

УДК 504/519

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТИ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ФИЛЬТРОВ БАЛЛАСТНЫХ ВОД

Цыгута Анна Николаевна¹, старший преподаватель
e-mail: anna.tsyguta@mail.ru

¹ Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина Астраханский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, Астрахань, Россия

Аннотация. Статья посвящена обоснованию применения методов теории нечетких множеств для решения задачи многокритериального выбора компонентов фильтров балластных вод. Показано, что традиционные подходы обладают ограничениями при работе с разнородными критериями, лингвистическими оценками и неопределенностью, характерными для экологических задач. На основе анализа работ обосновано, что теория нечетких множеств является адекватным инструментом для формализации экспертных знаний и агрегирования параметров разной природы. Проведено сравнение алгоритмов Мамдани и Сугено, показавшее преимущества последнего по диапазону выходных значений и вычислительной эффективности при равной точности ранжирования. Предложена архитектура нечеткой продукционной системы на основе алгоритма Сугено для формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтров балластных вод.

Ключевые слова: нечеткая логика, многокритериальное принятие решений, нечеткая продукционная система, теория нечетких множеств, водоочистка.

SUBSTANTIATION OF THE USE OF FUZZY SET THEORY METHODS TO ANALYZE THE PREFERENCE OF CHOOSING COMPONENTS OF BALLAST WATER FILTERS

Anna N. Tsyguta¹, Senior Lecturer
e-mail: anna.tsyguta@mail.ru

¹ The Caspian Institute of Marine and River Transport named after Admiral F.M. Apraksin – Astrakhan branch of the Volga State University of Water Transport, Astrakhan, Russia

Abstract. The article is devoted to the substantiation of the application of methods of fuzzy set theory to solve the problem of multi-criteria selection of components of ballast water filters. It is shown that traditional approaches have limitations when dealing with heterogeneous criteria, linguistic assessments, and uncertainty typical of environmental tasks. Based on the analysis of the works, it is proved that the theory of fuzzy sets is an adequate tool for formalizing expert knowledge and aggregating parameters of different nature. A comparison of the Mamdani and Sugeno algorithms was carried out, which showed the advantages of the latter in terms of the range of output values and

computational efficiency with equal ranking accuracy. The architecture of a fuzzy production system based on the Sugeno algorithm is proposed for forming a comprehensive assessment of the preference for choosing components of ballast water filters.

Keywords: fuzzy logic, multi-criteria decision-making, fuzzy production system, fuzzy set theory, water treatment.

Выбор оптимальных технологий и компонентов в области водоподготовки представляет собой сложную многокритериальную задачу. Как отмечают исследователи Т. Sharma и соавторы [1] в своем систематическом обзоре: «технологии очистки воды представляют собой сложные системы, а конфликтующие критерии, доступность, применимость и показатели устойчивого развития вместе создают комплексную многокритериальную задачу анализа, которая напрямую влияет на эффективность технологии».

Применительно к задачам очистки балластных вод эта проблема стоит особенно остро. С одной стороны, существуют жесткие нормативы Международной морской организации и Конвенция по контролю судовых балластных вод, требующие высокой эффективности очистки. С другой стороны, на практике необходимо учитывать экономическую целесообразность и безопасность эксплуатации фильтрующих систем. Традиционные подходы к выбору оборудования, основанные на детерминированных оценках, часто оказываются недостаточными, поскольку не могут адекватно учесть все разнообразие факторов и их взаимное влияние.

В научной литературе неоднократно отмечались фундаментальные ограничения классических методов многокритериального принятия решений (MCDM) применительно к задачам водоподготовки.

Н. Gharibi и соавторы в работе [2], посвященной разработке индекса качества воды на основе нечеткой логики, выделяют две основные проблемы традиционных подходов (таких как индекс NSF WQI (National Sanitation Foundation Water Quality Index – это индекс качества воды, разработанный Национальным санитарным фондом США (National Sanitation Foundation). Он используется для оценки общего состояния водных объектов (рек, озер, водохранилищ) на основе физических, химических и биологических параметров) и канадский индекс CWQI (Canadian Water Quality Index – это инструмент для оценки качества воды, разработанный Канадским советом министров окружающей среды. Он позволяет упростить сложные данные о качестве воды, объединяя несколько параметров в одно значение, которое отражает общее состояние водоема):

1. Проблема граничных значений. «Значения, находящиеся на разном расстоянии от предельного уровня, оказывают одинаковое влияние на итоговую оценку». Это приводит к потере важной информации о степени отклонения параметра от нормы.

2. Неспособность работать с неопределенностью. «Традиционные индексы не способны справляться с неопределенностью и субъективностью экологических задач».

Аналогичные выводы представлены в обзорной работе G. Vijayaraghavan и M. Jayalakshmi [3], где авторы показывают, что «классические методы демонстрируют значительные трудности при автоматическом управлении процессами водоочистки из-за сложности, нелинейности и плохой формализуемости этих систем».

A.R. Karimi и соавторы [4] добавляют к этому важный аргумент, касающийся специфики экспертных оценок: «традиционный АНР (традиционный метод аналитического иерархического процесса АНР – Analytic Hierarchy Process) требует точных суждений, однако в реальных задачах лицо, принимающее решение, с трудом предоставляет такие оценки. Более того, даже используя одни и те же слова, разные эксперты вкладывают в них разный смысл». Это принципиально важное замечание, поскольку в нашей задаче [5]

оценки безопасности и эффективности компонентов фильтра в значительной степени основываются на экспертных суждениях.

В российской научной литературе также отмечается актуальность разработки методов комплексной оценки эффективности систем водоотведения. Пупырев Е.И. [6] в своем обзоре, констатирует: «практически нет исследований, посвященных моделированию и оценке эффективности работы системы водоотведения в целом», и называет это направление «наиболее актуальным в ближайшем будущем». При этом автор обзора обращает внимание на работы, в которых для оценки эффективности очистных сооружений применяется аппарат нечеткой логики. Данное наблюдение подтверждает своевременность и обоснованность подхода, направленного на создание метода комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтров балластных вод на основе нечеткой продукционной системы [5].

В качестве альтернативы традиционным методам все большее распространение в задачах водоподготовки получают подходы, основанные на теории нечетких множеств. Авторы работы [2] дают развернутое обоснование этого выбора:

- отражение человеческого мышления, «нечеткая логика способна отражать человеческое мышление и экспертные знания, позволяя работать с нелинейной, неопределенной, неоднозначной и субъективной информацией»;
- работа с разнородными параметрами, «она позволяет включать в оценку параметры разной природы и значимости, включая как качественные, так и количественные переменные»;
- интерпретируемость результатов, «это надежный метод для представления результатов оценки в лингвистической форме, понятной для менеджеров, лиц, принимающих решения, и неспециалистов».

Кроме того, авторы ссылаются на принцип несовместимости Лотфи А. Заде, согласно которому «даже эксперт не может точно предсказать качество воды, используя только свой разум, из-за сложности экологических условий». Именно эта сложность делает необходимым применение формальных методов, способных работать с неполной и неточной информацией.

В работе [4] подчеркивается, что «нечеткие подходы позволяют более точно описать процесс принятия решений, поскольку предпочтения в АНР по своей природе являются человеческими суждениями, основанными на человеческом восприятии». В их работе проведено экспериментальное сравнение четкого и нечеткого АНР на задаче выбора аэробной технологии очистки сточных вод. Ключевой вывод: «нечеткий АНР предпочтительнее в ситуациях, когда веса критериев и оценки альтернатив являются размытыми и неточными».

Наиболее полным и актуальным обзором в данной области является работа [1]. Авторы проанализировали 119 публикаций за период 2015-2023 года и предложили классификацию MCDM методов применительно к задачам водоподготовки, выделив три основные категории:

1. Single MCDM (АНР, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE, PROMETHEE);
2. Fuzzy MCDM (методы, использующие аппарат нечетких множеств);
3. Hybrid MCDM (комбинации различных подходов, например, fuzzy АНР, fuzzy TOPSIS).

Ключевой вывод обзора: «fuzzy MCDM и гибридные подходы набирают популярность благодаря их способности работать с неопределенностью, присущей критериям в сложных системах, таких как задачи устойчивого развития» [1]. При этом отмечается, что «АНР является наиболее распространенным методом», однако «нечеткие множества являются адекватным инструментом для преодоления нечеткости» экспертных оценок.

М. Mahjouri и соавторы [7] в исследовании по выбору технологии очистки сточных вод для металлургической промышленности показали, что «гибридная модель с нечеткой логикой дает лучшие результаты и обеспечивает более высокую степень достоверности при сложных экспертных оценках». Авторы вводят нечеткие понятия как на этапе взвешивания критериев, так и на этапе ранжирования альтернатив, что позволяет более адекватно отражать неопределенность.

М. I. Kamami [8] в своей диссертационной работе разработал метод поддержки принятия решений на основе нечеткой логики для оценки технологий очистки сточных вод по экологическим и экономическим показателям, получив интерпретируемые лингвистические оценки.

Важным методологическим вопросом является выбор конкретного алгоритма нечеткого вывода. Как показано в работе [5], проведено экспериментальное сравнение алгоритмов Мамдани и Сугено применительно к задаче оценки компонентов фильтров балластных вод.

Результаты показали, что:

- Оба алгоритма обеспечивают высокую корреляцию результатов ($\approx 0,99$);
- Алгоритм Сугено обеспечивает более широкий диапазон выходных значений (0–100 против 8–92 у Мамдани), что дает лучшую различительную способность;
- Алгоритм Сугено различает больше ситуаций (198–229 против 137–194 у Мамдани);
- Алгоритм Сугено требует меньших вычислительных затрат, так как использует взвешенную сумму вместо дефаззификации через центр тяжести.

Полученные результаты согласуются с выводами обзора [1], в котором отмечается, что выбор конкретного метода MCDM должен определяться структурой задачи и характером доступных данных.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать следующие выводы:

1. Задача выбора компонентов фильтров балластных вод является сложной многокритериальной задачей, характеризующейся разнородностью критериев (эффективность, стоимость, безопасность) [9], наличием экспертных оценок и неопределенностью исходных данных.

2. Традиционные методы имеют фундаментальные ограничения: они требуют точных числовых значений и не способны адекватно работать с лингвистической неопределенностью.

3. Теория нечетких множеств предлагает естественный способ формализации экспертных знаний и работы с неопределенностью, что подтверждено многочисленными работами.

4. Алгоритм Сугено показал преимущества перед алгоритмом Мамдани по диапазону выходных значений и вычислительной эффективности при равной точности.

На рис. 1 представлена архитектура предлагаемой нечеткой продукционной системы на основе алгоритма Сугено, реализующая описанный выше подход. Система включает этапы фаззификации входных переменных (эффективность удаления загрязнителя $x_{эу}$, стоимость фильтра $x_{ц}$, безопасность эксплуатации $x_{б}$), формирование базы правил, агрегирование, активацию, аккумуляцию и дефаззификацию, результатом которой является итоговая комплексная оценка $M_{\text{фильт}}$ в диапазоне от 0 до 100 единиц.

АРХИТЕКТУРА НЕЧЕТКОЙ ПРОДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (СУГЕНО)

для оценки предпочтительности компонентов фильтра балластных вод

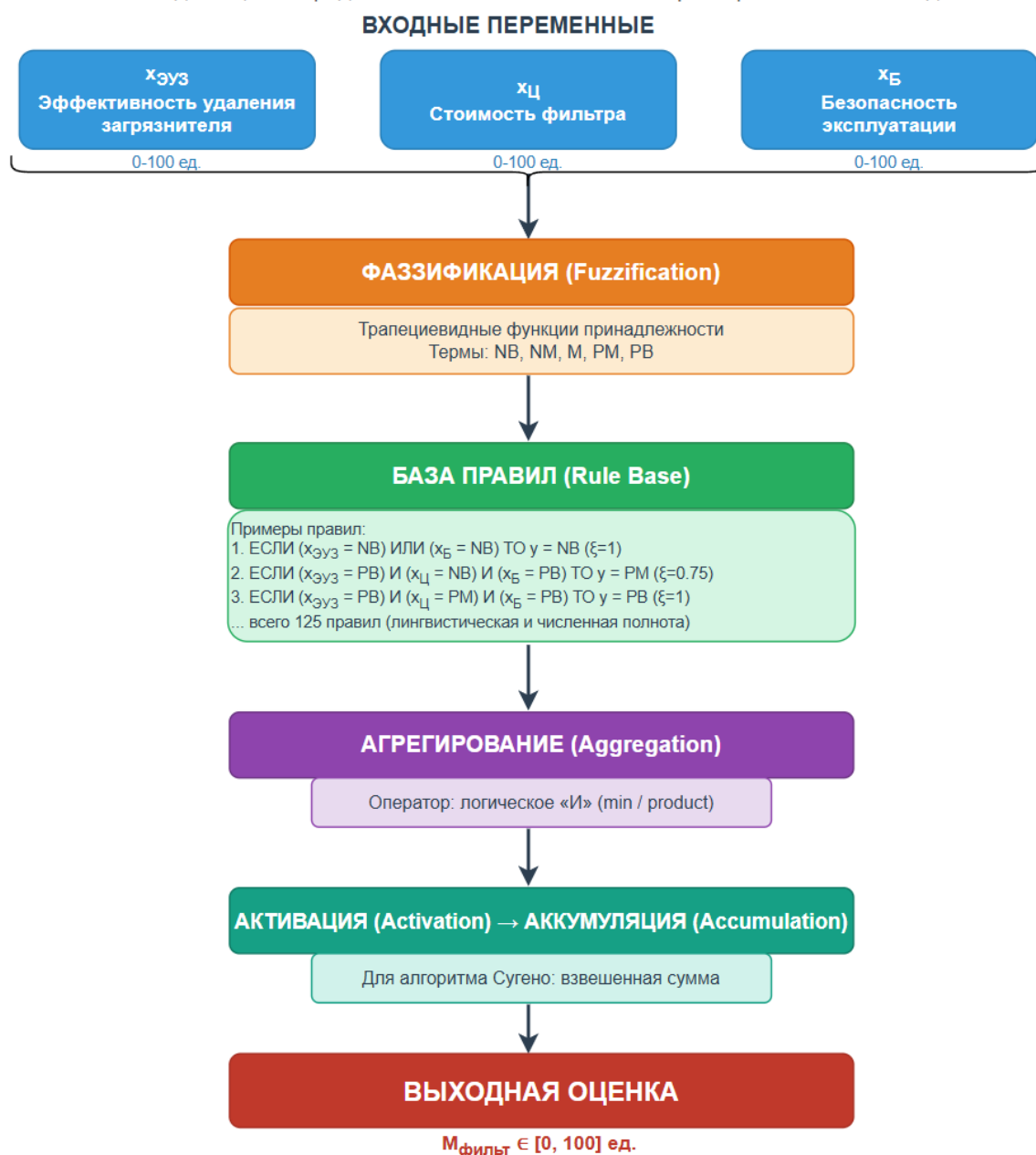


Рисунок 1 – Архитектура нечеткой продукционной системы на основе алгоритма Сугено

Таким образом, применение методов теории нечетких множеств (в частности, нечеткой продукционной системы на основе алгоритма Сугено) для формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтров балластных вод является теоретически обоснованным и соответствует современным трендам в области многокритериального принятия решений применительно к задачам водоподготовки.

Список литературы:

1. T. Sharma, A. Kumar, S. Pant, K. Kotecha, "Wastewater Treatment and Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Review," IEEE Access, vol. 11, pp. 143704-143720, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3343150.

2. H. Gharibi, A.H. Mahvi, R. Nabizadeh, H. Arabalibeik, M. Yunesian, M.H. Sowlat, "A novel approach in water quality assessment based on fuzzy logic," *Journal of Environmental Management*, vol. 112, pp. 87-95, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.007.
3. G. Vijayaraghavan, M. Jayalakshmi, "A Quick Review on Applications of Fuzzy Logic in Waste Water Treatment," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 3, issue V, pp. 421-425, 2015.
4. A.R. Karimi, N. Mehrdadi, S.J. Hashemian, G.R. Nabi Bidhendi, R. Tavakkoli Moghaddam, "Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 267-280, 2011.
5. Головацкая Л.И. Реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода / Л. И. Головацкая, А. А. Сорокин, А. Н. Цыгута [и др.] // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2024. – № 4-2(66). – С. 147-158. – DOI 10.37220/MIT.2024.66A.071. – EDN MXRRDG.
6. Пупырев Е.И., Сбор и очистка хозяйственно-бытовых сточных вод: критический обзор достигнутых результатов, *Вестник МГСУ*, т. 14, вып. 11, с. 1365-1407, 2019. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1365-1407
7. M. Mahjouri, M.B. Ishak, A. Torabian, L.A. Manaf, N. Halimoon, J. Ghoddusi, "Optimal selection of Iron and Steel wastewater treatment technology using integrated multi-criteria decision-making techniques and fuzzy logic," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 107, pp. 54-68, 2017.
8. M.I. Kamami, "Fuzzy Based Decision Support Method for Selection of Sustainable Wastewater Treatment Technologies," Master's thesis, 2014. URI: <http://hdl.handle.net/123456789/1427>.
9. Цыгута, А. Н. Основные требования к подбору компонентов фильтров в системе очистки балластных вод / А. Н. Цыгута, Л. И. Головацкая // *Транспорт. Горизонты развития : Труды 5-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток, 20–23 мая 2025 года*. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2025. – С. 137. – EDN САКАЕР.

