1	8.2	2.4	2.3	6.5	6.5	84.1	91.8
8.6	5.9	6.9	2.0	2.2	7.8	7.8	87.3	94.2
8.7	6.0	7.4	2.1	2.4	5.4	5.4	86.9	95.2
8.6	3.5	4.4	1.4	1.9	5.4	5.4	88.2	97.2
9.0	6.3	7.9	2.0	2.7	7.6	7.6	90.8	99.2
8.8	6.6	8.0	2.1	2.5	6.5	6.5	91.3	99.8

воды, pH, температуры, химического состава и концентрации ингибитора в реальных водооборотных системах, позволяет прогнозировать эффективность

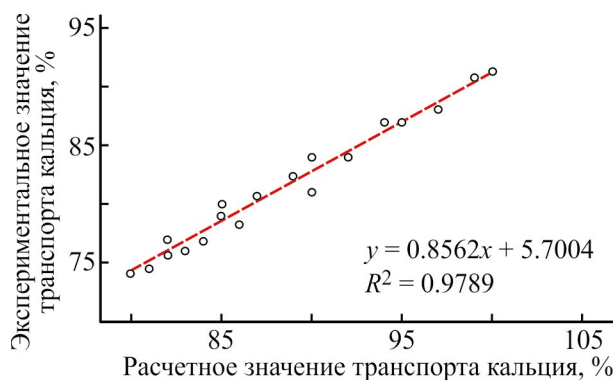


Рис. 5. Корреляция экспериментальных (полученных на модельной установке) и расчетных (полученных с использованием нейросети) показателей транспорта кальция.

ингибирующего действия реагентов в промышленных условиях. Контрольный показатель — транспорт кальция, рассчитанный с использованием обученной нейросетевой модели, коррелирует с экспериментальными данными оборотных охлаждающих систем предприятий и с результатами стендовых испытаний на модельной установке. Таким образом, оценка эффективности ингибирующего действия может быть проведена как в условиях стендовых испытаний, так и с использованием нейросетевого моделирования.

Ниже представлены результаты исследования (экспериментальные данные, полученные на модельной установке) эффективности полимерных ингибиторов и композиций на их основе: полиаспартамовой кислоты; полиакриловой кислоты с молекулярной массой $2.0 \cdot 10^3$, $5.0 \cdot 10^3$, $8.0 \cdot 10^3$; полиметакриловой кислоты; сополимера малеиновой и акриловой кислот; сополимера натрия-метакрилсульфоната с акрилатом натрия; аминотриметиленфосфоновой и фосфонбутан-

трикарбоновой кислот натриевых солей; композиции полиаспартамовой и полиакриловой кислот (1:1); полиаспартамовой и фосфонбутантрикарбоновой кислот (1:1). Концентрация ингибиторов в водной системе в стендовых испытаниях составляла 5.0; 10.0 и 15.0 мг·л⁻¹. Водно-химические параметры исследуемой системы (рН; жесткость; щелочность; индекс насыщения Ланжелье; концентрация ингибиторов; коэффициент концентрирования) соответствовали исходным данным при обучении нейросети.

Результаты выполненных исследований на модельной установке, характеризующие зависимость транспорта кальция от химической природы ингибитора осадкообразования, были использованы в нейросетевой модели для определения наиболее эффективных ингибиторов и расчета оптимальной концентрации исследованных ингибиторов.

Наиболее высокими показателями транспорта кальция, по данным нейросети, характеризуется водная система с композицией полимерного и фосфо-

натного ингибиторов [полиаспартамовой и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислот (1:1)]. Интервал концентраций исследованных ингибиторов 10.0–12.0 мг·л⁻¹. По данным нейросети, уменьшение концентрации полимерных ингибиторов менее 10.0 мг·л⁻¹, как и увеличение выше 12.0 мг·л⁻¹, приводит к снижению концентрации ионов кальция в растворе и увеличению осадкообразования в системе. Прогнозируемая нейросетью высокая эффективность композиции полимерного и фосфонатного ингибиторов (полиаспартамовой и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислот) и концентрация ингибитора 12.0 мг·л⁻¹ подтверждены экспериментально на модельной установке.

Показатель транспорта кальция при введении в водную систему полимерных ингибиторов составляет 82–88%, фосфонатных ингибиторов — 94–96% (рис. 6). Композиции полиаспартамовой и полиакриловой кислот с суммарной концентрацией компонентов 12 мг·л⁻¹ более эффективны по сравне-

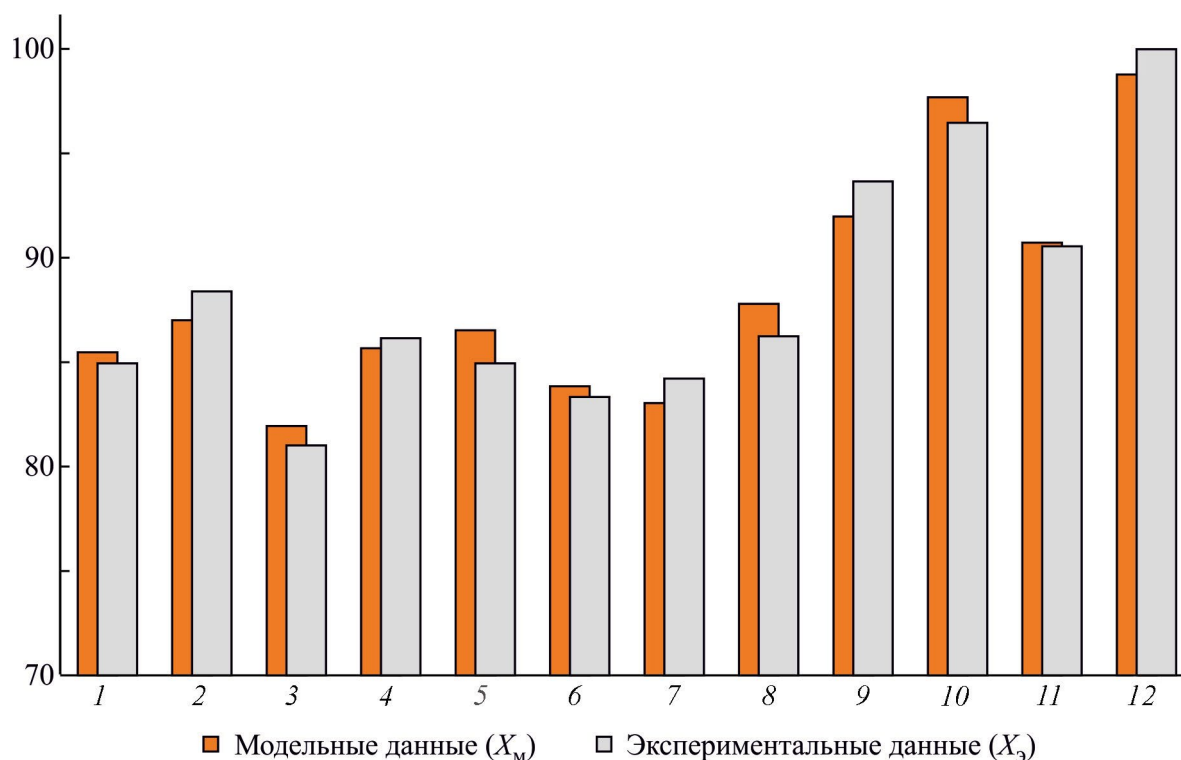


Рис. 6. Влияние полиаспартамовой кислоты [концентрация 5.0 (1), 12.0 мг·л⁻¹ (2)], полиакриловой кислоты (концентрация 12.0 мг·л⁻¹) с молекулярной массой $2.0 \cdot 10^3$ (3), $5.0 \cdot 10^3$ (4), $8.0 \cdot 10^3$ (5), полиметакриловой кислоты (концентрация 12.0 мг·л⁻¹) (6), сополимера малеиновой и акриловой кислот (концентрация 12.0 мг·л⁻¹) (7), сополимера натрия-метакрилсульфоната с акрилатом натрия (концентрация 12.0 мг·л⁻¹) (8), натриевой соли аминотриметиленфосфоновой (9) и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой (10) кислот, композиции полиаспартамовой и полиакриловой кислот (1:1) (11), полиаспартамовой и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислот (1:1) (12) на транспорт кальция.

нию с использованием отдельных компонентов и обеспечивают транспорт кальция на уровне 90.5%. Наиболее высокие показатели транспорта кальция (99%) достигаются при введении в систему композиции полиаспартамовой кислоты и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислоты.

Выводы

Моделирование водно-химических процессов в оборотных системах охлаждения с применением искусственных нейронных сетей позволило выявить влияние различных параметров системы и введенных химических соединений на скорость образования осадка CaCO_3 . Прогнозируемая нейронной сетью ингибирующая активность композиции полиаспартамовой кислоты и натриевой соли фосфонбутантрикарбоновой кислоты была подтверждена в лабораторных экспериментах на модельной установке. Таким образом, метод математического моделирования с использованием нейронной сети позволяет прогнозировать эффективность ингибиторов осадкообразования в промышленных условиях с высокой точностью.

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

А. Д. Воробьев предложил идею направления исследований, занимался разработкой нейронной сети и ее обучением, контролировал результаты обучения и тестировал разработанную модель, проводил стендовые испытания для проверки адекватности математической модели, исследовал ингибирующую способность полимеров; А. В. Бильдюкевич, Е. В. Воробьева сформулировали цель работы, участвовали в постановке задач исследований, анализировали и интерпретировали данные, рассчитанные с использованием обученной нейросети, и экспериментальные результаты, полученные на модельной установке; Е. В. Лаевская занималась разработкой методологии и плана эксперимента, тестированием разработанной математической модели и интерпретацией результатов тестирования, участвовала в проведении стендовых испытаний; А. Р. Черникова проводила экспериментальные исследования фосфонатных и полимерных ингибиторов на модельной лабораторной установке.

Информация об авторах

Воробьев Артем Дмитриевич, к.т.н.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0243-5933>
Бильдюкевич Александр Викторович, д.х.н., проф., академик НАН Беларуси
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3662-9970>
Воробьева Елена Викторовна, д.х.н., проф.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0609-4151>
Лаевская Елена Васильевна, к.т.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9008-269X>
Черникова Анастасия Руслановна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6833-1914>

Список литературы

- [1] *Piana S., Gale J. D.* Understanding the barriers to crystal growth: Dynamical simulation of the dissolution and growth of urea from aqueous solution // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. V. 127. N 6. P. 1975–1982. <https://doi.org/10.1021/ja0433951>
- [2] *Liu Q., Xu G.-R., Das R.* Inorganic scaling in reverse osmosis (RO) desalination: Mechanisms, monitoring, and inhibition strategies // *Desalination*. 2019. V. 468. ID 114069. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.07.005>
- [3] *Reddy M. M., Hoch A. R.* Calcite crystal growth rate inhibition by polycarboxylic acids // *J. Colloid Interface Sci.* 2001. V. 235. N 2. P. 365–370. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7378>
- [4] *Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pécoul N., Perrot H., Lédion J., Cheap-Charpentier H., Horner O.* State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article // *Desalination*. 2015. V. 356. P. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.014>
- [5] *Chauhan K., Kumar R., Kumar M., Sharma P., Chauhan G. S.* Modified pectin-based polymers as green antiscalants for calcium sulfate scale inhibition // *Desalination*. 2012. V. 305. P. 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.042>
- [6] *Jensen M. K., Kelland M. A.* A new class of hyperbranched polymeric scale inhibitor // *J. Pet. Sci. Eng.* 2012. V. 94–95. P. 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.025>
- [7] *Cao K., Huang J., Zhou Y., Liu G., Wang H., Yao Q., Liu Y., Sun W., Wu W.* A multicarboxyl antiscalant for calcium phosphate and calcium carbonate deposits in cooling water systems // *Desalin. Water Treat.* 2014. V. 52. N 3739. P. 7258–7264. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.825882>
- [8] *Nowack B.* Environmental chemistry of phosphonates // *Water Research*. 2003. V. 37. N 11. P. 2533–2546. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00079-4)
- [9] *Chu C. H., Widjaja D.* Neural network system for forecasting method selection // *Decision Support Systems*. 1994. V. 12. N 1. P. 13–24. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)90071-X)

- [10] *Adya M., Collopy F.* How effective are neural networks at forecasting and prediction? A review and evaluation // *J. Forecasting*. 1998. V. 17. N 5–6. P. 481–495 [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-131X\(1998090\)17:5/6<481::AID-FOR709>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-131X(1998090)17:5/6<481::AID-FOR709>3.0.CO;2-Q)
- [11] *Воронов В. Н., Петрова Т. И.* Водно-химические режимы ТЭС и АЭС. М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 227–229.
- [12] *Козловский В. В., Ларин А. Б.* Методика исследования состояния водного режима системы оборотного охлаждения на ТЭС // *Вестн. Иванов. гос. энерг. ун-та*. 2019. № 3. С. 14–21. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.3.014-021>
- [13] *Бакластов А. М., Горбенко В. А., Удыма П. Г.* Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломасообменных установок: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. С. 11–23.
- [14] *Воробьев А. Д., Дормешкин О. Б.* Ингибирование процесса кристаллизации карбоната кальция смесью органических фосфатов и карбоновых кислот // *Изв. НАН Беларуси. Сер. хим. наук*. 2014. № 2. С. 91–97.
- [15] *Turner J. C.* Modelling control of crystal growth processes // *Computers and Mathematics with Applications*. 2004. V. 48. N 7–8. P. 1231–1243.
-