

Моделирование и оптимизация химического потребления кислорода при производстве целлюлозы

Б.М. Шифрин^{1a}, О.В. Федорова^{2b}, С.А. Войнаш^{3c}, Р.Р. Загидуллин^{3d}, С.В. Алексеева^{4e}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

² Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, Россия

³ Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, Республика Татарстан

⁴ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 3-я Красноармейская, 3/6, Санкт-Петербург, Россия

^a shifrinb@mail.ru, ^b odo.gturp@mail.ru, ^c sergey_voi@mail.ru, ^d r.r.zagidullin@mail.ru, ^e pum222@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-5377-741X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-3785-4371>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-5185-2690>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Статья поступила 28.10.2024, принята 11.11.2024

Первая часть статьи посвящена разработке информационной модели процесса производства сульфатной целлюлозы. Главной целью методологии IDEF0 является разработка ясного и понятного описания функциональных потоков и их влияния на результативность системы. Применение IDEF0 позволяет улучшить понимание бизнес-процессов, выявить потенциальные проблемы и узкие места, а также оптимизировать работу системы в целом. Этот инструмент широко используется в области бизнес-анализа, организационного проектирования и управления проектами для создания более эффективных и прозрачных бизнес-моделей. В нашем случае методология IDEF0 (Integrated Definition for Function Modeling) — это мощный инструмент для визуализации и анализа сложных систем, в том числе химико-технологических процессов. Ее применение позволяет получить глубокое понимание функционирования объекта, выявляя взаимосвязи между процессами, оборудованием, персоналом, документами и правилами. В контексте химического производства IDEF0 позволяет детально описать каждую стадию производства, начиная от приема сырья и заканчивая получением конечного продукта. Во второй части статьи предложен подход к разработке модели контроля химического потребления кислорода при производстве целлюлозы на основе нечеткой логики. Химический анализ воды является ключом к экологической безопасности и устойчивому развитию целлюлозно-бумажного производства. Химическое потребление кислорода — это ключевой показатель, отражающий уровень органического загрязнения воды. Он является наиболее информативным и приоритетным, так как характеризует способность микроорганизмов разлагать органические вещества в воде, потребляя при этом кислород. Чем выше его значение, тем больше органических веществ в воде, а, следовательно, выше риск нарушения экологического баланса. Увеличение производства не всегда достигается за счет модернизации технологий, а порой опирается на экстенсивные методы, которые могут негативно влиять на окружающую среду. Важно понимать, что решение задач в области экологической безопасности требует индивидуального подхода. Схемы и модели, применяемые для одного предприятия, могут быть неприменимы к другому из-за различий в технологических процессах, объемах производства и географических особенностей. Использование предлагаемой в данной статье нечеткой логики, позволяющей моделировать характерные для реальных процессов неточные и неопределенные знания, может быть эффективно при решении проблем экологической безопасности в целлюлозно-бумажной промышленности.

Ключевые слова: целлюлоза; сульфатная варка; функциональное моделирование; IDEF-методология; химическое потребление кислорода; нечеткая логика; алгоритм Мамдани.

Modeling and optimization of chemical oxygen consumption for the sulphate pulp production

B.M. Shifrin^{1a}, O.V. Fedorova^{2b}, S.A. Voinash^{3c}, R.R. Zagidullin^{3d}, S.V. Alekseeva^{4e}

¹ St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

² Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

³ Kazan Federal University; 18, bld. 1, Kremlevskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan

⁴ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 3/6, 3rd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

^a shifrinb@mail.ru, ^b odo.gturp@mail.ru, ^c sergey_voi@mail.ru, ^d r.r.zagidullin@mail.ru, ^e pum222@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-5377-741X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-3785-4371>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-5185-2690>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Received 28.10.2024, accepted 11.11.2024

The first part of the article is devoted to the development of an information model of the sulphate pulp production process. The main goal of the IDEF0 methodology is to develop a clear and understandable description of functional flows and their impact on the system performance. The use of IDEF0 allows one to improve your understanding of business processes, identify potential problems and bottlenecks, and optimize the operation of the system as a whole. This tool is widely used in business analysis, organizational design, and project management to create more efficient and transparent business models. Here, the IDEF0 (Integrated Definition for Function Modeling) methodology is a powerful tool for visualizing and analyzing complex systems, including chemical engineering processes. Its application makes it possible to gain a deep understanding of the functioning of the facility, identifying the relationships between processes, equipment, personnel, documents, and rules. In the context of chemical production, IDEF0 allows one to: describe in detail each stage of production, from the receipt of raw materials to the receipt of the final product. The second part of the article proposes an approach to developing a model for controlling chemical oxygen demand in pulp production based on fuzzy logic. Chemical analysis of water is the key to environmental safety and sustainable development of pulp and paper production. Chemical oxygen demand is a key indicator reflecting the level of organic pollution of water. It is the most informative and priority, as it characterizes the ability of microorganisms to decompose organic substances in water, consuming oxygen. The higher its value, the more organic substances in the water, and therefore, the higher the risk of disruption of the ecological balance. Increased production is not always achieved through technology modernization, and sometimes relies on extensive methods that can negatively affect the environment. It is important to understand that solving problems in the field of environmental safety requires an individual approach. Schemes and models used for one enterprise may not be applicable to another due to differences in technological processes, production volumes, and geographical features. The use of fuzzy logic proposed in this article, which allows modeling imprecise and uncertain knowledge typical of real processes, can be an effective solution for solving environmental safety problems in the pulp and paper industry.

Keywords: pulp; sulphate pulping; functional modeling; IDEF; chemical oxygen consumption; fuzzy logic; Mamdani algorithm.

Введение. Целлюлоза, также известная как клетчатка, представляет собой естественный полисахарид, который является основным структурным элементом каждой растительной клетки. Для извлечения целлюлозы из растительных материалов необходимо удалить ее из других частей растительной структуры (в большинстве случаев лигнина) с помощью химической обработки. Полученный в результате делигнификации материал (чаще всего это технологическая щепка из лиственных или хвойных деревьев) называется технической целлюлозой. В промышленности процесс получения технической целлюлозы включает обработку измельченного растительного сырья разнообразными химическими веществами под высоким давлением и температурой (варкой), после чего происходит дополнительная обработка с использованием отбеливающих агентов. Иногда во время отбеливания применяется дополнительная щелочная обработка для улучшения свойств целлюлозы.

Классификация методов делигнификации [7] основана на типе и характеристиках используемых варочных реагентов, а также на порядке обработки растительного сырья. Основные промышленные технологии производства целлюлозы включают сульфитный (кислотный) и сульфатный (щелочной) методы, последний из которых рассматривается в данной статье. Процесс варки сульфитной целлюлозы осуществляется в периодических печах, тогда как для сульфатной, нейтральной сульфитной и бисульфитной целлюлозы применяются установки непрерывного действия. На российских заводах почти все варочные системы являются непрерывными. Разработанный метод включает в себя подготовку сырья, наполнение котла, нагрев, варку, выход продукта.

Этот метод позволяет эффективно контролировать ключевые параметры процесса варки сульфатной целлюлозы, обеспечивая высокое качество конечного продукта и оптимизацию производственных процессов компании «Жамюр».

Перед началом внедрения любых оптимизационных мер на предприятии необходимо провести тщательное функционально-информационное обследование. Цель этого исследования — оценка эффективности бизнес-

процессов и правильности распределения ресурсов между различными функциями. Для детального описания работы компании и даже отдельных технологических процессов важно создать модель, которая адекватно отражает предметную область и включает знания участников бизнес-процессов. Это является одной из ключевых задач данной статьи. В дополнение к этому обсуждается подход к разработке модели контроля за химическим потреблением кислорода в процессе производства целлюлозы, основанный на принципах нечеткой логики. Здесь следует отметить, что процесс варки целлюлозы сложно формализовать с помощью строгих математических методов, поскольку на него влияют многочисленные случайные факторы, приводящие к динамическим изменениям в непрерывном процессе.

Объекты и методы исследования. Для анализа производства сульфатной целлюлозы в статье предлагается использовать основанную на процессном подходе IDEF-методологию, позволяющую с помощью языка проектирования функциональных моделей представить структуру и содержание на уровне взаимодействия материальных объектов и потоков информации [11; 14–16]. Информационная модель процесса производства сульфатной целлюлозы является мощным инструментом для управления производством, обеспечивая комплексный и наглядный обзор всех компонентов производственного процесса. Применение данной методологии для моделирования химико-технологических производств в настоящее время мало распространено [2; 12].

Стандарт моделирования бизнес-процессов IDEF0, основанный на IDEF-методологии, описывает систему как совокупность взаимосвязанных функций. Основной акцент делается на функциональности: каждая функция рассматривается независимо от объектов, с которыми она взаимодействует. Это позволяет более четко и структурированно отобразить логику процессов и их взаимодействие в организации.

Функциональная модель IDEF0 — это диаграммное описание системы, которое включает как текстовые, так и графические элементы в виде блоков. Каждый

блок в модели функционирует как «черный ящик» и имеет следующие элементы:

1. Входы — ресурсы или данные, которые обрабатываются системой.

2. Выходы — результаты работы системы после обработки входов.

3. Управляющие элементы — стратегии, правила или процедуры, которые определяют, как система должна функционировать.

4. Механизмы — ресурсы или инструменты, используемые для выполнения задачи.

Таким образом, под воздействием управляющих элементов система преобразует входные ресурсы в выходные, используя необходимые механизмы.

Упрощенная контекстная диаграмма верхнего уровня представлена на рис. 1.

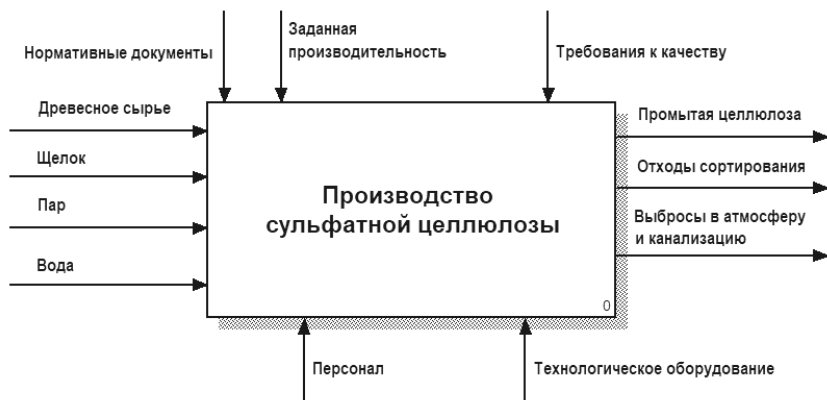


Рис. 1. Процесс производства сульфатной целлюлозы в виде контекстной диаграммы

Входные материальные потоки: щепка технологическая, щелок, пар, вода.

Выходные материальные потоки на выходе: промытая целлюлоза, отходы сортирования, выбросы в атмосферу и канализацию.

Примеры управляющих воздействий: нормативные документы, устанавливающие правила и стандарты работы; заданная производительность, определяющая цели и задачи производственного процесса; требования к качеству продукции, определяющие уровень качества, который должен быть достигнут [17; 18].

Примеры механизмов управления: персонал, составляющий коллектив сотрудников, ответственных за выполнение задач и достижение целей; технологическое оборудование, необходимое для производства продукции или услуг, обеспечивающее выполнение производственных процессов.

Цикл производства сульфатной целлюлозы включает четыре основных этапа [5].

1. Подготовка древесины — осуществляется выбор и заготовка сырья, что включает в себя распиловку стволов, удаление коры и дробление древесных материалов.

2. Варка представляет собой процесс, в ходе которого древесные волокна обрабатываются в специализированных варочных машинах с применением химических реагентов. Здесь происходит разрушение лигнина и других нежелательных компонентов, что позволяет выделить целлюлозу. Качество получаемого продукта зависит от условий варки.

3. Сортирование включает в себя классификацию полученной целлюлозы на основе различных параметров, таких как плотность и степень очистки.

4. Заключительный этап промывки обеспечивает удаление остатков химикатов и примесей из целлюлозы.

Результаты исследования и их обсуждение. Использование химических веществ в процессе перера-

ботки древесины неизбежно приводит к образованию загрязненных сточных вод. Это подчеркивает важность создания систем экологического контроля, которые обеспечивают мониторинг и оценку качества этих вод. Недостаточно очищенные сточные воды могут содержать трудно окисляемые вещества и токсичные соединения, что представляет серьезную угрозу для водной экосистемы. Эти вещества могут приводить к гибели рыб и других организмов, что нарушает биологическое разнообразие и баланс в водоемах.

Кроме того, избыточное содержание азота и фосфора в сточных водах способствует началу цветения водоемов, вызывая массовый рост водорослей. Это приводит к образованию нейротоксинов и гепатоксинов, которые, попадая в организм человека, могут вызывать тяжелые заболевания, включая патологии печени и нарушения в работе центральной нервной системы.

Попадание слабоочищенных сточных вод в почву приводит к накоплению вредных химических соединений, которые негативно влияют на плодородный слой. Эти соединения могут снижать качество почвы, препятствуя нормальному росту растений и изменяя экосистему.

Сложный состав сточных вод целлюлозно-бумажного производства делает их предметом тщательного анализа. Сточные воды содержат множество индивидуальных компонентов, которые варьируются по своей природе и функциональности.

Другим важным показателем является общая минерализация, которая отражает количество минеральных веществ в сточной воде, таких как соли тяжелых металлов, аммиак, нитраты и фосфаты. Этот показатель позволяет оценить степень загрязнения воды минеральными веществами и определить возможность использования сточных вод для различных целей, например для технических нужд или для орошения.

Еще одним важным параметром является содержание взвешенных веществ в сточной воде, которое отражает количество твердых частиц, находящихся в воде. Этот параметр влияет на прозрачность воды, ее цвет и запах, а также может быть причиной засорения водоемов и нарушения водных экосистем.

Все эти параметры важны для определения качества сточных вод и разработки мер по их очистке и использованию. Современные методы оценки качества сточных вод позволяют более эффективно контролировать загрязнение водных объектов и принимать меры для их защиты и восстановления. Одним из ключевых показателей, характеризующих экологическое состояние водных ресурсов и степень их загрязнения органическими веществами, является химическое потребление кислорода (ХПК). Чем выше значение ХПК, тем больше в воде органических загрязнителей и тем серьезнее ее загрязнение [1; 4].

ХПК является ценным показателем для специалистов, так как позволяет оценить уровень загрязненности конкретного источника сточных вод. Знание этого показателя помогает в разработке и внедрении систем очистки, а также в оптимизации существующих методов.

Регулярное измерение ХПК на разных стадиях очистки — на входе, в первичном и вторичном отстойниках, аэротенке — позволяет оценить эффективность каждого этапа и всего процесса очистки сточных вод.

Современные предприятия применяют систему последовательной обработки сточных вод, состоящую из двух основных этапов:

Первичная механическая обработка: на этом этапе из сточных вод удаляются всплывающие и быстроосаждающиеся вещества, такие как песок, жиры и крупные частицы. Этот процесс помогает снизить нагрузку на последующие этапы очистки и улучшить их эффективность.

Вторичная биологическая обработка: здесь осуществляется работа по удалению биологически разлагаемых активных веществ. На этом этапе используются микроорганизмы, которые разлагают органические загрязнители, превращая их в менее вредные соединения.

Очистка сточных вод на сегодняшний день считается основным методом борьбы с загрязнением водоемов. С учетом актуальных экологических проблем активно разрабатываются новые, более эффективные технологии обработки сточных вод. Эти современные методы позволяют значительно улучшить качество очистки и снизить уровень загрязнения.

Тем не менее, даже при использовании самых современных технологий остается около 20 % наиболее устойчивых загрязняющих веществ, которые трудно поддаются разложению. Это подчеркивает необходимость постоянного совершенствования очистных систем и разработки дополнительных методов для более полного удаления загрязнителей, чтобы обеспечить безопасность водных экосистем и защитить окружающую среду.

Очевидно, что увеличение масштабов производства (в нашем случае производительности варки) обычно приводит к большей степени загрязнения.

Для повышения эффективности производства и снижения экологической нагрузки важно не только

модернизировать технологические процессы, но и применять оптимальные управленческие решения [6].

Решение реальных задач, связанных с экологическим мониторингом и управлением выбросами, диктует необходимость применять модели, учитывающие специфику каждого конкретного случая. Стандартные модели часто требуют адаптации к уникальным условиям и особенностям предприятия. В качестве альтернативы можно предложить использование моделей на основе нечеткой логики, позволяющей создавать модели более гибкие и интуитивно понятные человеку по сравнению с традиционными моделями [3; 8; 10; 13; 19; 20].

Нечеткая логика позволяет учитывать нечеткие или неопределенные значения входных параметров и принимать решения на основе лингвистических правил. В случае систем автоматического управления это означает, что нечеткий контроллер может принимать решения на основе нечетких входных сигналов и затем управлять системой таким образом, чтобы достичь заданных целей.

Преимущества использования нечеткой логики для создания таких систем включают возможность работы с нечеткими данными, а также более гибкое и адаптивное поведение контроллера в различных условиях. Это может быть особенно полезно в случаях, когда точные математические модели системы сложны или недоступны.

Таким образом, модели нечеткой логики могут быть успешно применены в проектировании и создании систем автоматического управления с нечетким контроллером, что позволяет улучшить их производительность и эффективность в различных ситуациях. Эти системы представляют собой замкнутые контуры управления с обратной связью, где нечеткий контроллер функционирует как регулятор. Он использует датчики для отслеживания состояния управляемого объекта и генерирует управляющие воздействия в ответ на полученные данные.

Разработка систем автоматического управления (САУ) с использованием нечетких контроллеров опирается на уникальный подход, который позволяет эффективно управлять сложными процессами с неопределенностью. Основой такого подхода является база нечетких продукционных правил, которые создаются на основе экспертных знаний. Эти правила формулируются с использованием лингвистических переменных, отражающих состояние управляемого объекта и его отклонение от желаемого состояния.

Процесс работы нечеткого контроллера начинается с фаззификации — преобразования реальных величин состояния объекта в нечеткие значения. Лингвистические переменные позволяют описать состояние объекта в терминах, таких как «низкий», «средний», «высокий», что делает систему более гибкой в условиях неопределенности. Затем происходит нечеткий вывод, основанный на базе правил вида: «ЕСЛИ состояние объекта X, ТО применить воздействие Y». Эти правила помогают учесть множество факторов, которые могут быть нечетко определены, и на основании экспертных знаний выбрать оптимальное воздействие на объект.

После выполнения нечеткого вывода осуществляется дефаззификация — обратное преобразование нечетких величин в четкие значения, которые и используются для управления процессом. Это позволяет точно ре-

гулировать параметры управления, учитывая динамику и изменчивость системы.

Одним из важных аспектов работы с нечеткими контроллерами является управление по отклонению. В этом случае правила базируются на лингвистических переменных, описывающих разницу между реальным и желаемым состояниями объекта. Такой подход делает систему более точной, так как отклонение от заданных параметров становится основой для расчета корректирующего воздействия.

Ключевым элементом нечеткого контроллера является база правил. Она формируется на основе экспертных знаний и должна учитывать все возможные состояния системы, их отклонения и соответствующие реакции. Важно правильно структурировать и организовать эту базу, чтобы обеспечить корректную работу системы.

Таким образом, применение нечетких контроллеров в САУ позволяет:

Эффективно управлять сложными технологическими процессами с учетом неопределенностей;

Гибко реагировать на отклонения от желаемых параметров;

Использовать экспертные знания в формализованной, но нечеткой форме.

Этот подход делает нечеткие контроллеры мощным инструментом для управления системами с высокой степенью неопределенности и сложности.

Качество системы нечеткого вывода зависит от точности и полноты представленных в ней знаний. Неправильно сформулированные правила могут привести к неэффективному управлению и затруднить процесс достижения желаемого состояния. Поэтому важно не только иметь опытных экспертов, но и применять системный подход к анализу и формализации их знаний, что позволит создать эффективную и надежную систему управления.

Предлагаемая модель позволяет учитывать неопределенность и различные факторы, влияющие на уровень ХПК, такие как погодные условия, сезонность, транспортные потоки и др.

Стратегия управления включает в себя меры по снижению выбросов загрязняющих веществ, контролю и мониторингу качества воздуха, а также информированию населения о возможных последствиях загрязнения и мерах предосторожности.

Использование нечеткой логики позволяет учитывать неопределенность и различные виды нечеткой информации при принятии решений по управлению уровнем ХПК. Такой подход позволяет улучшить эффективность стратегии управления и повысить качество окружающей среды.

Использование упрощенной модели на основе нечеткой логики позволит автоматически регулировать процесс варки в зависимости от уровня ХПК, что поможет предотвратить превышение нормативных значений этого показателя. Кроме того, использование нечеткой логики позволит учесть неопределенность и нечеткость входных данных, что делает систему более гибкой и адаптивной к изменениям в процессе варки.

Такой подход может быть реализован с помощью специализированного программного обеспечения, ко-

торое будет обрабатывать данные от датчиков ХПК и управлять процессом варки в соответствии с заданной стратегией управления. Результатом должно быть оптимизированное управление производственным процессом, которое позволит уменьшить риск превышения нормативных значений ХПК и повысить эффективность производства.

Для работы с нечеткими системами в *Matlab* используется встроенный пакет *Fuzzy Logic Designer*, который предоставляет удобные инструменты для создания и настройки нечетких систем. Основные компоненты этого пакета включают:

Редактор нечетких переменных (*Fuzzy Inference System Editor*) — интерфейс для создания и редактирования системы нечеткого вывода. Позволяет задавать тип системы (например, Мамдани или Сугэно) и основные параметры.

Редактор переменных ввода-вывода (*Membership Function Editor*) — интерфейс для задания функций принадлежности для входных и выходных переменных. Это могут быть треугольные, гауссовы и другие формы функций принадлежности, которые описывают диапазон значений переменной.

Редактор правил (*Rule Editor*) — интерфейс для создания набора правил нечеткого вывода. Эти правила имеют вид «Если... , то...» и определяют логику принятия решений на основе входных данных.

Окно отображения поверхности (*Surface Viewer*) — графическое средство для визуализации выходных данных системы нечеткого вывода в виде трехмерной поверхности, которая показывает, как входные переменные влияют на выходные.

Окно анализа правил (*Rule Viewer*) — инструмент для визуализации процесса принятия решения. Позволяет пошагово отслеживать влияние различных правил на вывод системы в зависимости от входных данных.

Эти инструменты позволяют настроить нечеткую систему для управления технологическим процессом (в нашем случае, для контроля производительности варки и уровня ХПК), провести симуляции и оптимизировать параметры [9].

Модель с заданными входными лингвистическими переменными представлена на рис. 2.

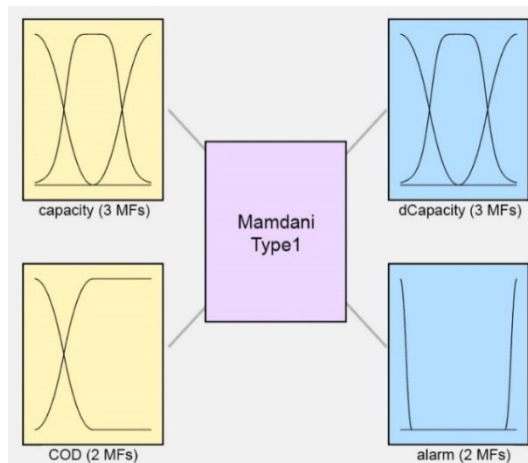


Рис. 2. Упрощенная модель контроля ХПК

Пакет *Fuzzy Logic Designer* обеспечивает возможность легкого построения нечетких моделей как типа Мамдани, так и типа Сугэно. При этом пользователю предоставляются интуитивно понятные инструменты для определения правил базы знаний и задания значений выходной переменной (рис. 3).

Модели типа Мамдани часто применяются в системах управления, где важна прозрачность и легкость интерпретации правил. С другой стороны, модели типа

Сугэно могут быть более эффективными в некоторых приложениях благодаря использованию линейных функций для задания значений выходной переменной.

Пакет *Fuzzy Logic Designer* обладает гибкими настройками, что позволяет пользователям выбирать подходящий тип модели в зависимости от конкретных требований и характеристик задачи. Используемая база правил приведена на рис. 4.

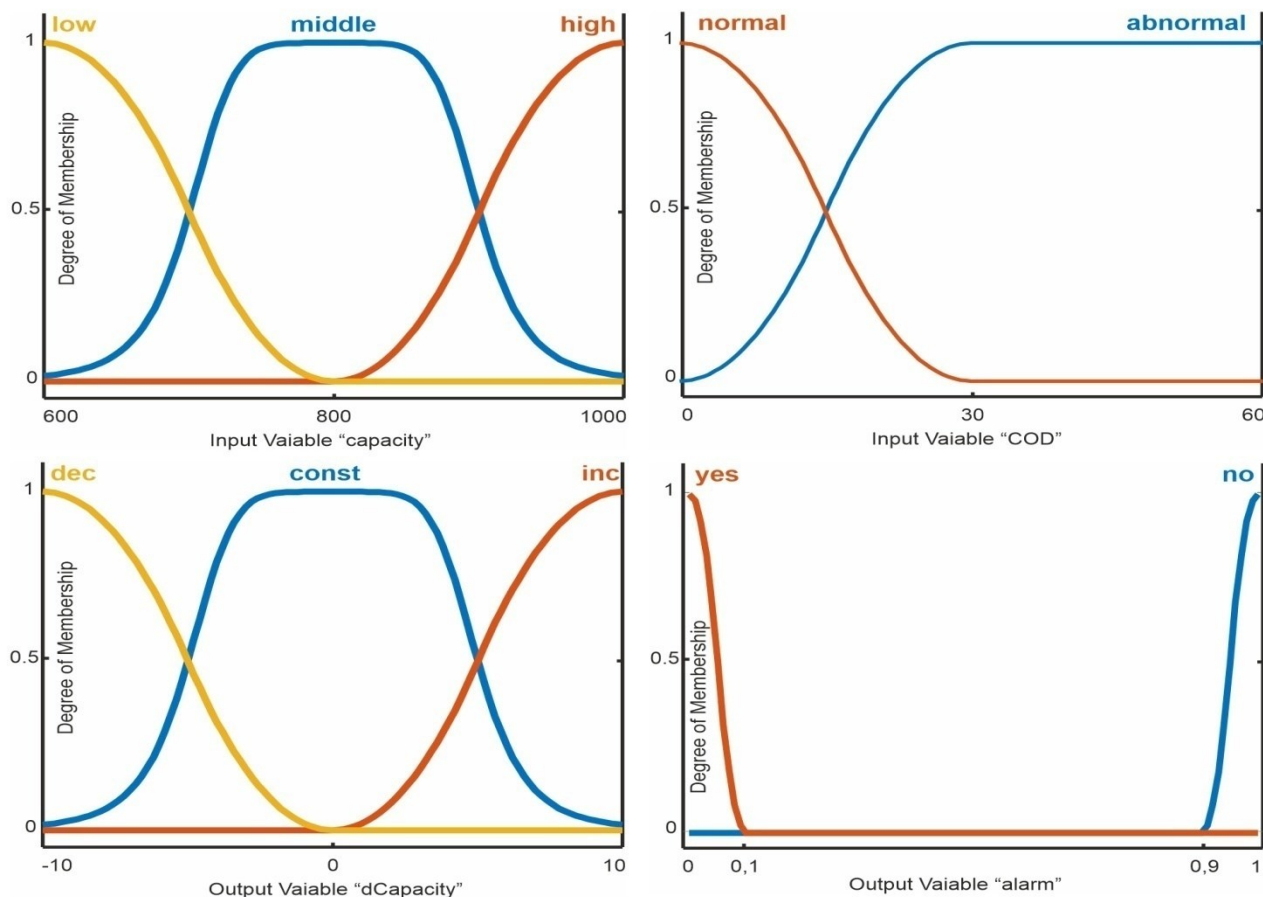


Рис. 3. Функции принадлежности входных и выходных лингвистических переменных

1	If capacity is low and COD is abnormal then dCapacity is const, alarm is yes
2	If capacity is middle and COD is abnormal then dCapacity is dec, alarm is no
3	If capacity is high and COD is abnormal then dCapacity is dec, alarm is no
4	If capacity is low and COD is normal then dCapacity is inc, alarm is no
5	If capacity is middle and COD is normal then dCapacity is inc, alarm is no
6	If capacity is high and COD is normal then dCapacity is const, alarm is no

Рис. 4. База правил

Однако при высокой производительности и высоком уровне ХПК необходимо снижать объемы производства, чтобы избежать перегрузки системы. График также показывает оптимальные значения, при которых система будет работать эффективно и без перегрузок (рис. 5).

Построенная модель нуждается в валидации, т. е. оценке того, насколько построенная компьютерная модель соответствует реальности. Для тестирования

зададим значения входных переменных в программе логического вывода *Rule Inference* (рис. 6). На рисунке видно, что при текущей производительности 650 т/сутки и химическом потреблении кислорода 10 кг/т следует продолжать процесс, наращивая производительность. Полученные на модели результаты соответствуют практике.

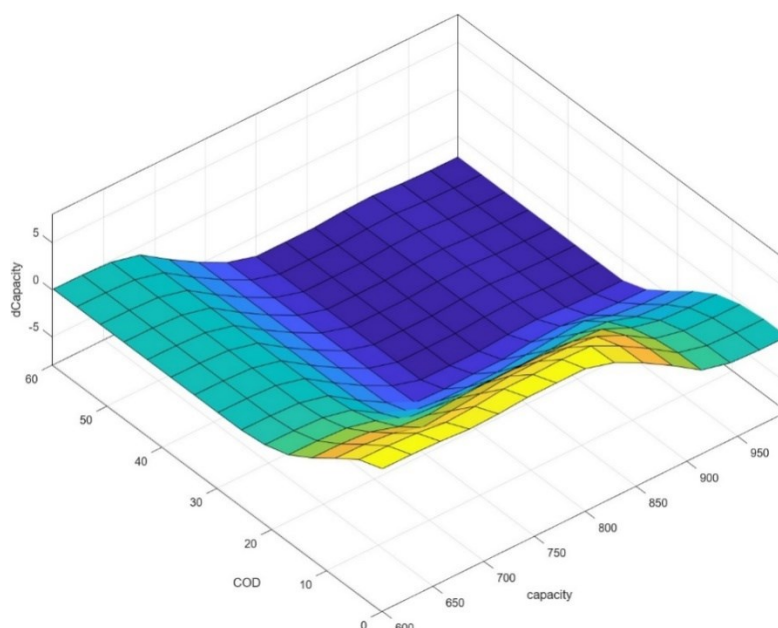


Рис. 5. Зависимость выходной переменной «dCapacity» от входных переменных «COD» и «capacity»

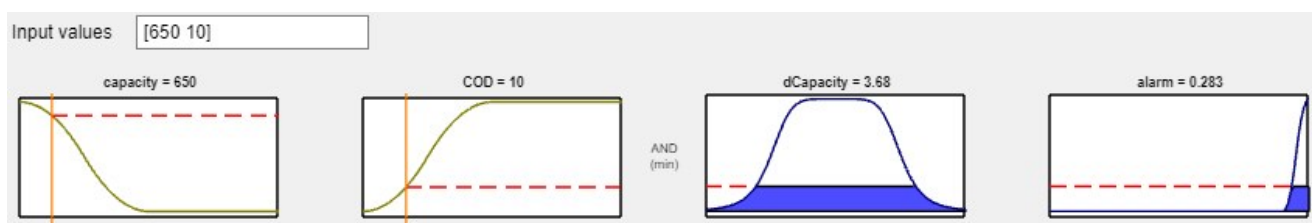


Рис. 6. Валидация построенной модели

Заключение. Предлагаемый алгоритм использует нечеткие множества для отражения неопределенности и нечеткости входных данных и правил управления. Это позволяет более гибко управлять системой, учитывая различные условия и контексты.

При настройке алгоритма управления на основе нечеткой логики операторы и разработчики могут вносить свой опыт и знания о системе, причем это делается в виде лингвистических правил, которые определяют взаимосвязи между входными данными и выходными действиями. Таким образом, алгоритм управления становится более адаптивным к изменяющимся условиям и требованиям.

В целом алгоритм управления на основе нечеткой логики представляет собой эффективный инструмент

для управления сложными системами, где не всегда возможно точно определить взаимосвязи между входными данными и выходными действиями. Он позволяет учитывать различные аспекты и особенности системы, обеспечивая более точное и гибкое управление.

Системы, основанные на нечеткой логике, способны учитывать разнообразные исходные данные, что позволяет адаптироваться к изменениям в условиях работы. Они объединяют информацию, полученную из разных источников, что обеспечивает более полное и точное представление о состоянии системы. Таким образом, использование нечеткой логики способствует не только повышению эффективности управления, но и формированию более устойчивых и гибких решений в ответ на изменяющиеся условия.

Литература

1. Александров А.В., Гаузе А.А., Гончаров В.Н. Оборудование ЦБП. Часть I. Основное оборудование для производства целлюлозы. СПб., 2014. 90 с.
2. Барболина Л.В. Разработка информационной модели вочно-промывного цеха при производстве сульфатной целлюлозы // Науч. достижения и открытия 2021: сб. ст. XVIII Междунар. науч.-исследовательского конкурса (20 февр. 2021 г.). Пенза, 2021. С. 76-80.
3. Горобченко С.Л., Шифрин Б.М., Алексеева С.В., Гоголевский А.С., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л., Войнаш С.А. Современное состояние применения и развития методов искусственного интеллекта в промышленных регуляторах и интеллектуальных системах управления // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2023. № 3. С. 106-112.
4. Иванов Ю.С. Производство сульфатной целлюлозы. Часть 1. СПб., 2010. 76 с.
5. Кряжев А.М., Голуб О.В., Санжаровский А.Ю. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона // Энциклопедия технологий 2.0: Производство неметаллов: сб. ст. М.; СПб.: НИИ «Центр экологической промышленной политики», 2022. С. 319-463.
6. Поляков В.В. Оптимизация управления целлюлозно-бумажным производством // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2006. № 3. С. 134-140.
7. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы: в 3-х т. Производство сульфатной целлюлозы. 2-е изд., перераб. М.: Лесная пром-сть, 1990. Т. II. 600 с.

8. Турбал Е.Ю., Шифрин Б.М., Попова Д.А. Подход к разработке модели сушки пиломатериалов на основе нечеткой логики // *Международ. науч.-исследовательский журнал*. 2022. № 7-1 (121). С. 111-114.
9. Шифрин Б.М., Елисеев И.В. Использование нечетких регуляторов в мехатронике // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2021. № 11. С. 22-25.
10. Шифрин Б.М. Оптимизация процесса шлифования на базе нечеткой логики // *Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: материалы I Международ. науч.-практической конф. (25 янв. 2018 г.)*. СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. С. 8-15.
11. Шифрин Б.М., Попова Д.А. Использование IDEF-моделей для анализа процессов контроля качества // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2023. № 11. С. 165-168.
12. Шифрин Б.М. Разработка информационной модели производства сульфатной целлюлозы // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024. № 40. P. 71-74.
13. Шифрин Б.М. Разработка модели процесса контроля качества поверхности древесностружечных плит на основе нечеткой логики // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2017. № 5. С. 39-43.
14. Arazy O., Woo C.C. Analysis and design of agent-oriented information systems // *The Knowledge Engineering Review*. 2002. Vol. 17, № 3. P. 215-260.
15. Khair H.S., Awad M.M., Othman Z.A. Formalizing the Software Engineering Process Using a Graphical Software Process Modelling Formalism // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2017. Vol. 9, № 6. P. 18-26.
16. Munive-Hernandez E.J., Dewhurst F.W., Pritchard M.C., Barber K.D. Modelling the strategy management process. An initial BPM approach // *Business Process Management Journal*. 2004. Vol. 10, № 6. P. 691-711.
17. Weaver P.M., Gabel H.L., Bloemhof-Ruwaard Ja.M., Wasenhove L.N.V. Optimizing Environmental Product Life Cycles // *Environmental and Resource Economics*. 1997. Vol. 9, № 2. P. 199-224.
18. Mandeep G.K. Gupta P. Shukla H. Liu Pulp and paper industry - based pollutants, their health hazards and environmental risks // *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 2019. Vol. 12. P. 48-56.
19. Simon D. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications // *Control Engineering Practice*. 1996. Vol. 4, № 9. P. 1332-1333.
20. Zhao T., Cao H., Dian S. A Self-Organized Method for a Hierarchical Fuzzy Logic System Based on a Fuzzy Autoencoder // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2022. Vol. 30, № 12. P. 5104-5115.
- systems // *News of the Tula State University (Izvestija Tula State University)*. Technical sciences. 2023. № 3. P. 106-112.
4. Ivanov Yu.S. Production of sulphate pulp. Part 1. SPb., 2010. 76 p.
5. Kryazhev A.M., Golub O.V., Sanzharovskij A.Yu. Production of cellulose, wood pulp, paper, cardboard // *Enciklopediya tekhnologii 2.0: Proizvodstvo nemetallov: sb. st. M.; SPb.: NII «Centr ekologicheskoy promyshlennoj politiki», 2022. P. 319-463.*
6. Polyakov V.V. Optimization of pulp and paper production management // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2006. № 3. P. 134-140.
7. Nepenin Yu.N. Cellulose technology. In 3 volumes. Production of sulfate cellulose. 2-e izd., pererab. M.: Lesnaya promst', 1990. V. II. 600 p.
8. Turbal E.Yu., Shifrin B.M., Popova D.A. An approach to developing a model for drying lumber based on fuzzy logic // *Research Journal of International Studies*. 2022. № 7-1 (121). P. 111-114.
9. Shifrin B.M., Eliseev I.V. The use of fuzzy controllers in mechatronics // *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2021. № 11. P. 22-25.
10. Shifrin B.M. Optimization of the grinding process based on fuzzy logic // *Mashiny, agregaty i processy. Proektirovanie, sozhdanie i modernizaciya: materialy I Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (25 yanv. 2018 g.)*. SPb.: SPbF NIC MS, 2018. P. 8-15.
11. Shifrin B.M., Popova D.A. Using IDEF models to analyze quality control processes // *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2023. № 11. P. 165-168.
12. Shifrin B.M. Development of an information model for the production of sulfate cellulose // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024. № 40. P. 71-74.
13. Shifrin B.M. Development of a model for the process of quality control of the surface of particle boards based on fuzzy logic // *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2017. № 5. P. 39-43.
14. Arazy O., Woo C.C. Analysis and design of agent-oriented information systems // *The Knowledge Engineering Review*. 2002. Vol. 17, № 3. P. 215-260.
15. Khair H.S., Awad M.M., Othman Z.A. Formalizing the Software Engineering Process Using a Graphical Software Process Modelling Formalism // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2017. Vol. 9, № 6. P. 18-26.
16. Munive-Hernandez E.J., Dewhurst F.W., Pritchard M.C., Barber K.D. Modelling the strategy management process. An initial BPM approach // *Business Process Management Journal*. 2004. Vol. 10, № 6. P. 691-711.
17. Weaver P.M., Gabel H.L., Bloemhof-Ruwaard Ja.M., Wasenhove L.N.V. Optimizing Environmental Product Life Cycles // *Environmental and Resource Economics*. 1997. Vol. 9, № 2. P. 199-224.
18. Mandeep G.K. Gupta P. Shukla H. Liu Pulp and paper industry - based pollutants, their health hazards and environmental risks // *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 2019. Vol. 12. P. 48-56.
19. Simon D. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications // *Control Engineering Practice*. 1996. Vol. 4, № 9. P. 1332-1333.
20. Zhao T., Cao H., Dian S. A Self-Organized Method for a Hierarchical Fuzzy Logic System Based on a Fuzzy Autoencoder // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2022. Vol. 30, № 12. P. 5104-5115.

References

1. Aleksandrov A.V., Gauze A.A., Goncharov V.N. Pulp and paper equipment. Part I. Main equipment for pulp production. SPb., 2014. 90 p.
2. Barbolina L.V. Development of an information model of the cooking and washing shop for the production of sulphate pulp // *Nauch. dostizheniya i otkrytiya 2021: sb. st. XVIII Mezhdunar. nauch.-issledovatel'skogo konkursa (20 fevr. 2021 g.)*. Penza, 2021. P. 76-80.
3. Gorobchenko S.L., Shifrin B.M., Alekseeva S.V., Gogolevskij A.S., Krivonogova A.S., Pushkov Yu.L., Vojnash S.A. Current state of application and development of artificial intelligence methods in industrial regulators and intelligent control