

ISSN: 2224-5227 (Print)
ISSN: 2518-1483 (Online)

**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE**

**№4
2025**

ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)



ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE

4 (356)

OCTOBER – DECEMBER 2025

**PUBLISHED SINCE JANUARY 1963
PUBLISHED 4 TIMES A YEAR**

ALMATY, NAS RK

CHIEF EDITOR:

MUTANOV Galimkair Mutanovich, doctor of technical sciences, professor, academician of NAS RK, acting General Director of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

EDITORIAL BOARD:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Advisor to the General Director of the Institute of Information and Computing Technologies of the CS MES RK, Head of the Laboratory (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

MAMYRBAEV Orken Zhumazhanovich, (Academic Secretary), PhD in Information Systems, Deputy Director for Science of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

BAIGUNCHEKOV Zhumadil Zhanabaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Institute of Cybernetics and Information Technologies, Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Sabayev University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

WOICK Waldemar, Doctor of Technical Sciences (Phys.-Math.), Professor of the Lublin University of Technology (Lublin, Poland), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

SMOLARJ Andrej, Associate Professor Faculty of Electronics, Lublin polytechnic university (Lublin, Poland), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

KEILAN Alimkhan, Doctor of Technical Sciences, Professor (Doctor of science (Japan)), chief researcher of Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

KHAIROVA Nina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

OTMAN Mohamed, PhD, Professor of Computer Science Department of Communication Technology and Networks, Putra University Malaysia (Selangor, Malaysia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

NYSANBAYEVA Saule Yerkebulanovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

BIYASHEV Rustam Gakashevich, doctor of technical sciences, professor, Deputy Director of the Institute for Informatics and Management Problems, Head of the Information Security Laboratory (Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603642864>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802016>

KAPALOVA Nursulu Aldazharovna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory cybersecurity, Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

KOVALYOV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

MIKHALEVICH Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

TIGHINEANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty).

Certificate № **KZ77VPY00121154** on the re-registration of the periodical printed and online publication of the information agency, issued on **05.06.2025** by the Republican State Institution «Information Committee» of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan

Subject area: *information and communication technologies*.

Currently: *included in the list of journals recommended by the CCSES MSHE RK in the direction of «Information and communication technologies».*

Periodicity: *4 times a year.*

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

БАС РЕДАКТОР:

МҮТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының м.а. (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

ҚАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділұлы, (бас редактордың орынбасары), физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының кеңесшісі, зертхана меңгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Өркен Жұмажанұлы (ғалым хатшы), Ақпараттық жүйелер саласындағы техника ғылымдарының (PhD) докторы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

БАЙГУНЧЕКОВ Жүмаділ Жанабайұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Кибернетика және ақпараттық технологиялар институты, Қолданбалы механика және инженерлік графика кафедрасы, Сәтбаев университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

ВОЙЧИК Вальдемар, техника ғылымдарының докторы (физ-мат), Люблин технологиялық университетінің профессоры (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛАРЖ Анджей, Люблин политехникалық университетінің электроника факультетінің доценті (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

КЕЙЛАН Әлімхан, техника ғылымдарының докторы, профессор (ғылым докторы (Жапония)), ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мохаммед, PhD, Информатика, Коммуникациялық технологиялар және желілер кафедрасының профессоры, Путра университеті Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

НЫСАНБАЕВА Сауле Еркебұланқызы, техника ғылымдарының докторы, доцент, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

БИЯШЕВ Рустам Гакашевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Информатика және басқару мәселелері институты директорының орынбасары, Ақпараттық қауіпсіздік зертханасының меңгерушісі (Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603642864>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802016>

КАПАЛОВА Нұрсұлу Аладжарқызы, техника ғылымдарының кандидаты, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты», Киберқауіпсіздік зертханасының меңгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина Ұлттық Ғылым академиясының академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь Ұлттық Ғылым академиясының академигі (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі **05.06.2025** ж. берген № **KZ77VPY00121154** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *ақпараттық-коммуникациялық технологиялар*

Қазіргі уақытта: *«ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» бағыты бойынша ҚР БҒМ БҒСБК ұсынған журналдар тізіміне енді.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС, 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Галимканр Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, советник генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК, заведующий лабораторией (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Оркен Жумажанович, (ученый секретарь), доктор философии (PhD) по специальности «Информационные системы», заместитель директора по науке РГП «Институт информационных и вычислительных технологий» Комитета науки МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

БАЙГУНЧЕКОВ Жумадил Жанабаевич, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Институт кибернетики и информационных технологий, кафедра прикладной механики и инженерной графики, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

ВОЙЧИК Вальдемар, доктор технических наук (физ.-мат.), профессор Люблинского технологического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛЯРЖ Анджей, доцент факультета электроники Люблинского политехнического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

КЕЙЛАН Алимхан, доктор технических наук, профессор (Doctor of science (Japan)), главный научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мохамед, доктор философии, профессор компьютерных наук, Департамент коммуникационных технологий и сетей, Университет Путра Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

НЫСАНБАЕВА Сауле Еркебулановна, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

БИЯШЕВ Рустам Гакашевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института проблем информатики и управления, заведующий лабораторией информационной безопасности (Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603642864>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802016>

КАПАЛОВА Нурсулу Алдажаровна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кибербезопасности РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: *ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).*

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания, информационного агентства и сетевого издания № **KZ77VPY00121154**. Дата выдачи **05.06.2025**

Тематическая направленность: *информационно-коммуникационные технологии.*

В настоящее время: *вошел в список журналов, рекомендованных КОКШВО МНВО РК по направлению «информационно-коммуникационные технологии».*

Периодичность: *4 раза в год.*

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2025

CONTENTS

B. Assanova, Zh. Moldasheva, A.T. Kishubaeva

Decision support system structure and blocks for selecting efficient delayed coking modes.....11

Zh.T. Abildayeva, R.K. Uskenbayeva, G.S. Beketova, N.B. Konyrbaev, S.B. Seydazimov

Multi-criterion optimization of advertising budget allocation in the agro-industrial complex based on NSGA-III algorithm.....26

A.O. Aliyeva, B.S. Omarov, R.B. Abdrakhmanov, D.R. Sultan, A.B. Toktarova

Neural network model for automatic detection of Kazakh-language hatespeech.....40

O. Auyelbekov, E. Bostanov, S. Sapakova, L. Tukenova, A. Kozhagul

Modeling and analysis of a generator with permanent and variable magnets.....55

G. Autova, G. Nurtayeva, E. Zulbukharova, G. Yeleussizova, R. Zhumabekova

Theoretical foundations of interdisciplinary integration of physics and computer science.....73

A.Zh. Akhmetova, M.A. Kantureyeva, A.A. Abisheva, A. Aubakirova, A.A. Shekerbek

Analysis of the social network user's environment.....89

A.Sh. Barakova, K.S. Shadinova, A.S. Orynbaeva, G. Sugurzhanova

Design of a model for protecting a website's authentication data and content based on blockchain technology.....102

A.N. Zhidebayeva, G.U. Madaliyeva, B.O. Tastanbekova, S.S. Karzhaubekova, G.S. Shaimerdenova

Deep neural network Conv-LSTM for ECG-based cardiac disorder identification.....122

N.M. Zhunissof, A.B. Aben, A.B. Amanzholova

The fraud detection model in text messages.....138

A. Issakhov, A. Alzhanov, A. Akhmedov, A. Amanzholov, T. Murat

Numerical simulation of thermohydrodynamics during heated water discharge into Lake Balkhash.....152

Z. Kaderkeyeva, B. Razakhova, G. Bekmanova, A. Nazyrova, M. Zhasuzakova Q-Bilim: an intelligent system for assessing learning outcomes based on competencies.....	171
N. Karymsakova, A. Boltaboyeva, D. Turmakhanbet, M. Maulenbekov, T. Abdirova Unsupervised learning for the identification of critical conditions in renewable energy production.....	184
A.Kulakayeva, E.Daineko, B. Medetov, A. Nurlankyzy Evaluation of the effectiveness of modern neural network architectures for VAD under low snr ratio conditions.....	203
B. Orazbayev, A. Zhumadillayeva, K. Orazbayeva, R. Yessirkessinov, Zh. Tuleuov Development of models of sulfur production processes based on artificial neural networks and simulation.....	216
L. Rzayeva, A. Ryzhova, M. Zhaparkhanova, A. Myrzatay, Zh. Kozhakhmet A new LSTM-based web application for automated password strength evaluation.....	234
D. Sagidoldin, A. Zhetpisbayeva, B. Zhumazhanov, B. Zhumazhanov Increasing the reliability of data transmission from small spacecraft using SDR equipment.....	259
A.N. Seraly, A.D. Mekhtiyev, G.Z. Ziyatbekova, K.B. Begalieva, R.A. Mekhtiyev Development of hardware for monitoring optical parameters.....	274
A.A. Taurbekova, M.V. Markosyan Development and implementation of a computational model of magmatic processes in the bowls of the Earth and on its surface.....	288
K. Chezhimbayeva, A. Mukhamejanova, Y. Garmashova Fuzzy-logic-based expert system for predicting QoS in 5G networks.....	306

МАЗМҰНЫ

Б.У. Асанова, Ж.Ж. Молдашева, А. Кишубаева Баяу кокстеу қондырғысы үшін тиімді жұмыс режимдерін таңдауға шешім қолдау жүйесі құрылымы.....	11
Ж.Т. Әбілдаева, Р.К. Ускенбаева, Г.С. Бекетова, Н.Б. Қоңырбаев, С.Б. Сейдазимов NSGA-III алгоритмі негізінде агроөнеркәсіптік кешендегі жарнамалық бюджетті бөлуді көп критериялы оңтайландыру.....	26
А.О. Әлиева, Б.С. Омаров, Р.Б. Абдрахманов, Д.Р. Султан, А.Б. Тоқтарова Қазақ тіліндегі дискриминацияны автоматты анықтауға арналған нейрондық желілік моделі.....	40
О. Әуелбеков, Е. Бостанов, С. Сапақова, Л. Түкенова, А. Қожағұл Тұрақты және айнымалы магниттері бар генераторды модельдеу және талдау.....	55
Г.М. Аутова, Г.К. Нуртаева, Э.М. Зильбухарова, Г.С. Елеусизова, Р.Р. Жұмабекова Физика мен информатика пәндерінің пәнаралық интеграциясының теориялық негіздері.....	73
А.Ж. Ахметова, М.А. Кантурсева, А.А. Абишева, А. Аубакирова, А.А. Шекербек Әлеуметтік желі қолданушыларының ортасын талдау.....	89
А.Ш. Баракова, К.С. Шадинова, А.С. Орынбаева, Г. Сугуржанова Блокчейн технологиясы негізінде веб сайттың аутентификациялық деректері мен өнімін қорғау моделін құрастыру.....	102
А.Н. Жидебаева, Г.У. Мадалиева, Б.О. Тастанбекова, С.С. Қаржаубекова, Г.С. Шаймерденова Жүрек ауруларын анықтауда Conv-LSTM архитектурасына негізделген терең нейрондық желі.....	122
Н.М. Жунисов, А.Б. Абен, Ә.Б. Аманжолова Мәтіндік хабарламалардағы алаяқтықты анықтау моделі.....	138
А.А. Исахов, А. Альжанов, А. Ахмедов, А. Аманжолов, Т. Мурат Балқаш көліне жылы су ағызу кезіндегі термогидродинамиканы сандық модельдеу.....	152

З.К. Кадеркеева, Б.Ш. Разахова, Г.Т. Бекманова, А.Е. Назырова, М.Ж. Жасұзақова Q-Bilim: құзыреттерге негізделген оқу нәтижелерін бағалауға арналған интеллектуалды жүйе.....	171
Н. Карымсакова, А. Болтабоева, Д. Тұрмаханбет, М. Мауленбеков, Т. Абдирова Жанартылатын энергия өндірісіндегі критикалық режимдерді анықтауға арналған мұғалімсіз оқыту.....	184
А. Кулакаева, Е. Дайнеко, Б. Медетов, А. Нурланкызы Сигнал/шуыл қатынасы төмен жағдайларда заманауи нейрондық желілік VAD архитектураларының тиімділігін бағалау.....	203
Б. Оразбаев, А. Жумадиллаева, К. Оразбаева, Р. Есиркесин, Ж. Тулеуов Күкірт өндіру процесстерінің модельдерін жасанды нейрондық желілер негізінде әзірлеу және модельдеу.....	216
Л. Рзаева, А. Рыжова, М. Жапарханова, А. Мырзатай, Ж. Кожамет, Құпиясөздің беріктігін автоматты бағалауға арналған LSTM негізіндегі жаңа веб-қосымша.....	234
Д.Т. Сагидолдин, А.Т. Жетписбаева, Б.Р. Жумажанов, Б.С. Жумажанов SDR жабдықтарын пайдалану арқылы, шағын ғарыш аппараттарынан деректерді берудің сенімділігін арттыру.....	259
А.Н. Сералы, А.Д. Мехтиев, Г.З. Зиятбекова, К.Б. Бегалиева, Р.А. Мехтиев Оптикалық параметрлерді бақылауға арналған аппараттық құрылғыны әзірлеу.....	274
А.А. Таурбекова, М.В. Маркосян Жер көзіндегі және оның бетіндегі магматтық процестердің есептік моделін әзірлеу және енгізу.....	288
К.С. Чежимбаева, А. Мухамеджанова, Ю. Гармашова Айқын емес логика негізінде 5G желілеріндегі QoS болжау expertтік жүйесі.....	306

СОДЕРЖАНИЕ

Б.У. Асанова, Ж.Ж. Молдашева, А. Кишубаева Структура и функциональные блоки системы поддержки решений для выбора режимов замедленного коксования.....	11
Ж.Т. Абилдаева, Р.К. Ускенбаева, Г.С. Бекетова, Н.Б. Конырбаев, С.Б. Сейдазимов Многокритериальная оптимизация распределения рекламного бюджета в апп на основе алгоритма NSGA-III.....	26
А.О. Алиева, Б.С. Омаров, Р.Б. Абдрахманов, Д.Р. Султан, А.Б. Токтарова Нейросетевая модель для автоматического обнаружения дискриминации в казахском языке.....	40
О. Ауельбеков, Е. Бостанов, С. Сапакова, Л. Туkenова, А. Кожугул Моделирование и анализ генератора с постоянными и переменными магнитами.....	55
Г.М. Аутова, Г.К. Нуртаева, Э.М. Зулбухарова, Г.С. Елеусизова, Р.Р. Жумабекова Теоретические основы междисциплинарной интеграции физики и информатики.....	73
А.Ж. Ахметова, М.А. Кантуреева, А.А. Абишева, А. Аубакирова, А.А. Шекербек Анализ окружения ползователей социальной сети.....	89
А.Ш. Баракова, К.С. Шадинова, А.С. Орынбаева, Г. Сугуржанова Разработка модели защиты аутентификационных данных и контента веб-сайта на основе технологии блокчейн.....	102
А.Н. Жидебаева, Г.У. Мадалиева, Б.О. Тастанбекова, С.С. Каржаубекова, Г.С. Шаймерденова Глубокая нейронная сеть на основе архитектуры Conv-LSTM для выявления сердечных заболеваний.....	122
Н.М. Жунисов, А.Б. Абен, А.Б. Аманжолова Модель обнаружения мошенничества в текстовых сообщениях.....	138
А.А. Исахов, А. Альжанов, А. Ахмедов, А. Аманжолов, Т. Мурат Численное моделирование термогидродинамики при сбросе подогретых вод в озеро Балхаш.....	152

З.К. Кадеркеева, Б.Ш. Разахова, Г.Т. Бекманова, А.Е. Назырова, М.Ж. Жасузакова Q-Bilim: интеллектуальная система оценки результатов обучения на основе компетенций.....	171
Н. Карымсакова, А. Болтабоева, Д. Тұрмаханбет, М. Мауленбеков, Т. Абдирова Обучение без учителя для выявления критических режимов в производстве возобновляемой энергии.....	184
А. Кулакаева, Е. Дайнеко, Б. Медетов, А. Нурланкызы Оценка эффективности современных нейросетевых архитектур VAD при низком отношении сигнал/шум.....	203
Б. Оразбаев, А. Жумадиллаева, К. Оразбаева, Р. Есиркесинов, Ж. Тулеуов Разработка моделей процессов производства серы на основе искусственных нейронных сетей и моделирование.....	216
Л. Рзаева, А. Рыжова, М. Жапарханова, А. Мырзатай, Ж. Кожамет Новое веб-приложение на основе LSTM для автоматизированной оценки надежности паролей.....	234
Д.Т. Сагидолдин, А.Т. Жетписбаева, Б.Р. Жумажанов, Б.С. Жумажанов Повышение надёжности передачи данных с малых космических аппаратов с применением SDR оборудования.....	259
А.Н. Сералы, А.Д. Мехтиев, Г.З. Зиятбекова, К.Б. Бегалиева, Р.А. Мехтиев Разработка аппаратного средства для контроля оптических параметров.....	274
А.А. Таурбекова, М.В. Маркосян, Н.Т. Карымсакова Разработка и реализация вычислительной модели магматических процессов в недрах земли и на её поверхности.....	288
К.С. Чежимбаева, А. Мухамеджанова, Ю. Гармашова Экспертная система прогнозирования QoS в 5G-сетях на основе нечеткой логики.....	306

© N. Karymsakova¹, A. Boltaboyeva^{2,3,4 *}, D. Turmakhanbet^{2,3,4},
M. Maulenbekov^{2,3,5}, T. Abdirova⁶, 2025.

¹ALT University named after M. Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan;

²Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan;

³LLP “Kazakhstan R&D Solutions”, Almaty, Kazakhstan;

⁴Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan;

⁵Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,
Almaty, Kazakhstan;

⁶State Communal Enterprise on the Right of Economic Management “Regional
Cardiology Center”, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz

UNSUPERVISED LEARNING FOR THE IDENTIFICATION OF CRITICAL CONDITIONS IN RENEWABLE ENERGY PRODUCTION

Nurgul Karymsakova — PhD, Associate Professor, Researcher, ALT University named after M. Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: n.karymsakova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8187-2369>;

Assiya Boltaboyeva — Researcher, Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering; Research Associate at LLP “Kazakhstan R&D Solutions”; 3rd-year PhD student at the Faculty of Information Technologies and Artificial Intelligence, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>;

Dinara Turmakhanbet — IoT Engineer at LLP “Kazakhstan R&D Solutions”; 4th-year student, Faculty of Information Technologies and Artificial Intelligence, Al-Farabi Kazakh National University; Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan, E-mail: turmahanbetdinara@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8388-4979>;

Marlen Maulenbekov — IoT Engineer at LLP “Kazakhstan R&D Solutions”; 4th-year student, Faculty of Electronics and Engineering, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev); Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: marlen.maulenbek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0703-7634>;

Aliya Baydauletova — Neurologist and Somnologist, Candidate of Medical Sciences, Medical Center “Neuroclinika”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: baidaulet123@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5510-3590>.

Abstract. Anaerobic digestion is a multifaceted biochemical process that frequently encounters instability arising from fluctuations in feedstock characteristics, shifts in operating conditions, and changes within the microbial community. While mechanistic approaches such as ADM1 provide an established

theoretical framework, they typically demand substantial parameter tuning and often fail to fully capture the rapidly changing behavior of industrial-scale reactors. To overcome these constraints, this study employs unsupervised learning—particularly clustering analyses—to distinguish discrete, recurring operational regimes in full-scale anaerobic digesters. Using long-term datasets collected from commercial facilities, the analysis incorporates multiple indicators, including concentrations of volatile fatty acids, biogas composition, and other key process variables. The clustering results consistently revealed three dominant regimes: a stable mode associated with high methane productivity; transitional conditions marked by moderate imbalances; and inhibited states characterized by elevated volatile fatty acids and lower methane content. Importantly, these data-driven regimes corresponded closely with real operational events such as abrupt increases in organic loading, underscoring the method's ability to detect emerging disturbances before they escalate. The study demonstrates that unsupervised learning can serve as a valuable complement to traditional modeling by offering a practical means of interpreting complex process dynamics. Its capacity to highlight regime shifts and signal early deviations suggests clear potential for improving monitoring strategies, reinforcing system stability, and enabling more proactive, data-informed management of industrial anaerobic digestion operations.

Keywords: anaerobic digestion, unsupervised learning, clustering, process monitoring, biogas production, operational regimes, machine learning

Funding: *This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26103739) and LLP Kazakhstan R&D Solutions.*

**Н. Карымсакова¹, А. Болтабоева^{2,3,4 *}, Д. Тұрмаханбет^{2,3,4},
М. Мауленбеков^{2,3,5}, Т. Абдирова⁶ 2025.**

¹М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан;

²У.А. Жолдасбеков атындағы Механика және Инженерия Институты,
Алматы, Қазақстан;

³"Kazakhstan R&D Solutions" ЖШС, Алматы, Қазақстан;

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

⁵Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан;

⁶Шаруашылық жүргізу құқығындағы мемлекеттік коммуналдық кәсіпорын
«Облыстық кардиологиялық орталық, Алматы, Қазақстан.

E-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz

ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ ӨНДІРІСІНДЕГІ КРИТИКАЛЫҚ РЕЖИМДЕРДІ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН МҰҒАЛІМСІЗ ОҚЫТУ

Карымсакова Нургуль — PhD, М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: n.karymsakova@alt.edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8187-2369>;

Болтабоева Асия — зерттеуші, У.А. Жолдасбеков атындағы Механика және Инженерия институты, ТОО «Kazakhstan R&D Solutions» ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің Ақпараттық технологиялар және жасанды интеллект факультетінің 3-курс докторанты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>;

Турмахан Динара — IoT инженері, ТОО «Kazakhstan R&D Solutions», 4-курс студенті, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университетінің Ақпараттық технологиялар және жасанды интеллект факультеті; У.А. Жолдасбеков атындағы Механика және Инженерия институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: turmahanbetdinara@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8388-4979>;

Мауленбеков Марлен — IoT инженері, ТОО «Kazakhstan R&D Solutions», 4-курс студенті, К. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің Электроника және инженерия факультеті; У.А. Жолдасбеков атындағы Механика және Инженерия институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: marlen.maulenbek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0703-7634>;

Абдирова Тамара — невролог және сомнолог, медицина ғылымдарының кандидаты, «Нейроклиника» медициналық орталығы, Алматы, Қазақстан,

E-mail: baidaulet123@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5510-3590>.

Аннотация: Анаэробты ашыту – құрамындағы шикізаттың өзгеруі, технологиялық параметрлердің ауытқуы және микробтық қауымдастық динамикасы салдарынан жиі тұрақсыздыққа ұшырайтын көпқырлы биохимиялық процесс. ADM1 сияқты механистік модельдер теориялық тұрғыдан маңызды негіз ұсынғанымен, оларды қолдану айтарлықтай параметрлік баптауды талап етеді және өнеркәсіптік ауқымдағы реакторлардың тез өзгеретін мінез-құлқын толық көрсете бермейді. Осы шектеулерді жеңілдету үшін бұл зерттеуде бақылаусыз оқыту әдістері, атап айтқанда кластерлік талдау, толық ауқымды анаэробты биореакторларда қайталанатын операциялық режимдерді анықтау үшін қолданылды. Коммерциялық нысандардан ұзақ мерзімді жиналған деректер ұшпа май қышқылдарының концентрациясын, биогаз құрамын және басқа да негізгі технологиялық көрсеткіштерді қамтитын көпөлшемді жиынтықтарға негізделді. Кластерлік талдау үш басым режимді анықтады: жоғары метан өнімділігімен сипатталатын тұрақты жұмыс күйі; орташа теңгерімсіздіктер байқалатын өтпелі кезеңдер; және ұшпа май қышқылдарының жиналуы мен метан мөлшерінің төмендеуімен ерекшеленетін тежелген күй. Бұл режимдер органикалық жүктеменің күрт артуы сияқты нақты технологиялық оқиғалармен жақсы сәйкес келді, әдістің ерте ескертетін құрал ретінде құндылығын дәлелдеді. Зерттеу бақылаусыз оқытудың анаэробты ашыту жүйелерін бақылауды жақсартуға, тұрақтылығын арттыруға және индустриялық процестерді неғұрлым проактивті басқаруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: анаэробты ашу, бақылаусыз оқыту, кластерлеу, процесс мониторингі, биогаз өндіру, операциялық режимдер, машиналық оқыту

© Н. Карымсакова¹, А. Болтабоева^{2,3,4,*}, Д. Тұрмаханбет^{2,3,4},
М. Мауленбеков^{2,3,5}, Т. Абдирова⁶, 2025

¹Университет АЛТ им. М.Тынышпаева”, Алматы, Казахстан;

²Институт Механики и Инженерии им. У. А. Джолдасбекова,
Алматы, Казахстан;

³ТОО “Kazakhstan R&D Solutions”, Алматы, Казахстан;

⁴Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

⁵Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

⁶ГКП на ПХВ «Областной кардиологический центр, Алматы, Казахстан.
E-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz

ОБУЧЕНИЕ БЕЗ УЧИТЕЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Карымсакова Нургуль — PhD, научный сотрудник, Университет АЛТ им. М.Тынышпаева”,
Алматы, Казахстан,

E-mail: n.karymsakova@alt.edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8187-2369>;

Болтабоева Асия — исследователь, Институт Механики и Инженерии им. У.А. Джолдасбекова,
научный сотрудник в ТОО «Kazakhstan R&D Solutions», Докторант 3-го года в Факультете
Информационных Технологий и Искусственного Интеллекта, Казахский Национальный
Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>;

Тұрмаханбет Динара — инженер IoT в ТОО «Kazakhstan R&D Solutions», студентка 4
курса, Факультет Информационных Технологий и Искусственного Интеллекта, Казахский
Национальный Университет им. аль-Фараби; Институт Механики и Инженерии им.
У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан,

E-mail: turmahanbetdinara@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8388-4979>;

Мауленбеков Марлен — инженер IoT в ТОО «Kazakhstan R&D Solutions», студент 4 курса,
Факультет электроники и инженерии, Казахский национальный исследовательский технический
университет им. К. Сатпаева; Институт Механики и Инженерии им. У.А. Джолдасбекова,
Алматы, Казахстан,

E-mail: marlen.maulenbek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0703-7634>;

Байдаулетова Алия — невролог и сомнолог, кандидат медицинских наук, Медицинский центр
«Нейроклиника», Алматы, Казахстан,

E-mail: baidaulet123@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5510-3590>.

Аннотация: Анаэробное сбраживание представляет собой многокомпонентный биохимический процесс, который нередко становится нестабильным из-за изменений в составе сырья, колебаний технологических параметров и динамики микробного сообщества. Хотя механистические модели, такие как ADM1, дают важную теоретическую основу, их применение требует значительной калибровки параметров и зачастую не отражает быстро меняющееся поведение промышленных реакторов. Чтобы преодолеть эти ограничения, в данном исследовании использованы методы обучения без учителя, в частности кластерный анализ, направленный на выявление повторяющихся эксплуатационных режимов в полноразмерных анаэробных

дигестерах. Длительные исторические данные с промышленных объектов включали многомерные показатели, такие как концентрации летучих жирных кислот, состав биогаза и ключевые параметры процесса. Анализ кластеров выявил три основных режима: стабильный режим с высокой метановой продуктивностью; переходные состояния с умеренными отклонениями; и ингибированные режимы, характеризующиеся накоплением летучих жирных кислот и снижением содержания метана. Важно, что обнаруженные режимы хорошо совпадали с реальными производственными ситуациями, включая резкие повышения органической нагрузки, что подтвердило ценность метода как инструмента раннего предупреждения. Исследование показывает, что методы обучения без учителя могут существенно повысить качество мониторинга, укрепить стабильность процесса и способствовать более проактивному управлению промышленными системами анаэробного сбраживания.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, обучение без учителя, кластеризация; мониторинг процессов, производство биогаза, эксплуатационные режимы, машинное обучение, летучие жирные кислоты

Финансирование: Это исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP26103739) и ТОО «Kazakhstan R&D Solutions».

Введение. Анаэробное сбраживание признано одной из ключевых биотехнологий для утилизации органических отходов и производства возобновляемой энергии, преимущественно в форме биогаза (Zhu et al., 2025; Meola et al., 2025; Rutland et al., 2025; Zhu et al., 2025). Этот многостадийный биохимический процесс, протекающий при отсутствии кислорода с участием разнообразного микробного сообщества, обеспечивает преобразование различных типов органического сырья — включая пищевые отходы, осадки сточных вод и сельскохозяйственные остатки — в метан (CH_4) и диоксид углерода (CO_2) (Zhu et al., 2025; Meola et al., 2025; Obileke et al., 2024; Ali et al., 2025).

Несмотря на значительный потенциал, процессы анаэробного сбраживания обладают высокой сложностью и выраженной нелинейностью, так как зависят от множества взаимосвязанных факторов: состава субстрата, органической нагрузки (OLR), гидравлического времени удерживания (HRT), температуры, уровня pH и динамики микробного сообщества (Rutland et al., 2025; Tasmurzaev et al., 2022; Simeonov et al., 2025; Sidi Habib et al., 2024; Long et al., 2025). Нестабильность реактора, возникающая из-за колебаний характеристик сырья или накопления промежуточных продуктов, таких как летучие жирные кислоты (ЛЖК), может приводить к снижению выработки метана, ухудшению качества биогаза и даже к полному нарушению процесса

(Zhu et al., 2025; Zhu et al., 2025; Ali et al., 2025; Jia et al., 2025; Beschkov et al., 2025).

Высокие скорости разложения пищевых отходов часто вызывают накопление ЛЖК, что снижает pH ниже оптимальных значений для метаногенов и, как следствие, ингибирует метаногенез (Tasmurzayev et al., 2022; Lee et al., 2023; Amangeldy et al., 2023; Tongco et al., 2025). Такое нарушение баланса может привести к технологическим сбоям, поэтому эффективный мониторинг и управление процессом являются критически важными для поддержания стабильности, оптимизации производительности и обеспечения экономической эффективности промышленных систем анаэробного сбраживания (Zhu et al., 2025; Rutland et al., 2025; Tasmurzayev et al., 2022; Simeonov et al., 2025; Sidi et al., 2024).

Традиционные методы контроля процессов анаэробного сбраживания, как правило, основаны на периодическом отборе проб и трудоёмких лабораторных анализах (Rutland et al., 2025; Almansa et al., 2023; Sappl et al., 2023). Эти методы не обеспечивают получение данных в реальном времени, что затрудняет оперативное реагирование на внезапные изменения или развитие нестабильности (Rutland et al., 2025; Jia et al., 2023).

Механистические модели, такие как общепринятая Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) (Meola et al., 2025; Sappl et al., 2023; Dekhici et al., 2025; Amangeldy et al., 2024), позволяют глубоко понять биохимические и физико-химические процессы (Moradvandi et al., 2025), однако требуют значительной калибровки множества параметров и больших вычислительных ресурсов (Meola et al., 2025; Sappl et al., 2023). Их применение в промышленных масштабах ограничено необходимостью дорогостоящих офлайн-измерений и высокой чувствительностью к ошибкам сенсоров (Meola et al., 2025; Rutland et al., 2025; Sappl et al., 2023). Упрощённые механистические модели, в свою очередь, часто не способны адекватно описывать сложную нелинейную динамику, наблюдаемую в реальных системах анаэробного сбраживания (Tasmurzayev et al., 2022; Sappl et al., 2023; Dekhici et al., 2025; Amangeldy et al., 2024).

Модели, разработанные на основе лабораторных или пилотных данных, нередко плохо масштабируются на промышленные условия из-за большей сложности микробных сообществ и изменчивости эксплуатационных параметров (Dekhici et al., 2025). Это подчёркивает наличие разрыва в способности точно предсказывать и интерпретировать поведение промышленных анаэробных реакторов (Long et al., 2025; Amangeldy et al., 2024).

В последние годы методы, основанные на данных, особенно машинное обучение (ML) и искусственный интеллект (AI), стали мощным инструментом для решения задач мониторинга и оптимизации процессов анаэробного сбраживания (Sappl et al., 2023; Dekhici et al., 2025; Amangeldy et al., 2024).

В отличие от механистических моделей, алгоритмы машинного обучения способны выявлять сложные нелинейные зависимости между входными и выходными параметрами без необходимости глубокого понимания внутренних биохимических механизмов. Они позволяют предсказывать показатели, которые ранее требовали дорогостоящих анализов, тем самым повышая эффективность и стабильность работы систем (Tasmurzayev et al., 2022).

Различные алгоритмы машинного обучения — такие как искусственные нейронные сети (ANNs), регрессия на опорных векторах (SVR), случайные леса и градиентный бустинг — успешно применялись для прогнозирования выработки биогаза и метана при различных условиях [9]. Машинное обучение также обеспечивает эффективные инструменты для анализа больших массивов эксплуатационных данных (Sappl et al., 2023), выявления аномалий и изучения динамики поведения систем (Sappl et al., 2023; Dekhici et al., 2025; Amangeldy et al., 2024). Эти возможности особенно важны для установок анаэробного сбраживания, работающих с переменным сырьём и подверженных внешним воздействиям, таким как температурные колебания (Moradvandi et al., 2025).

Несмотря на растущее применение методов машинного обучения в анаэробном сбраживании, большинство исследований сосредоточено на прогнозировании производительности или выявлении отказов (Sidi et al., 2024; Sappl et al., 2023; Dekhici et al., 2025; Amangeldy et al., 2024). Потенциал методов обучения без учителя, в частности кластерного анализа, для систематического выявления дискретных и повторяющихся эксплуатационных режимов в промышленных анаэробных реакторах остаётся недостаточно изученным (Sappl et al., 2023).

Настоящее исследование направлено на восполнение данного пробела. Основная цель работы — определить, могут ли методы кластеризации использоваться для идентификации различных эксплуатационных режимов в промышленных анаэробных реакторах на основе многомерных данных, включающих концентрации летучих жирных кислот, состав биогаза (CH_4 , CO_2), а также другие ключевые технологические параметры — pH, органическую нагрузку и гидравлическое время удерживания (Long et al., 2025; Tongco et al., 2025; Sappl et al., 2023; Amangeldy et al., 2024; Moradvandi et al., 2025).

Выявление таких режимов позволит операторам глубже понимать базовое поведение реактора при изменяющихся условиях, принимать более обоснованные технологические решения и осуществлять проактивное управление. Научная новизна исследования заключается в применении кластерного анализа для характеристики и классификации сложных, высокоразмерных промышленных данных анаэробного сбраживания, что обеспечивает новые возможности для анализа динамики систем и способствует разработке более надёжных стратегий управления (Sappl et al., 2023).

Схема выполнения исследования представлена на рисунке 1.

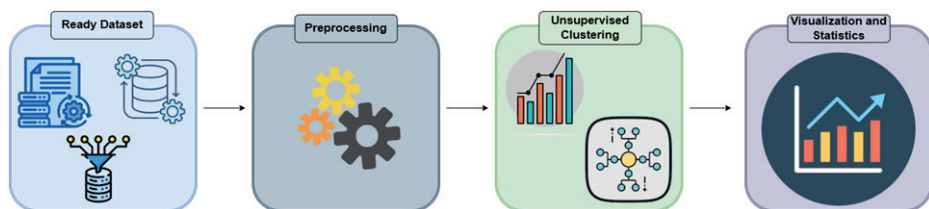


Рисунок 1 - Схема методологии исследования.

Материалы и методы. 2.1. Архитектура системы и сбор данных

Основой данного исследования послужил набор данных, полученный в результате мониторинга работы восьми биореакторов на протяжении 127 дней. Эти данные были структурированы таким образом, чтобы отразить ключевые биохимические и эксплуатационные аспекты процесса анаэробного сбраживания. В качестве основных входных переменных для анализа были выбраны суточные концентрации летучих жирных кислот (ЛЖК) — чувствительных маркеров микробного дисбаланса, а также состав биогаза (CH_4 и CO_2), напрямую отражающий эффективность протекания процесса. Для получения более полной картины к этим показателям были добавлены эксплуатационные параметры, такие как pH, температура и органическая нагрузка, в результате чего была сформирована итоговая матрица, включающая 741 наблюдение и 15 информативных переменных. Переменные, включённые в набор данных, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Переменные, используемые в биореакторах

VFAg	Уксусная, пропионовая, изомасляная, н-масляная, изовалериановая, валериановая, гексановая, гептановая кислоты, а также суммарные ЛЖК (для каждого реактора D1–D8)	г·Л ⁻¹	127 дней × 8 реакторов	Промежуточные метаболиты, маркеры нестабильности
Название параметра	Включенные переменные	Единицы измерения	Количество записей	Роль в анализе
Gas comp	CH_4 , CO_2 (объёмные доли), общий CH_4 , общий CO_2 , стандартное отклонение (CH_4 , CO_2)	объем %	Агрегировано по эксплуатационным интервалам (~127 дней)	Выходная эффективность, состав и стабильность биогаза
Process parameters (merged)	pH, температура, органическая нагрузка (OLR), гидравлическое время удерживания (HRT)	—	127 дней × 8 реакторов	Эксплуатационный контекст и управляющие переменные

Первым шагом в нашей работе стала подготовка данных для анализа. Мы выполнили ежедневное выравнивание временных рядов и применили

метод k-ближайших соседей (KNN-imputation) для обработки пропущенных значений. Затем была проведена z-стандартизация всех переменных, чтобы привести их к общей шкале и обеспечить корректную работу алгоритмов машинного обучения. Далее мы перешли к созданию новых признаков (feature engineering), сформировав составные индексы, которые более точно характеризуют состояние процесса. В частности, были рассчитаны ключевые показатели, такие как соотношение пропионовой и уксусной кислот, соотношение CO_2 к CH_4 и логарифм общей концентрации летучих жирных кислот. Эти индексы позволили классифицировать состояние реактора на три режима: стабильный, начальный дисбаланс и ацидогенный стресс.

Для автоматического обнаружения отклонений от нормальной работы была реализована модель обучения без учителя. Мы использовали алгоритмы кластеризации, такие как K-Means и DBSCAN, для выявления аномалий, не соответствующих стабильным эксплуатационным режимам. В результате система автоматически формирует оповещения об аномалиях для оператора.

На заключительном этапе внимание было уделено предоставлению оператору инструментов для принятия решений. Система генерирует визуализации на основе анализа главных компонент (PCA), статистические сводки и прямые уведомления. Основываясь на этой информации, оператор может своевременно предпринимать корректирующие действия, например регулировать подачу сырья или щёлочность, чтобы предотвратить сбой процесса и стабилизировать работу биореактора.

Предложенная архитектура, представленная на рисунке 1, была разработана для бесшовной интеграции в промышленные установки анаэробного сбраживания и согласована с иерархическими структурами управления, обычно применяемыми в процессных отраслях. На уровне 0 (L0) информация о процессе поступает от сертифицированных датчиков и исполнительных механизмов, которые изначально интегрированы в инфраструктуру распределённой системы управления (DCS) или системы диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA).

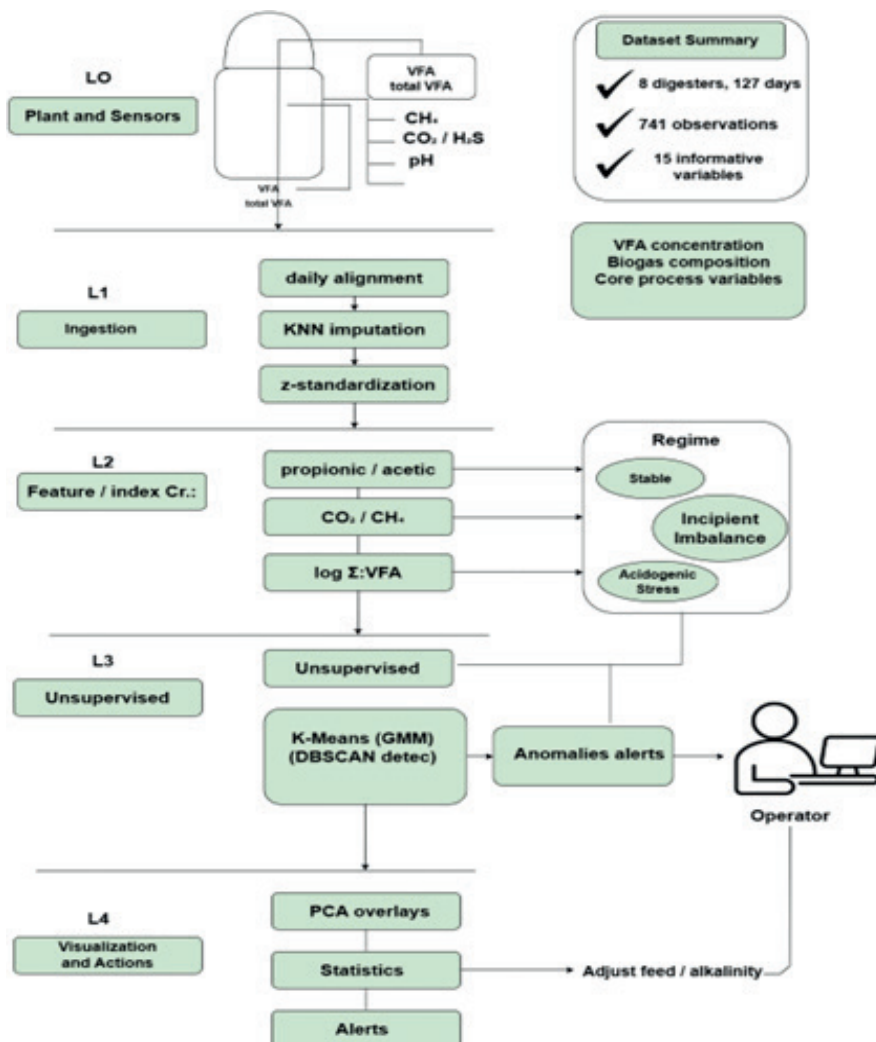


Рисунок 2 - Иерархическая архитектура мониторинга процесса биогазопроизводства и обнаружения аномалий.

Непрерывные измерения летучих жирных кислот (VFA), pH и состава биогаза (CH₄, CO₂, H₂S) обеспечивают базовые показатели работы реактора; при этом протоколы калибровки датчиков строго регистрируются, а процедуры контроля качества автоматически помечают периоды калибровки и ненадёжные значения. На уровне 1 (L1) уровень ввода данных реализован в среде хранения данных предприятия (plant historian) и промежуточном программном обеспечении для интеграции данных. Здесь автоматизированные конвейеры согласовывают данные с дневным разрешением, применяют реконструкцию пропусков методом k-ближайших соседей (KNN) и выполняют z-стандартизацию для всех сигналов.

Интерфейсы с лабораторными информационными системами (LIMS) дополнительно обеспечивают автоматическую загрузку офлайн-результатов анализов, что гарантирует сопоставимость лабораторных данных и данных онлайн-датчиков, а также преемственность между экспериментальной валидацией и промышленной эксплуатацией. На уровне 2 (L2) формирование признаков выполняется на периферийных серверах или в виртуализированных средах, напрямую подключённых к сетевой инфраструктуре предприятия. Производные показатели, включая соотношение пропионовой и уксусной кислот, соотношение CO_2/CH_4 и логарифм суммарной концентрации ЛЖК, вычисляются почти в реальном времени. Эти вычисленные индексы повышают чувствительность к метаболическому дисбалансу по сравнению с исходными измерениями, а контейнеризированные конвейеры обеспечивают переносимость между разнородным оборудованием и масштабируемость - от пилотных установок с одним реактором до многореакторных промышленных комплексов.

На уровне 3 (L3) модели обучения без учителя внедряются в контролируемой среде машинных операций (MLOps). Алгоритмы кластеризации, такие как K-Means и гауссовы смесевые модели (GMM), классифицируют эксплуатационные состояния как стабильное, начальный дисбаланс или ацидогенный стресс, в то время как DBSCAN используется для выявления аномалий и выбросов. Механизмы обнаружения дрейфа данных непрерывно отслеживают изменения распределений и инициируют повторное обучение моделей, чтобы сохранять точность прогнозирования при изменении качества сырья или условий работы. Важно отметить, что все модели функционируют в консультативном режиме, обеспечивая совместимость с системами безопасности и сохраняя полномочия оператора. На уровне 4 (L4) результаты моделирования интегрируются в интерфейс оператора через SCADA и человеко-машинные интерфейсы (HMI). Визуальная аналитика в форме наложений анализа главных компонент (PCA), статистических панелей и автоматических уведомлений об аномалиях обеспечивает наглядную интерпретацию результатов моделей. Оповещения распространяются как в операторской, так и по защищённым мобильным каналам, что обеспечивает своевременное информирование, а рекомендации - например, корректировка подачи сырья или дозирования щёлочи - передаются в консультативном виде, поддерживая проактивные действия без нарушения автономности системы.

С точки зрения эксплуатации, архитектура соответствует промышленным стандартам кибербезопасности (IEC 62443) и использует строгие механизмы контроля доступа для предотвращения несанкционированных изменений. Процедуры обслуживания включают плановую перекалибровку датчиков, автоматическую проверку данных и постоянный мониторинг состояния системы. Ключевые показатели эффективности (KPI) установлены на двух уровнях: эксплуатационные KPI - точность обнаружения, уровень

ложных срабатываний и время раннего предупреждения о дисбалансе; и аналитические KPI - разделимость кластеров, объяснённая дисперсия в PCA и чувствительность обнаружения аномалий. В совокупности эти показатели обеспечивают количественную основу для оценки эффективности и непрерывного совершенствования системы. В целом, данный путь промышленного внедрения демонстрирует, что архитектура является не только теоретически обоснованной, но и практически реализуемой. Она поддерживает воспроизводимую интеграцию в существующие производственные инфраструктуры, гарантирует надёжность и безопасность в реальных условиях и обеспечивает масштабируемость для нескольких реакторов и производственных площадок. Связывая экспериментальные наборы данных с системами оперативного управления, архитектура формирует чёткий путь к промышленному применению методов обучения без учителя для выявления режимов в процессах анаэробного сбраживания.

2.2. Предобработка данных

Для обеспечения сопоставимости переменных, имеющих разные шкалы и физические единицы измерения, все непрерывные признаки были подвергнуты z-стандартизации перед кластеризацией. Этот шаг необходим, поскольку алгоритмы, такие как K-Means, основаны на евклидовых расстояниях, которые сильно зависят от масштаба переменных. Без нормализации признаки с большими числовыми диапазонами (например, общие ЛЖК в г·л⁻¹) будут доминировать над признаками с малыми диапазонами (например, pH), что приведёт к искажённым кластерам. Стандартизация преобразует каждый признак к нулевому среднему и единичной дисперсии, уравнивая их влияние и обеспечивая, чтобы кластеризация отражала внутреннюю структуру данных, а не масштаб измерений (Jain, 2010). Преобразование определяется выражением:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma},$$

где: x — наблюдаемое значение,

μ — среднее значение,

σ — стандартное отклонение признака.

После этой процедуры все признаки становятся безразмерными и центрируются вокруг нуля, что позволяет корректно сравнивать разнородные биохимические и эксплуатационные переменные.

Признаки, имевшие более 50 % пропущенных значений, были исключены, а оставшиеся пробелы заполнены методом множественной импутации k-ближайших соседей ($k = 3$). Все непрерывные переменные подвергались z-стандартизации для устранения масштабных искажений. Были дополнительно рассчитаны диагностические индексы: соотношение пропионовой и уксусной кислот как показатель ингибирования метаногенеза; соотношение CO_2/CH_4 как индикатор глубины сбраживания; натуральный

логарифм общей концентрации ЛЖК для коррекции правостороннего смещения распределений; и составной индекс нестабильности, определённый как нормализованная сумма z-оценок pH, Σ VFA и CH_4 .

Для снижения шумов и уменьшения размерности применялся анализ главных компонент (РСА); сохранялись компоненты, объясняющие не менее 95 % общей дисперсии (обычно четыре–пять). Итоговая матрица признаков включала 741 наблюдение и 15 информативных переменных, представляющих ключевые промежуточные продукты, конечные продукты и эксплуатационные параметры анаэробного процесса.

После выделения четырёх режимов каждый кластер был профилирован по медианам, межквартильным диапазонам и коэффициентам вариации для всех исходных и производных переменных. Критерий Крускала–Уоллиса ($p < 0.01$) подтвердил значимые различия между кластерами для общей концентрации ЛЖК, соотношения пропионовой и уксусной кислот, содержания CH_4 и составного индекса нестабильности. Пост-хок тест Данна с поправкой Хольма выявил наиболее контрастные пары, а обобщённые значения η^2 варьировали от 0.12 (для pH) до 0.54 (для индекса нестабильности), что указывает на средние и большие эффекты. Проекция центроидов кластеров на первые две главные компоненты показала чёткое разделение режима III, характеризующегося Σ VFA выше $1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ и CH_4 ниже 55 %, что соответствует ацидогенной фазе. Временное сопоставление меток кластеров показало, что переходы от режима I к режиму III совпадали с резкими скачками OLR, подчёркивая технологическую интерпретируемость кластеров и демонстрируя применимость обучения без учителя для мониторинга и управления промышленными анаэробными реакторами в реальном времени.

2.3. Неконтролируемая кластеризация

Для выявления скрытых эксплуатационных режимов в процессе анаэробного сбраживания были применены три метода неконтролируемой кластеризации: K-Means, DBSCAN и гауссовы смесевые модели (GMM). Кластеризация K-Means была сначала оценена при варьировании количества кластеров и анализе кривой внутрикластерной инерции (рисунок 3). Критерий «локтя» показал выраженный излом при $k = 3$, что также подтвердилось максимальным средним коэффициентом силуэта = 0,43. Такое разбиение дало три компактные и хорошо разделённые группы, соответствующие различным состояниям процесса.

Дополнительно применялся DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) для исследования плотностной структуры набора данных. Анализ чувствительности параметров показал, что порог $\varepsilon \approx 0,6$ является оптимальным, исходя из графика k-расстояний (рисунок 5). При этом значении DBSCAN объединил большинство наблюдений в один основной кластер и выделил подмножество точек, преимущественно из ацидогенного режима, как шум. Этот результат показывает, что DBSCAN более подходит для обнаружения аномалий, чем для полной классификации режимов (рисунок 2).

Наконец, были протестированы гауссовы смесевые модели (GMM), чтобы учесть возможное перекрытие распределений в пространстве данных. GMM сошлась к тому же трёхмодовому решению, что и K-Means, подтверждая устойчивость трёхкластерной структуры. В совокупности комбинация разбиений по признакам, плотностных и вероятностных подходов подтвердила существование трёх интерпретируемых режимов: стабильная работа, начальный дисбаланс и ацидогенный стресс.

Результаты и обсуждение. Очищенный набор данных содержал 741 наблюдение, выровненное по дням, с пятнадцатью z-стандартизованными переменными, представляющими концентрации летучих жирных кислот, состав биогаза и эксплуатационные параметры. Анализ главных компонент показал, что первые пять компонент объясняют 95,6 % дисперсии, что подтверждает сохранение основной структуры данных в сокращённом пространстве и обеспечивает интерпретируемую визуализацию результатов кластеризации.

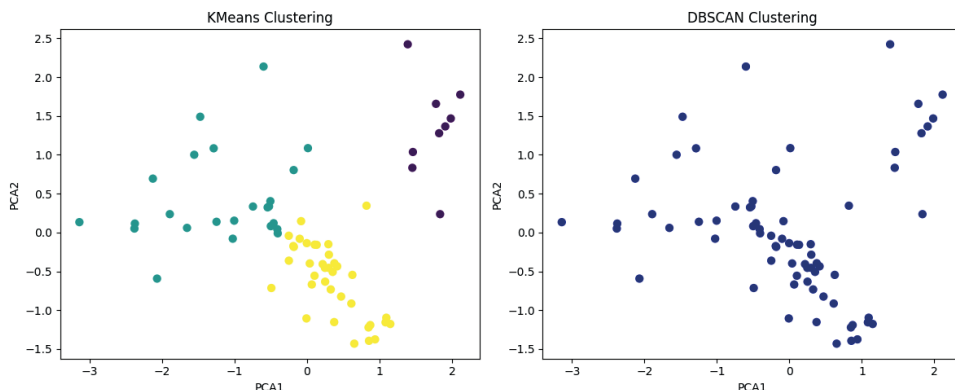


Рисунок 3 - Сравнение результатов кластеризации на основе PCA: метод K-Means выделяет три компактных режима, тогда как DBSCAN объединяет большинство точек в один кластер, пометая некоторые аномалии как шум.

На рисунке 3 представлено сравнение методов кластеризации K-Means и DBSCAN, применённых к данным, преобразованным методом анализа главных компонент (PCA). Алгоритм K-Means сформировал три компактных и хорошо разделённых кластера, соответствующих различным эксплуатационным состояниям. В противоположность этому, алгоритм DBSCAN при выбранном параметре ϵ объединил большинство точек в один плотный кластер и пометил лишь часть выборок как шум. Такое поведение показывает, что кластеризация, основанная на центроидах (K-Means), более подходит для классификации режимов, тогда как плотностная кластеризация (DBSCAN) эффективнее работает как инструмент обнаружения аномалий.

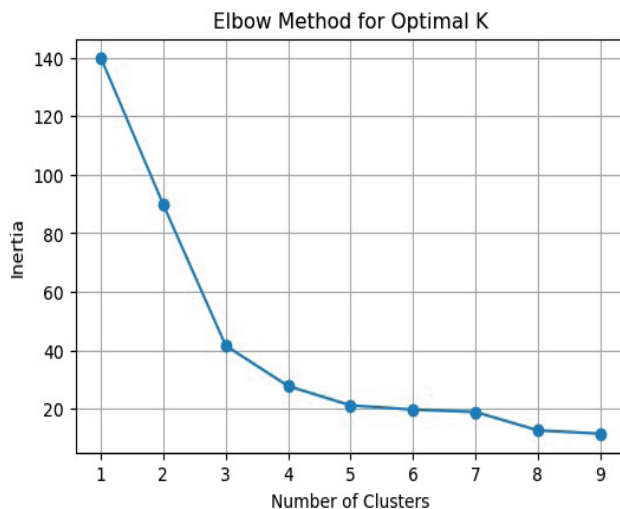


Рисунок 4 - Кривая метода «локтя» для определения оптимального числа кластеров ($k = 3$ выбрано как наилучший баланс).

Надёжность решения, полученного методом K-Means, подтверждается результатами метода «локтя», представленными на рисунке 4. Наблюдалось резкое снижение инерции до значения $k = 3$, после чего кривая выравнивалась. Этот «локоть» совпадает с максимальным коэффициентом силуэта 0,43, что подтверждает оптимальность трёхкластерного решения. Гауссовы смесевые модели независимо сошлись к трёхмодальному распределению, что дополнительно укрепляет данный вывод.

Анализ исходных технологических переменных позволили интерпретировать три выделенных режима. Первый кластер отражал стабильный метаногенез, при котором концентрация метана составляла около 66 об.% и суммарное содержание ЛЖК было ниже 0,5 г/л. Второй кластер соответствовал начальному дисбалансу, характеризующемуся концентрацией метана около 60 об.%, уровнем ЛЖК в пределах 0,5–1,0 г/л и соотношением пропионовой к уксусной кислоте выше 0,2. Третий кластер представлял ацидогенный стресс, для которого характерны ΣЛЖК свыше 1 г/л и содержание метана ниже 55 об.%.

Непараметрический критерий Крускала–Уоллиса подтвердил наличие статистически значимых различий между кластерами по показателям метана, диоксида углерода и ЛЖК ($p < 0,01$). Обобщённые значения η^2 варьировали от 0,34 до 0,54, что соответствует эффектам средней и высокой величины.

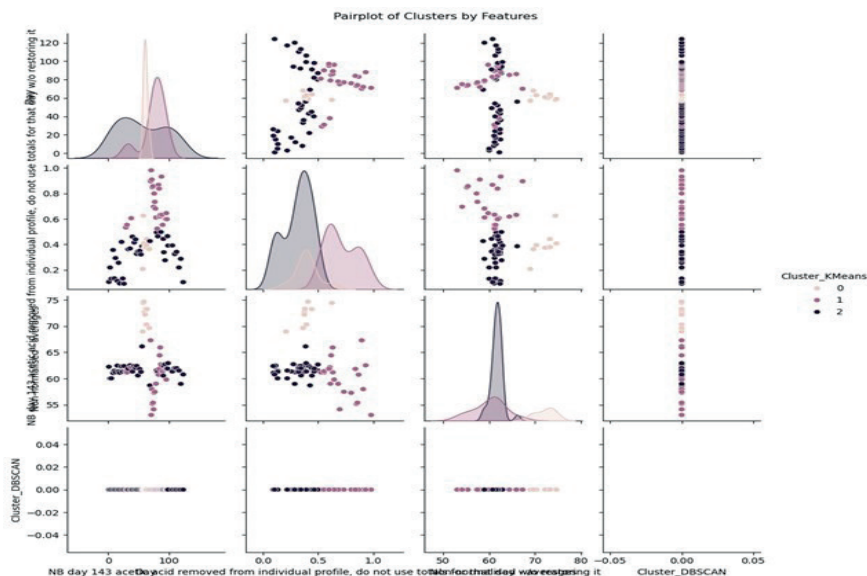


Рисунок 5 - Парный график распределений признаков по кластерам, показывающий различия и разделение между исходными и производными технологическими переменными для кластеров, полученных методом K-Means.

Рисунок 5 (парный график признаков) иллюстрирует разделение выделенных режимов в пространстве исходных переменных. Он показывает, что концентрация метана, суммарное содержание ЛЖК и составной индекс нестабильности являются наиболее информативными признаками, определяющими различие между режимами. Несмотря на высокую наглядность, большой размер данного графика предполагает его размещение в дополнительном материале, тогда как в основном тексте можно сослаться лишь на его ключевые результаты.

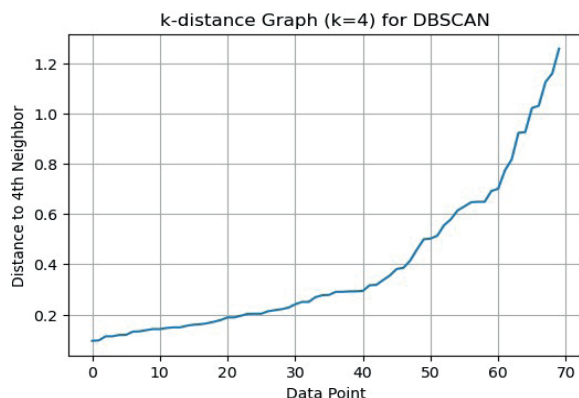


Рисунок 6 - График k-расстояний для DBSCAN ($k = 4$), указывающий $\epsilon \approx 0,6$ как оптимальный порог для обнаружения аномалий.

Поведение алгоритма DBSCAN было дополнительно исследовано с использованием графика k-расстояний, представленного на рисунке 6, который показал оптимальное значение порога ϵ около 0,6. При этом значении DBSCAN сгруппировал большинство наблюдений в один кластер, в основном соответствующий стабильному режиму, при этом выявив восемнадцать выбросов, преимущественно связанных с состоянием ацидогенного стресса. Этот результат подтверждает полезность модели для обнаружения аномалий, а не для систематической классификации режимов.

Наконец, сопоставление меток кластеров с временной шкалой эксплуатации показало, что переходы от стабильного к ацидогенному режиму совпадали с резкими увеличениями органической нагрузки, зарегистрированными операторами установки. Такое совпадение подтверждает интерпретируемость результатов кластеризации: модель обучения без учителя не только выявила закономерности, ранее распознаваемые экспертами, но и показала потенциал в качестве автоматизированной системы раннего предупреждения. На практике присвоение новых наблюдений ацидогенному кластеру в режиме реального времени позволит операторам заблаговременно принимать корректирующие меры — например, регулировать скорость подачи субстрата или щёлочность — прежде чем произойдёт снижение качества биогаза.

Несмотря на обнадеживающие результаты, исследование имеет определённые ограничения. Оно охватывало период 127 дней и восемь реакторов, что привело к относительно невысоким значениям коэффициента силуэта ($< 0,5$) и частичному перекрытию кластеров. Включение дополнительных показателей, таких как щелочность, аммиак или окислительно-восстановительный потенциал, а также расширение периода наблюдения и тестирование альтернативных методов кластеризации (например, fuzzy C-means или скрытых марковских моделей) могли бы повысить чёткость границ между режимами и точнее отразить переходные состояния.

Тем не менее, полученные результаты убедительно демонстрируют, что методы обучения без учителя, особенно кластеризация, основанная на центроидах, способны выявлять значимые эксплуатационные режимы в промышленных анаэробных реакторах и могут служить основой для прогностического мониторинга и поддержки принятия решений.

Заключение. Данное исследование показывает, что методы обучения без учителя, в частности кластерный анализ, могут эффективно выявлять повторяющиеся эксплуатационные режимы в полноразмерных анаэробных реакторах на основе многомерных технологических данных. Анализ концентраций летучих жирных кислот, состава биогаза и ключевых эксплуатационных параметров позволил выделить три различных режима — стабильный, переходный и ингибированный, — которые тесно коррелируют с эксплуатационными событиями, такими как резкие повышения органической

нагрузки. Это подтверждает пригодность методов кластеризации в качестве инструмента раннего предупреждения и поддержки принятия решений для операторов установок.

С практической точки зрения полученные результаты демонстрируют, что идентификация режимов на основе данных помогает операторам предвидеть развитие нестабильности до снижения выхода метана, что позволяет своевременно предпринимать корректирующие действия, повышающие стабильность процесса, качество биогаза и общую эффективность работы установки. Внедрение таких инструментов в системы мониторинга может снизить эксплуатационные риски, уменьшить экономические потери и способствовать более надёжному производству возобновляемой энергии.

Тем не менее, анализ имел определённые ограничения, связанные с относительно коротким периодом наблюдений (127 дней), ограниченным числом реакторов и отсутствием дополнительных физико-химических параметров, таких как щелочность, аммиак или окислительно-восстановительный потенциал. Эти факторы могли повлиять на чёткость границ кластеров и ограничить возможность обобщения результатов на более широкий диапазон условий эксплуатации.

В дальнейшем исследовании должны быть направлены на расширение периода наблюдений, включение более разнообразных установок и интеграцию более широких наборов сенсорных данных, а также на изучение гибридных подходов, сочетающих механистические знания с адаптивностью методов, основанных на данных. Развитие кластеризации в реальном времени и создание интуитивно понятных систем поддержки операторских решений станут ключевыми шагами для внедрения этих методов в промышленную практику и обеспечения стабильных, эффективных и устойчивых систем производства биогаза.

References

- Zhu X., Blanco E., Bhatti M., Borrión A. (2025) Improving anaerobic digestion process against acetate accumulation: insights into organic loading rates and nano magnetite additions. *Chemical Engineering Journal*. — Vol. 512. — P. 162641. DOI: 10.1016/j.ccej.2025.162641 (In English).
- Meola A., Wolf K., Weinrich S. (2025) Meta-tuning and fast optimization of machine learning models for dynamic methane prediction in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. — Vol. 432. — P. 132654. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132654 (In English).
- Rutland H., You J., Liu H., Bowman K. (2025) Application of machine learning for FOS/TAC soft sensing in bio-electrochemical anaerobic digestion. *Molecules*. — Vol. 30. — P. 1092. DOI: 10.3390/molecules30051092 (In English).
- Zhu X., Blanco E., Bhatti M., Borrión A. (2025) Promoting methanogenesis and stability in anaerobic digestion with nano magnetite under VFA-induced stress. *Biofuel Research Journal*. — Vol. 12. — P. 2432–2450. DOI: 10.18331/BRJ2025.12.2.5 (In English).
- Obileke K., Makaka G., Tangwe S., Mukumba P. (2024) Improvement of biogas yields in an anaerobic digestion process via optimization technique. *Environmental Development and Sustainability*. — Vol. 27. — P. 15025–15051. DOI: 10.1007/s10668-024-04540-6 (In English).
- Ali M., Pena C.B., De Vrieze J. (2025) Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste: staging and carriers enhance system performance and process stability (In English).

Tasmurzayev N., Amangeldy B., Baigarayeva Z., Mansurova M., Resnik B., Amirkhanova G. (2022) Improvement of HVAC system using the intelligent control system, 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON). DOI: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830375 (In English).

Simeonov I., Chorukova E., Kabaivanova L. (2025) Two-stage anaerobic digestion for green energy production: a review. *Processes*. — Vol. 13. — P. 294. DOI: 10.3390/pr13020294 (In English).

Sidi Habib S., Torri S., Mol S.K. (2024) New methodologies for the optimization of operational parameters of bio gas power plants: a review. *Journal of Renewable Energy and Environment*. — Vol. 11. DOI: 10.30501/jree.2024.444163.1840 (In English).

Long F., Xu M., Liao W., Liu H. (2025) Machine learning for predicting and optimizing the performance of a commercial-scale anaerobic digester with diverse feedstocks and operating conditions. *Bioresource Technology*. — Vol. 435. — P. 132940. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132940 (In English).

Jia R., Song Y.-C., An Z., Kim K., Lee C.-Y., Bae B.-U. (2023) A new comprehensive indicator for monitoring anaerobic digestion: a principal component analysis approach. *Processes*. — Vol. 12. — P. 59. DOI: 10.3390/pr12010059 (In English).

Beschkov V.N., Angelov I.K. (2025) Volatile fatty acid production vs. methane and hydrogen in anaerobic digestion. *Fermentation*. — Vol. 11. — P. 172. DOI: 10.3390/fermentation11040172 (In English).

Lee J.-H., Lee J.-H., Kim S.-Y., Yoon Y.-M. (2023) Effect of addition of zero-valent iron (Fe) and magnetite (Fe₃O₄) on methane yield and microbial consortium in anaerobic digestion of food wastewater. *Processes*. — Vol. 11. — P. 759. DOI: 10.3390/pr11030759 (In English).

Amangeldy B., Tasmurzayev N., Mansurova M., Imanbek B., Sarsembayeva T. (2023) Design and development of IoT based medical cleanroom. *Communications in Computer and Information Science*. — Vol. 1864. DOI: 10.1007/978-3-031-41774-0_36 (In English).

Tongco J.V., Jannat M.A.H., Kim S., Park S., Hwang S. (2025) Process performance and biogas output: impact of fluctuating acetate concentrations on methanogenesis in horizontal anaerobic reactors. *Energies*. — Vol. 18. — P. 3120. DOI: 10.3390/en18123120 (In English).

Almansa X.F., Starostka R., Raskin L., Zeeman G., De Los Reyes F., Waechter J., Yeh D., Radu T. (2023) Anaerobic digestion as a core technology in addressing the global sanitation crisis: challenges and opportunities. *Environmental Science & Technology*. — Vol. 57. — P. 19078–19087. DOI: 10.1021/acs.est.3c05291 (In English).

Sappl J., Harders M., Rauch W. (2023) Machine learning for quantile regression of biogas production rates in anaerobic digesters. *Science of the Total Environment*. — Vol. 872. — P. 161923. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161923 (In English).

Dekhici B., Short M. (2025) Data-driven modelling of biogas production using multi-task Gaussian processes. *Systems and Control Transactions*. — P. 26–32 (In English).

Amangeldy B., Tasmurzayev N., Shinassylov S., Mukhanbet A., Nurakhov Y. (2024) Integrating machine learning with intelligent control systems for flow rate forecasting in oil well operations. *Automation*. — Vol. 5. DOI: 10.3390/automation5030021 (In English).

Moradvandi A., Heegstra S., Ceron-Chafra P., Schutter B.D., Abraham E., Lindeboom R.E.F. (2025) Model predictive control of feed rate for stabilizing and enhancing biogas production in anaerobic digestion under meteorological fluctuations. *Journal of Process Control*. — Vol. 147. — P. 103375. DOI: 10.1016/j.jprocont.2025.103375 (In English).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The Central Asian Academic Research Center LLP follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайтах:

www.nauka-nanrk.kz

<http://physics-mathematics.kz/index.php/en/archive>

ISSN2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Ответственный редактор *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Т. Апендиев*

Верстка на компьютере: *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 22.12.2025.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная.

Печать –ризограф. 20,0 п.л. Заказ 4.