

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ПРОЦЕССА БАКТЕРИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

¹Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Республика Узбекистан

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Работа посвящена моделированию системы управления температурным режимом процесса бактериального окисления труднообогатимых золотосодержащих сульфидных руд. Моделирование выполнялось с использованием редактора *Fuzzy Logic Toolbox* в программном пакете *MATLAB*. Было выполнено обоснование набора входных и выходных переменных, вида функций принадлежности, сформирована база правил для машины вывода. Описаны основные этапы моделирования и проанализированы результаты. Обосновано использование функций принадлежности трапецеидального вида.

Ключевые слова: система управления, нечеткий регулятор, нечеткое управление, биореактор, функции принадлежности, лингвистическая переменная, дефаззификация, фаззификация

Введение

Процесс бактериального окисления труднообогатимых золотосодержащих сульфидных руд, который успешно применяется в промышленности Узбекистана, характеризуется наличием неопределенности и нечеткости характеристик. А это приводит к снижению эффективности использования традиционных систем управления. В связи с чем актуальным становится разработка интеллектуальных систем управления на базе нечеткой логики.

Моделирование управления температурным режимом процесса бактериального окисления труднообогатимых золотосодержащих сульфидных руд велось с использованием редактора *Fuzzy Logic Toolbox* в программном пакете *MATLAB*. В качестве входных переменных были взяты рН пульпы и температура в биореакторе. В качестве выходной переменной было выбрано положение регулирующего клапана, установленного на подводимом трубопроводе воды для охлаждения системы биореактора.

Определение параметров для моделирования

Согласно [1] процесс бактериального окисления труднообогатимых золотосодержащих сульфидных руд является экзотермическим процессом. Для поддержания температуры в пределах рабочего диапазона, биореакторы нуждаются в постоянном охлаждении.

Бактериальный микроорганизм, используемый в процессе, представляет собой адаптированный смешанный микроорганизм мезофильных бактерий, для которых диапазон рабочих температур определяется значениями 30–45 °С. Процесс бактериального окисления обычно осуществляется при температуре 40–43 °С, но опытно-

промышленные эксперименты и опыт использования на предприятии показали, что температура до 45 °С не является катастрофической для эффективного функционирования бактерий. Снижение температуры пульпы осуществляется за счет охлаждающей воды, проходящей через внутренние змеевики.

Еще одним важным параметром процесса бактериального окисления является рН пульпы. Оптимальное значение рН для процесса составляет 1,1–1,5, хотя работоспособным считается и рН со значениями 1,2–1,8. Исследование влияния снижения рН на работу процесса бактериального окисления проводилось с помощью экспериментального реактора на руднике Кокпатас. Результаты показали, что окисление сульфидов уменьшилось, когда рН пульпы был снижен до значения менее 1,0. При этом превышение рН значения 2,0 резко повышает риск гибели бактериального микроорганизма. Для обеспечения эффективного протекания всех химических реакций бактериального окисления необходимо осуществлять стабильную регулировку температуры [2, 3].

Таким образом, параметры, определяющие эффективность протекания процесса бактериального окисления, характеризуются сложно формализуемыми зависимостями и логическими условиями. Поэтому для моделирования процесса предлагается использовать подход, основанный на нечеткой логике.

Моделирование управления температурным режимом процесса бактериального окисления

Разработка модели управления на основе нечеткой логики велась с использованием редактора *Fuzzy Logic Toolbox* в программном пакете *MATLAB*. В качестве входных переменных были взяты рН пульпы и температура в биореакторе, заданные лингвистическими переменными «рН»

и «Температура» соответственно. В качестве выходной переменной было выбрано положение регулирующего клапана, установленного на подводимом трубопроводе охлаждающей воды для охлаждения системы биореактора. Для описания этой переменной использовалась лингвистическая переменная «Сост регул клап». При охлаждении модуля холодной водой расход холодной воды рассматривался как регулируемый параметр [4].

Входные и выходная переменные были введены в систему нечеткого вывода с помощью редактора системы нечеткого вывода FIS (рисунок 1), для нечеткого вывода использовался алгоритм Мамдани.

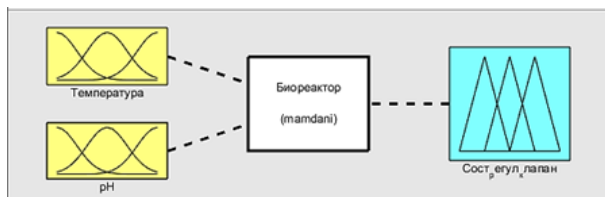


Рисунок 1. Входные и выходные переменные

Лингвистическую переменную «Температура», соответствующую входу нечеткого регулятора T, предложено описывать терминами ОХ – «очень холодно», Х – «холодно», Нормал – «нормальный», Т – «тёплый», ОТ – «очень тёплый», причем мода нечеткого множества, определяющего понятие «нормальный» соответствует оптимальной температуре окисления – в рассматриваемом примере 42 °С [5].

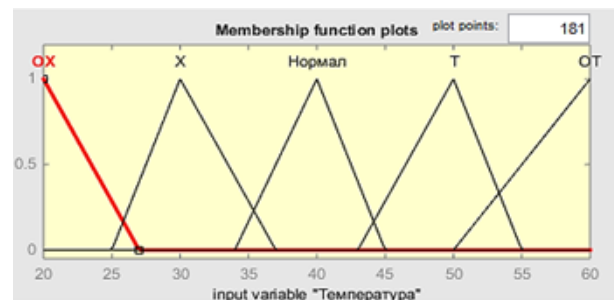
Лингвистическая переменная «pH», соответствующая входу нечеткого регулятора N и измеряемая косвенно при помощи датчика pH-метра, задается терминами ОН – «очень низкая», Н – «низкая», Нормал – «нормальная», В – «высокая», ОВ – «очень высокая», причем соответствующие нечеткие множества имеют очень большой индекс нечеткости, поскольку, датчик pH-метра имеет существенную погрешность, связанную со спецификой методов измерения и контроля данной величины, и дает весьма приблизительную оценку pH пульпы в среде биореактора [6, 7].

Лингвистическая переменная «Сост регул клапан», соответствующая выходу нечеткого регулятора, задается терминами ПЗ – «полностью закрыт», ЧЗ – «частично закрыт», Н – «нормальное закрытие», ЧО – «частично открыт», ПО – «полностью открыт».

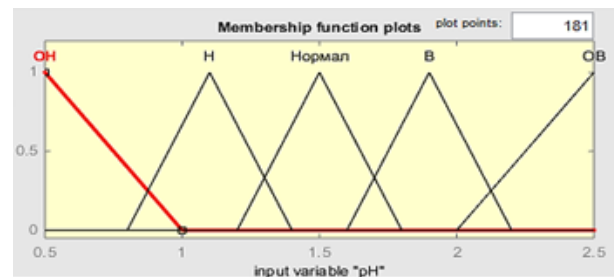
Качество любой нечеткой модели управления в значительной степени определяется адекватностью и полнотой разработанных правил и используемых функций принадлежности. Поэтому задачи формирования нечетких правил и построение функций принадлежности являются наиболее актуальными при разработке нечетких систем управления.

В работе выполнено исследование влияния вида функции принадлежности на окончательный результат. Для анализа выбраны две популярные формы для задания функции принадлежности: треугольная и трапецеидальная.

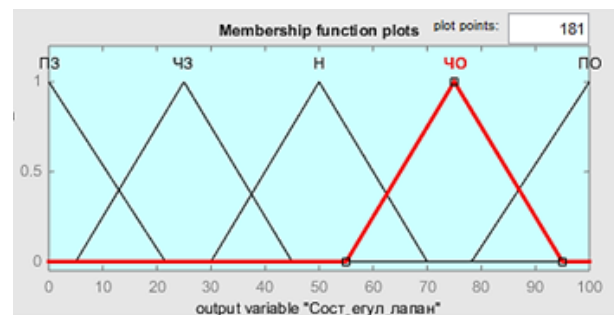
Параметры каждого из термов для всех лингвистических переменных определяются согласно данным, полученным из описания процесса бактериального окисления труднообогатимых золотосодержащих сульфидных руд. На рисунке 2 приведены параметры для входных и выходной переменных в случае использования треугольных функций принадлежности.



а



б



в

Рисунок 2. Параметры переменных: а) переменная «Температура», б) переменная «pH», в) переменная «Сост регул клапана» для треугольных функций

На рисунке 3 показаны параметры для входных и выходной переменных при использовании трапецеидальных функций принадлежности.

Отсутствие ограничений по входам нечеткого регулятора объясняется тем, что функции принадлежности лингвистических переменных

изначально задаются в пределах физически возможных значений входных величин: температура биореактора на интервале (20 °С; 50 °С), рН пульпы на интервале (1,0; 2,0) с учетом коэффициента передачи датчика рН-метра при оптимальной температуре ферментации $T = 42$ °С для заданных ранее параметров модели объекта управления [8].

Сигнал задания требуемого значения температуры процесса бактериального окисления отсутствует, поскольку ее значение задается в условиях неопределенности при формулировке базы продукционных правил системы нечеткого вывода и определении термов лингвистической переменной «Температура».

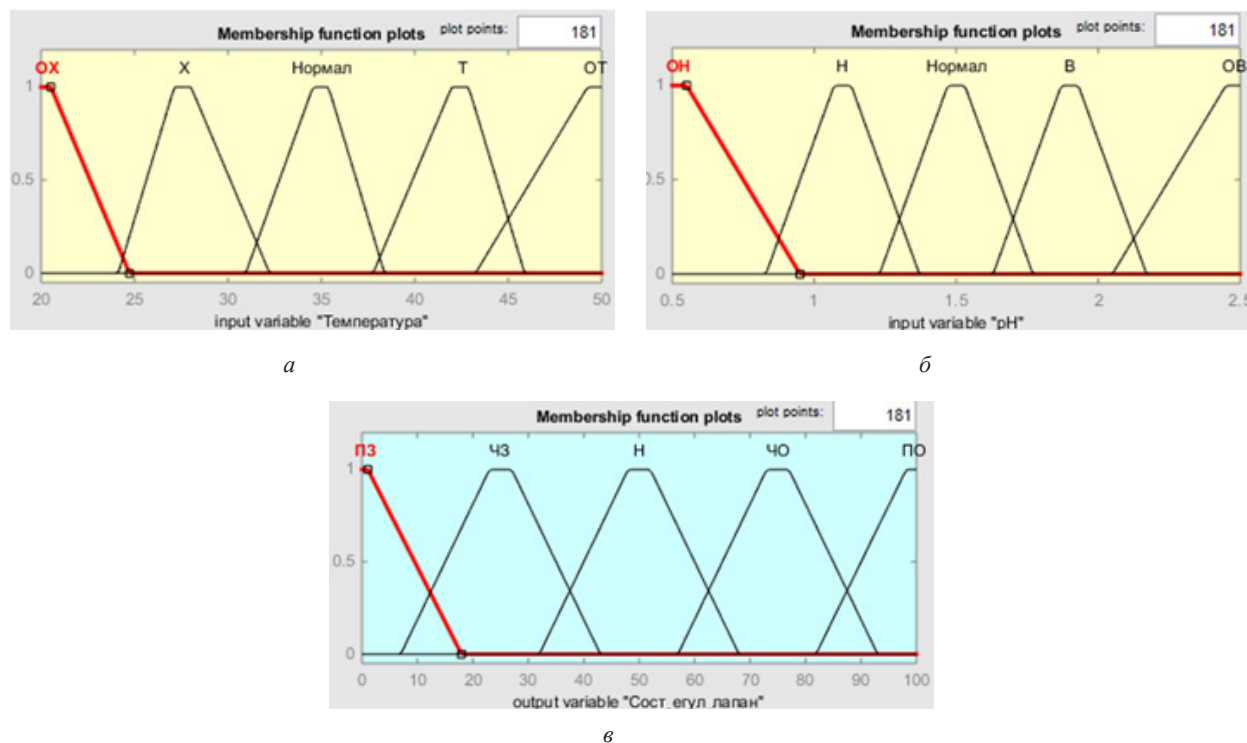


Рисунок 3. Параметры переменных: а) переменная «Температура», б) переменная «рН», в) переменная «Сост. регул. клапана» для трапециевидальных функций

Правила нечеткого вывода определялись на основании опыта эксплуатации объекта управления, ими руководствуется персонал при запуске биореактора. База правил состоит из 25

лингвистических выражений «Если-то», также используется логический оператор «И». Фрагмент сформированной базы правил приведен на рисунке 4.

```

10. If (Температура is X) and (pH is ОВ) then (Сост_регул_клапан is ОМ) (1)
11. If (Температура is Нормал) and (pH is ОН) then (Сост_регул_клапан is ОС) (1)
12. If (Температура is Нормал) and (pH is Н) then (Сост_регул_клапан is ОС) (1)
13. If (Температура is Нормал) and (pH is Нормал) then (Сост_регул_клапан is ОС) (1)
14. If (Температура is Нормал) and (pH is В) then (Сост_регул_клапан is ОС) (1)
15. If (Температура is Нормал) and (pH is ОВ) then (Сост_регул_клапан is ОС) (1)
16. If (Температура is Т) and (pH is ОН) then (Сост_регул_клапан is ОБ) (1)
17. If (Температура is Т) and (pH is Н) then (Сост_регул_клапан is ОБ) (1)
18. If (Температура is Т) and (pH is Нормал) then (Сост_регул_клапан is ОБ) (1)
19. If (Температура is Т) and (pH is В) then (Сост_регул_клапан is ОБ) (1)
20. If (Температура is Т) and (pH is ОВ) then (Сост_регул_клапан is ОБ) (1)
21. If (Температура is ОТ) and (pH is ОН) then (Сост_регул_клапан is ПО) (1)
22. If (Температура is ОТ) and (pH is Н) then (Сост_регул_клапан is ПО) (1)
23. If (Температура is ОТ) and (pH is Нормал) then (Сост_регул_клапан is ПО) (1)
24. If (Температура is ОТ) and (pH is В) then (Сост_регул_клапан is ПО) (1)
25. If (Температура is ОТ) and (pH is ОВ) then (Сост_регул_клапан is ПО) (1)

```

Рисунок 4. Фрагмент базы правил

С помощью интерактивного окна, предлагаемого редактором *Fuzzy Logic Toolbox*, был выполнен сравнительный анализ выходных результатов, полученных при одинаковых входных параметрах,

но для разных видов функций принадлежности. На рисунках 5 и 6 показаны результаты одного из таких сравнительных вариантов. На рисунке 7 визуализированы результаты всех экспериментов.

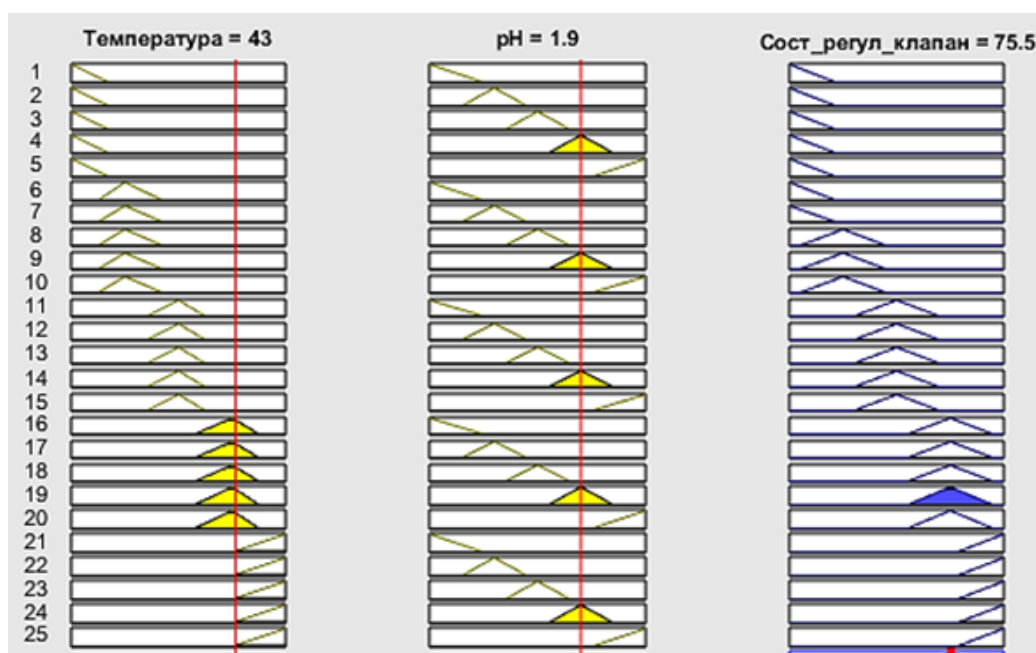


Рисунок 5. Значение выходной переменной в случае треугольных функций принадлежности

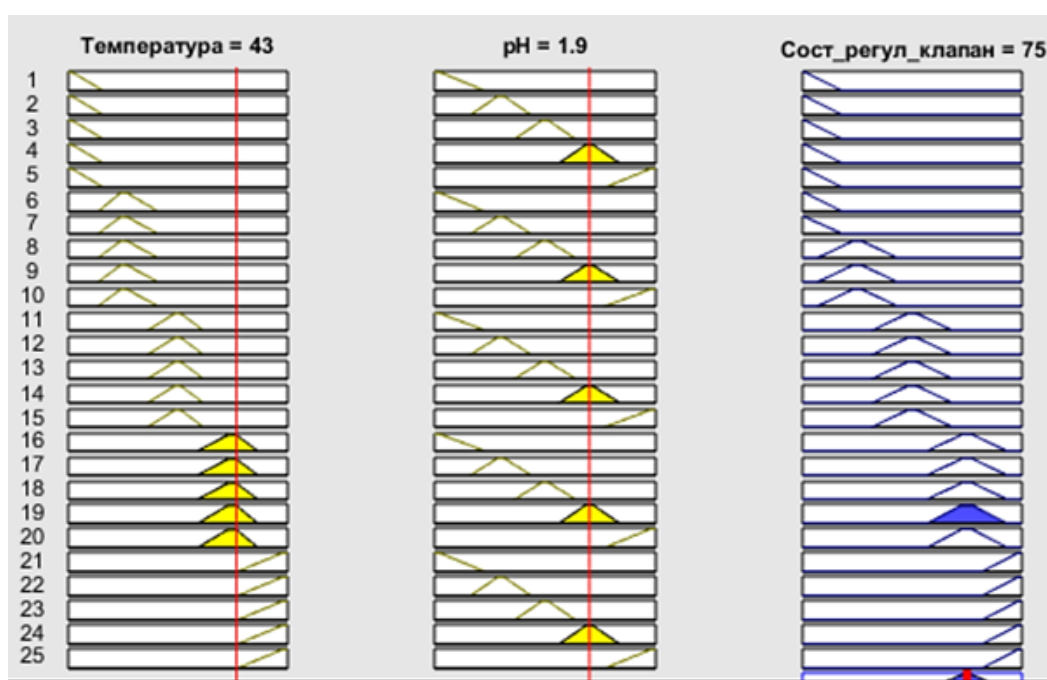


Рисунок 6. Значение выходной переменной в случае трапецидальных функций принадлежности

Анализ полученных результатов экспериментов (рисунок 7) позволяет сделать вывод, что применение функций принадлежности трапецидального вида позволяет сократить объем холодной воды, используемой для охлаждения биореактора.

Результаты моделирования работы нечеткой системы автоматического управления температурой биореактора с контроллером Мамдани представлены на рисунке 8.

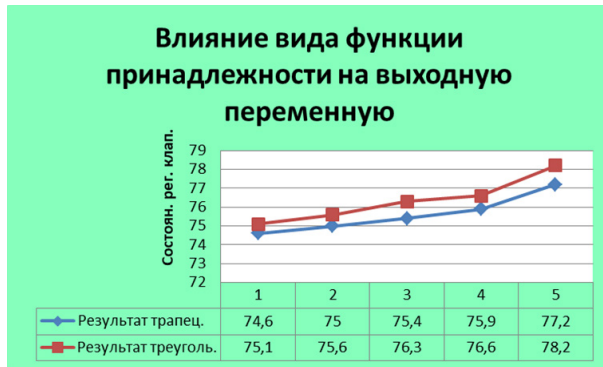


Рисунок 7. Влияние вида функции принадлежности на выходную переменную

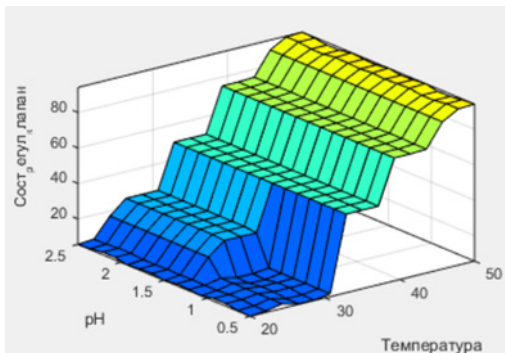


Рисунок 8. Поверхность отклика, отражающая зависимость состояния регулирующего клапана от входных переменных

Приведенный пример наиболее точно отражает преимущество применения нечетких систем управления, заключающееся в использовании автоматического нечеткого управления в случае, когда в принципе невозможен синтез управления методами точного автоматического управления, но существует опыт эксплуатации объекта, позволяющий сформулировать в лингвистической форме правила управления, приводящие к приемлемому результату.

Заключение

Разработанная нечеткая система управления позволяет эффективно осуществлять стабильную регулировку температуры при протекании процесса бактериального окисления.

Повышение качества ожидаемого результата в нечетких системах управления может быть достигнуто за счет уточнения опытным путем на основании анализа результатов решения конкретной задачи вида функций принадлежности. Так, применение трапециевидальной функции принадлежности вместо треугольной позволяет снизить расход воды, необходимой для охлаждения биореактора, при протекании процесса бактериального окисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Санакулов К.С., Эргашев У.А. Теория и практика освоения переработки золотосодержащих упорных руд Кызылкумов. ГП «Навоийский горно-металлургический комбинат». – Т.: ГП «НИИМР», 2014. – 286 с.
2. Жумаев О.А. Схемно-алгоритмические методы устранения влияния помех на точность интеллектуальных интерфейсов технологического процесса / О.А. Жумаев [и др.] // Journal of Physics: Серия конференций (том 1679, № 4, стр. 042037). IOP Publishing. (2020, ноябрь).
3. Жумаев О.А. Интеллектуальные системы управления с использованием алгоритмов метода энтропийного потенциала / О.А. Жумаев [и др.] // Journal of Physics: Серия конференций (том 2094, № 2, стр. 022030). IOP Publishing. (2021, ноябрь).
4. Абдужалилилович, Дж. О., Бакоевич, М. Г., и Элдор, А. (2021). Нечеткий логический регулятор в управлении технологическими процессами бактериального окисления. Web of Scientist: Международный журнал научных исследований, 2 (06), 191–197.
5. Юсупбеков, Н.Р., Жумаев О.А., Бакоевич М.Г., Исмаилов М.Т. (2020). Разработка интеллектуальных систем управления на основе Fuzzy Logic. Journal of Advances in Engineering Technology, (2), 20-25.
6. Махмудов Г.Б., Саидова А.Х., Мохилова Н.Т. Моделирование нечеткой логики для управления процессом бактериального окисления концентратов в реакторах с мешалкой // Современные инновации, системы и технологии. – 2022. – Т. 2. – №. 2. – С. 0201-0214.
7. Жумаев О.А. Применение нечеткого контроллера для управления процессом выщелачивания золота из продуктов бактериального вскрытия / О.А. Жумаев [и др.] // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2022. – №. 1. – С. 5-9.
8. Ботиров, Т.В., Махмудов, Г.Б. (2023). Разработка программного обеспечения системы нечеткого управления для биореактора. In WORLD OF SCIENCE 2023 (pp. 18-20).

REFERENCES

1. Sanakulov K.S., Ergashev U.A. Theory and practice of mastering the processing of gold-bearing refractory ores in the Kyzylkum. SE "Navoi Mining and Metallurgical Combine". – T. : SE "NIIMR", 2014, 286 p.

2. **Jumaev, O.A., Nazarov, J.T., Sayfulin, R.R., Ismoilov, M.T., Mahmudov, G.B.** Schematic and algorithmic methods of elimination influence of interference on accuracy of intellectual interfaces of the technological process. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1679, No. 4, p. 042037). IOP Publishing. (2020, November).

3. **Jumaev, O.A., Nazarov, J.T., Makhmudov, G.B., Ismoilov, M.T., Shermuradova, M.F.** Intelligent control systems using algorithms of the entropic potential method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2094, No. 2, p. 022030). IOP Publishing. (2021, November).

4. **Abdjalilovich, J.O., Bakoyevich, M.G., Eldor, A.** (2021). Fuzzy logic controller in the management of technological processes of bacterial oxidation. *Web of Scientist: International Scientific Research Journal*, 2(06), 191-197.

5. **Yusupbekov, N.R., Jumaev O.A., Bakoevich M.G., Ismailov M.T.** (2020). Development of intelligent control systems based on Fuzzy Logic. *Journal of Advances in Engineering Technology*, (2), 20-25.

6. **Mahmudov G.B., Saidova A.Kh., Mokhilova N.T.** Fuzzy logic modeling for controlling the process of bacterial oxidation of concentrates in reactors with a stirrer // *Modern innovations, systems and technologies*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 0201-0214.

7. **Jumaev O.A., Mahmudov G.B., Mazhidova R.B.** Applications of a fuzzy controller to control the process of gold leaching from bacterial opening products. *Journal of Advances in Engineering Technology*, 2022, no. 1, pp. 5-9.

8. **Botirov, T.V., & Makhmudov, G.B.** (2023). Software development for a fuzzy control system for a bioreactor. In *WORLD OF SCIENCE 2023* (pp. 18-20).

JUMAEV O.A.¹, KOVALEVA I.L.², MAHMUDOV G.B.¹

CONTROL OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE PROCESS OF BACTERIAL OXIDATION ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

¹*Navoi State Mining and Technological University, Uzbekistan*

²*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

The work is devoted to modeling the temperature control system for the process of bacterial oxidation of refractory gold-bearing sulfide ores. The simulation was performed using the Fuzzy Logic Toolbox editor in the MATLAB software package. The substantiation of the set of input and output variables, the type of membership functions was carried out, the base of rules for the inference engine was formed. The main stages of modeling are described and the results are analyzed. The use of trapezoidal membership functions is substantiated.

Keywords: control system, fuzzy controller, fuzzy control, bioreactor, membership functions, linguistic variable, defuzzification, fuzzification



Жумаев Одил Абдужалилович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и управление» НГГТУ. Научные интересы – автоматизация и управление, устройства и методы контроля, интеллектуализация, приборостроения.

Jumaev Odil Abdjalilovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Control, NSMTU. Scientific interests – automation and control, control devices and methods, intellectualization, instrumentation.

E-mail: jumaev5216@mail.ru



Ковалева Ирина Львовна, к.т.н., доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – методы и алгоритмы оптимизации технических систем, машинное обучение, распознавание образов.

Irina L.Kovaleva PhD, associate Professor of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. Her research interests focus on methods and algorithms of optimization and decision-making, pattern recognition and machine learning.

E-mail: ilkovaleva@bntu.by



Махмудов Гиёсжон Бакоевич, ассистент кафедры «Автоматизация и управление» НГГТУ. Научные интересы – автоматизация и управление технологического процесса, интеллектуализация, программирование.

Mahmudov Giyosjon Bakoyevich, assistant of the department "Automation and control" NSMTU. Scientific interests – automation and control of the technological process, intellectualization, programming.

E-mail: mahmudov.giyos@mail.ru