

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

**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE**

**№1
2026**

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



CENTRAL ASIAN ACADEMIC
RESEARCH CENTER



**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF COMPUTER
SCIENCE**

1 (357)

JANUARY – MARCH 2026

**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, (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, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

WOICIK 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>

USATOVA Olga Alexandrovna, PhD, Associate Professor, Chief Scientific Secretary of the Institute of Information and Computing Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

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/>

© «Central Asian Academic Research Center» LLP, 2026

БАС РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

КАЛИМОЛДАЕВ Мақсат 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 Жұмаділ 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>

УСАТОВА Ольга Александровна, PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҒЖБМ "Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының" бас ғалым хатшысы (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

КАПАЛОВА Нұрсұлу Алдажарқызы, 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, 2026

Главный редактор:

МУТАНОВ Галимканр Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/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 Сагпаева (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛАРЖ Анджей, доцент факультета электроники Люблинского политехнического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/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/author/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/author/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

УСАТОВА Ольга Александровна, PhD, ассоциированный профессор, Главный ученый секретарь «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

КАПАЛОВА Нурсулу Алдажаровна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кибербезопасности РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/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/author/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 переучет периодического печатного издания, информационного агентства и сетевого издания № **KZ77VRY00121154**. 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», 2026

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE

Akhmetova S.T., Yunussova A.A., Alisheva S.S., Olzhataeva B.T., Mussirepova E.B. Social network data mining for automated offensive language detection.....	13
Amanov A.N., Kazbekova G.N., Zhunissov N.M., Abibullayeva A.A., Aben A.B. Artificial intelligence-based intrusion detection for DDOS attacks in Software Defined Networking.....	30
Amanzholova S.T., Ussatova O.A., Mutanov G.M., Mukhanov S.B., Aitmukash D. Backend architecture of a hybrid blockchain-based academic credential verification system.....	52
Amirkhanova G.A., Nurgazy T.N., Amirkhanov B.S., Tokhtassyn M.M., Nurgazy N.N. Developing a predictive digital twin for a food product based on Edge ML and IoT sensors.....	73
Bekarystankyzy A., Ussen D., Kassenkhan A., Chinibayev Y. Cold-start in educational recommender systems: classical and LLM-Era strategies.....	91
Bimoldina Zh., Mussiraliyeva Sh., Bagitova K., Terekovska L. Detection of cyber-propaganda content using machine learning and semantic models....	106
Chezhimbayeva K.S. Forecasting key 5G network KPIs using MLP and LSTM neural network models.....	129
Dauitbayeva A.O., Konyrbaev N.B., Abildayeva Zh.T., Yessirkepova A.U., Karim N.A. Development of an application to optimize the process of employment of graduates.....	148
Dzhsupbekova G., Othman M., Ordabayeva G. Comparative analysis of artificial intelligence algorithms to detect network attacks.....	167
Issakhov A., Orazmoldayev N., Zharkynbek Y., Abylkassymova A. Numerical modeling of the spread of viral infection by airborne droplets in confined spaces.....	182
Kantureeva M., Omarova G.S., Duisen Z.D., Shekerbek A.A., Tulebayev Y.B. Application of machine learning methods in forecasting and optimizing the processes of evacuation of people in high-rise buildings.....	202
Khusain B., Telmanov M., Khusain A.B., Brodskiy A.R., Sass A.S. Digital twin of an integrated emission purification and decarbonization system for thermal units.....	218
Kulakayeva A., Ashurov A., Zhumazhanov B., Daineko Ye., Zylgara A. Algorithm for determining the initial orbital parameters of KazeEOSat-1 for deorbiting.....	236

Mimenbayeva A.B., Turebayeva R.D., Ospanova T.T., Aruova A.B., Naizagarayeva A.A. Development and comparative analysis of machine learning models for urban traffic prediction.....	253
Naumenko V.V., Mukanova Zh.A., Kiseleva O.V., Maintser D.A., Nerezov A.K. The use of real-time polling to improve student academic performance.....	271
Nazyrova A.E., Kaderkeyeva Z.K., Bekmanova G.T., Milosz M., Lamasheva Zh. Transformation of education through digital technologies: advancing student academic performance across learning stages.....	287
Oralbekova D., Mamyrbayev O., Akhmediyarova A., Kassymova D., Alibiyeva Z. Development of a multi-level model for text summarization based on pretrained models.....	316
Orazbayev B.B., Zhumadillayeva A.K., Kurbangalieva N.B., Yessirkessinov R.Zh., Orazbayeva K.N. Synthesis of linguistic models for assessing sulfur quality and fuzzy modeling of the sulfur production process.....	337
Sarsenbayeva A.K., Rakhimova D.R., Shormakova A.N., Mansurova M.E., Adali E. Application of semantic methods in the field of legislation: an intellectual system for analysis of agglutinative texts.....	354
Serek A., Shoiynbek A., Sharipov K., Kuanyshbay D., Mukhametzhano A. Analysis and classification of telephone fraud based on lexical features of speech transcriptions.....	373
Shynzhigit B.B., Balabekova M.O., Amangeldy T.T. Analysis and forecasting of brick product sales using machine learning models.....	393
Tokhayeva A.O., Alzhanov A.K., Nezh Önal, Ziyatbekova G.Z., Begalieva K.B. Formation of students virtualization competencies in higher education based on Proxmox VE.....	412
Tukenova L.M., Auyelbekov O.A., Sapakova S.Z., Sametova A.A., Bostanov E.L. Modelling and optimisation of hybrid power plant operating modes for unmanned aerial vehicles.....	430
Yerimbetova A., Berzhanova U., Daiyrbayeva E., Sakenov B., Sambetbayeva M. Sign language recognition using temporal convolutional network and MediaPipe.....	443
Zhukabayeva T.K., Benkhelifa E., Mardenov Y.M., Baumuratova D., Karabayev N. Decision support for responding to attacks in cyber-physical industrial internet-of-things systems.....	461

МАЗМҰНЫ

ИНФОРМАТИКА

Ахметова С.Т., Юнусова А.А., Алишева С.С., Олжатаева Б.Т., Мүсірепова Э.Б. Әлеуметтік желідегі бейәдеп пікірлерді автоматты анықтауда деректерді интеллектуалды талдау.....	13
Аманов А.Н., Казбекова Г.Н., Жунисов Н.М., Абибуллаева А.А., Абен А.Б. Бағдарламалық жасақтамамен анықталған желідегі DDOS шабуылдары үшін жасанды интеллектке негізделген шабуылдарды анықтау.....	30
Аманжолова С.Т., Усатова О.А., Мутанов Г.М., Муханов С.Б., Айтмукаш Д. Гибридтік блокчейнге негізделген академиялық сенімдік деректерді тексеру жүйесінің бекендік архитектурасы.....	52
Амирханова Г.А., Нұрғазы Т.Н., Амирханов Б.С., Нұрғазы Н. Н. EDGE ML және IOT сенсорлары негізінде азық-түлік өнімінің предиктивті цифрлық егізін әзірлеу.....	73
Бекарыстанқызы А., Үсен Д., Қасенхан А., Чинибаев Е. Білім беру саласындағы ұсынымдық жүйелеріндегі «Cold-start» мәселесі: классикалық әдістер және LLM дәуірінің стратегиялары.....	91
Бимолдина Ж.А., Мусиралиева Ш.Ж., Багитова К.Б., Терейковская Л.З Кибернасихаттық контентті анықтау үшін машиналық оқыту және семантикалық модельдер қолдану.....	106
Чечимбаева К.С. MLP және LSTM нейрондық желі модельдерін қолдана отырып, 5G желісінің негізгі KPI-лерін болжау.....	129
Дәуітбаева А.О., Қоңырбаев Н.Б., Әбілдаева Ж.Т., Есіркепова А.У., Кәрім Н.Ә. Бітіруші түлектердің жұмысқа орналастыру процесін оңтайландыру үшін қосымша әзірлеу.....	148
Джусупбекова Г., Othman M., Ордабаева Г. Жасанды интеллект алгоритмдерін желілік шабуылдарды анықтау үшін салыстырмалы талдау.....	167
Исахов А.А., Оразмолдаев Н., Жаркынбек Е., Абылкасымова А. Ауа тамшылары арқылы вирустық инфекцияның шектеулі кеңістікте таралуын сандық модельдеу.....	182
Қантурсева М.А., Омарова Г.С., Дүйсен Ж.Д., Шекербек А.Ә., Түлебаев Е.Б. Биік ғимараттардағы адамдарды эвакуациялау процестерін болжау және оңтайландыруда машиналық оқыту әдістерін қолдану.....	202

Хусаин Б., Тельманов М.М., Хусаин А.Б., Бродский А.Р., Сасс А.С. Жылу қондырғыларының шығарындыларын кешенді тазалау және декарбонизациялау жүйесінің цифрлық егізі.....	218
Кулакаева А.Е., Ашуров А.Е., Жумажанов Б.Р., Дайнеко Е.А., Зылғара А.Е. КАZEOSAT-1 ғарыш аппаратының деорбитациясын жүзеге асыру үшін бастапқы орбиталық параметрлерін анықтау алгоритмі.....	236
Мименбаева А.Б., Туребаева А.Д., Оспанова Т.Т., Аруова А.Б., Найзағарасва А.А. Қалалық көлік ағынын болжауға арналған машиналық оқыту модельдерін әзірлеу және салыстырмалы талдау.....	253
Науменко В.В., Муканова Ж.А., Киселева О.В., Майнцер Д.А., Нерезов А.К. Білім алушылардың үлгерімін арттыру үшін real-time сауалнамаларын қолдану.....	271
Назырова А.Е., Кадеркеева З.К., Бекманова Г.Т., Милош М., Ламашева Ж.Б. Цифрлық білім және студенттердің академиялық жетістіктері: деңгейлер бойынша білім беруді дамыту.....	287
Оралбекова Д., Мамырбаев О., Ахмедиярова А., Қасымова Д.З, Алибиева Ж., Алдын ала оқытылған модельдер негізінде мәтінді резюмелеуге арналған көпдеңгейлі модельді әзірлеу.....	316
Оразбаев Б.Б., Жумадиллаева А.К., Курбанғалиева Н.Б., Оразбаева К.Н. Күкірт сапасын бағалаудың лингвистикалық модельдерін синтездеу және күкіртті өндіру процесін бұлыңғыр модельдеу.....	337
Сарсенбаева А.К., Рахимова Д.Р., Шормакова А.Н., Мансурова М.Е., Адали Э. Семантикалық әдістерді заңнама саласында қолдану: агглютинативті мәтіндерді талдауға арналған интеллектуалды жүйе.....	354
Серек А., Шойынбек А., Шарипов К., Қуанышбай Д., Мухаметжанов А. Сөйлеу транскрипцияларының лексикалық белгілеріне негізделген телефон алаяқтықтарын талдау және жіктеу.....	373
Шынжігіт Б.Б., Балабекова М.О., Амангелді Т.Т. Кірпіш өнімдерін сату көлемдерін машиналық оқытуда талдау және болжамдау.....	393
Тохаева А.О., Альжанов А.К., Nezir Ö., Зиятбекова Г.З., Бегалиева К.Б. PROXMOX VE негізінде жоғары оқу орындарында білім алушыларды виртуалдандыру құзыреттерін қалыптастыру.....	412

Төкенова Л.М., Әуелбеков О.А., Сапақова С., Саметова А.А., Бостанов Е.Л.
Пилотсыз ұшу аппараттарына арналған гибриді электр станцияларының жұмыс режимдерін модельдеу және оңтайландыру.....430

Еримбетова А.С., Бержанова У.Г., Дайырбаева Э.Н., Сәкенов Б.Е., Самбетбаева М.А.
Уақытша конволюциялық желі мен media pipe көмегімен ым тілін тану.....443

Жукабаева Т.К., Бенхелифа Э., Марденов Е.М., Баумуратова Д., Карабаев Н.
Киберфизикалық өнеркәсіптік интернет заттары жүйелеріндегі шабуылдарға әрекет ету кезінде шешім қабылдауды қолдау.....461

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА

Ахметова С.Т., Юнусова А.А., Алишева С.С., Олжатаева Б.Т., Мүсірепова Э.Б. Интеллектуальный анализ данных для автоматического выявления языка ненависти в социальных сетях.....	13
Аманов А.Н., Казбекова Г.Н., Жунисов Н.М., Абибуллаева А.А., Абен А.Б. Обнаружение вторжений на основе искусственного интеллекта для DDoS-атак в программно-определяемых сетях.....	30
Аманжолова С.Т., Усатова О.А., Мутанов Г.М., Муханов С.Б., Айтмукаш Д. Бэкенд-архитектура гибридной системы проверки академических достижений на основе блокчейна.....	52
Амирханова Г.А., Нургазы Т.Н., Амирханов Б.С., Нургазы Н.Н. Разработка предиктивного цифрового двойника пищевого продукта на основе Edge ML и IoT-сенсоров.....	73
Бекарыстанқызы А., Үсен Д., Қасенхан А., Чинибаев Е. Холодный старт в системах рекомендаций в области образования: классические подходы и стратегии эпохи LLM.....	91
Бимолдина Ж.А., Мусиралиева Ш.Ж., Багитова К.Б., Терейковская Л. Использование машинного обучения и семантических моделей для обнаружения киберпропагандистского контента.....	106
Чечимбаева К.С. Прогнозирование ключевых KPI сетей 5G на основе нейросетевых моделей MLP и LSTM.....	129
Даутбаева А.О., Конырбаев Н.Б., Абильдаева Ж.Т., Есиркепова А.У., Карим Н.А. Разработка приложения для оптимизации процесса трудоустройства выпускников.....	148
Джусупбекова Г., Othman M., Ордабаева Г. Сравнительный анализ алгоритмов искусственного интеллекта для обнаружения сетевых атак.....	167
Исахов А.А., Оразмолдаев Н., Жаркынбек Е., Абылкасымова А. Численное моделирование распространения вирусной инфекции воздушно-капельным путём в замкнутых помещениях.....	182

Кантуреева М.А., Омарова Г.С., Дүйсен Ж.Д., Шекербек А.Ә., Тулебаев Е.Б. Использование методов машинного обучения для прогнозирования и оптимизации процессов эвакуации людей в высотных зданиях.....	202
Хусаин Б., Тельманов М.М., Хусаин А.Б., Бродский А.Р., Сасс А.С. Цифровой двойник комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок.....	218
Кулакаева А.Е., Ашуров А.Е., Жумажанов Б.Р., Дайнеко Е.А., Зылгара А.Е. Алгоритм определения начальных орбитальных параметров KazEOSat-1 для деорбитации.....	236
Мименбаева А.Б., Туребаева А.Д., Оспанова Т.Т., Аруова А.Б., Найзагараева А.А. Разработка и сравнительный анализ моделей машинного обучения для прогнозирования городского трафика.....	253
Науменко В.В., Муканова Ж.А., Киселёва О.В., Майнцер Д.А., Нерезов А.К. Применение опросов в режиме реального времени для повышения успеваемости обучающихся.....	271
Назырова А.Е., Кадеркеева З.К., Бекманова Г.Т., Милош М., Ламашева Ж.Б. Цифровое образование и академическая успеваемость учащихся: межуровневый анализ.....	287
Оралбекова Д., Мамырбаев О., Ахмедиярова А., Касымова Д., Алибиева Ж. Разработка многоуровневой модели для абстрактивного резюмирования текста на основе предварительно обученных моделей.....	316
Оразбаев Б.Б., Жумадиллаева А.К., Курбангалиева Н.Б., Есиркесинов Р.Ж., Оразбаева К.Н. Синтез лингвистических моделей оценки качества серы и нечёткое моделирование процесса её производства.....	337
Сарсенбаева А.К., Рахимова Д.Р., Шормакова А.Н., Мансурова М.Е., Адали Э. Применение семантических методов в юридическом анализе: интеллектуальная система для обработки агглютинативных текстов.....	354
Серек А., Шойынбек А., Шарипов К., Куанышбай Д., Мухаметжанов А. Анализ и классификация телефонного мошенничества на основе лексических признаков речевых транскрипций.....	373
Шынжігіт Б.Б., Балабекова М.О., Амангелді Т.Т. Анализ и прогнозирование объёмов продаж кирпичной продукции с использованием машинного обучения.....	393

Тохаева А.О., Альжанов А.К., Neziĥ Ö., Зиятбекова Г.З., Бегалиева К.Б.
Формирование компетенций в области виртуализации у обучающихся
в высшем образовании на основе платформы Proxmox VE.....412

Тукенова Л.М., Ауелбеков О.А., Сапакова С.З., Саметова А.А., Бостанов Е.Л.
Моделирование и оптимизация режимов работы гибридных силовых установок
для беспилотных летательных аппаратов.....430

**Еримбетова А.С., Бержанова У.Г., Дайырбаева Э.Н., Сакенов Б.Е.,
Самбетбаева М.А.**
Распознавание языка жестов с использованием временных свёрточных
сетей и MediaPipe4.....43

Жукабаева Т.К., Бенхелифа Э., Марденов Е.М., Баумуратова Д., Карабаев Н.
Поддержка принятия решений при реагировании на атаки в киберфизических
промышленных системах интернета вещей.....461

ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE
ISSN 1991-346X
Volume 1.
Number 357 (2026). 218–235

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1726.410>

IRSTI 87.53.13; 20.53.00; 44.31.29;
UDC 004.94:66.074.3:662.613

© **Khusain B., Telmanov M.***, **Khusain A.B., Brodskiy A.R.,
Sass A.S., 2026.**

«D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry» JSC,
Almaty, Kazakhstan;
E-mail: merlan01tel@gmail.com

DIGITAL TWIN OF AN INTEGRATED EMISSION PURIFICATION AND DECARBONIZATION SYSTEM FOR THERMAL UNITS

Khusain Bolatbek — Candidate of technical sciences, professor of NAS RK, «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: b.khusain@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9588-1012>;

Telmanov Merlan — Master, «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: merlan01tel@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9193-8414>;

Khusain Atabek — Master, «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: atabek.khussain@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0899-6872>;

Brodskiy Aleksandr — Candidate of chemical sciences, associate professor, «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: albrod@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6216-4738>;

Sass Aleksandr — Candidate of chemical sciences, «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: alex-sass@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>.

Abstract. This paper considers a digital twin of an integrated emission purification and decarbonization system for thermal power units operating on fossil fuels. The proposed approach is based on representing a multi-module gas purification system as a virtual engineering model describing the structure of the physical system, the functional relationships between modules, and their main operating modes. Such a model makes it possible to reproduce the behavior of a real technological system in a digital environment and to use it for analysis, optimization, and prediction of technological processes. Digital twin technology relies on modern digital modeling tools that allow the operation of complex industrial systems to be studied at different stages of design and operation. The digital twin concept is based on contemporary scientific approaches to the development of digital models

of industrial systems (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018; ISO, 2021) and takes into account the technological features of flue gas purification and carbon dioxide capture processes (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011). The developed model describes an integrated structure of the gas purification system that combines the main technological elements. In particular, the system includes an electrostatic filtration module for removing particulate matter, a catalytic module for neutralizing harmful gaseous components, and a decarbonization module designed for carbon dioxide capture. The results of the study show that the use of a digital twin allows the interaction of individual modules to be analyzed, the system layout to be optimized, and the selection of technological parameters to be justified at the design stage. In addition, the digital model can be applied for simulation of technological processes, evaluation of system performance, and prediction of emission reduction indicators. The model also enables the analysis of different operating modes, assessment of system stability, and improvement of control algorithms. The practical significance of the proposed approach is confirmed by experimental and modeling studies reported in previously published works of the authors and other researchers (Khusain et al., 2018; Khussain et al., 2020; Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024; Khusain et al., 2024). The obtained results demonstrate the effectiveness of digital twins as tools for engineering analysis, technological optimization, and decision support in the development and implementation of integrated emission purification systems.

Keywords: digital twin, integrated purification system, decarbonization, gas purification, thermal power plants, CO₂ capture, process modeling

Financing. *This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the project AP23488040 'Digital twin of the decarbonization process based on a system for capturing and utilizing carbon oxides from flue emissions of fossil fuel-fired thermal devices,' in accordance with contract No. 222/GF24-26 dated September 9, 2024.*

For citations: Khusain B., Telmanov M., Khusain A.B., Brodskiy A.R., Sass A.S. Digital twin of an integrated emission purification and decarbonization system for thermal units. Academic Scientific Journal of Computer Science, 2026. — No.1. — P. 218–235. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1726.410>

© Хусаин Б., Тельманов М.М.*, Хусаин А.Б., Бродский А.Р.,
Сасс А.С., 2026.

«Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия
институты» АҚ, Алматы, Қазақстан.
E-mail: merlan01tel@gmail.com

ЖЫЛУ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫН КЕШЕНДІ ТАЗАЛАУ ЖӘНЕ ДЕКАРБОНИЗАЦИЯЛАУ ЖҮЙЕСІНІҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІ

Хусаин Болатбек — т.ғ.к., ҚР ҰҒА профессоры «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: b.khusain@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9588-1012>;

Тельманов Мерлан — магистр, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: merlan01tel@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9193-8414>;

Хусаин Атабек — магистр, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: atabek.khussain@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0899-6872>;

Бродский Александр — х.ғ.к., қауымдастырылған профессор - «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: albrod@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6216-4738>;

Сасс Александр — х.ғ.к., «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: alex-sass@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>.

Аннотация. Бұл жұмыста қазба отынын пайдаланатын жылу энергетикалық қондырғыларынан бөлінетін зиянды шығарындыларды кешенді тазалау және декарбонизациялау жүйесінің цифрлық егізі қарастырылады. Ұсынылған тәсіл түтін газдарын тазалау және көмірқышқыл газын ұстау процестерін қамтитын мультимодульді газтазалау жүйесін виртуалды инженерлік модель түрінде көрсетуге негізделген. Мұндай модель физикалық жүйенің құрылымын, модульдер арасындағы функционалдық байланыстарды және негізгі жұмыс режимдерін сандық ортада бейнелеуге мүмкіндік береді. Цифрлық егіз технологиясы нақты өндірістік жүйенің жұмысын модельдеу, талдау және оңтайландыру үшін заманауи цифрлық құралдарды қолдануға негізделеді. Цифрлық егіз тұжырымдамасы өнеркәсіптік жүйелердің цифрлық модельдерін құруға арналған заманауи ғылыми тәсілдерге сүйенеді (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018; ISO, 2021) және түтін газдарын тазалау мен көмірқышқыл газын ұстау процестерінің технологиялық ерекшеліктерін ескереді (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011). Ұсынылған модель жүйенің негізгі технологиялық элементтерін біріктіретін интеграцияланған құрылымды сипаттайды. Атап айтқанда, жүйе құрамына қатты бөлшектерді жоюға арналған электрофилтър модулі, зиянды газдарды

бейтараптандыруға арналған каталитикалық модуль және көмірқышқыл газын ұстауға арналған декарбонизация модулі кіреді. Зерттеу нәтижелері цифрлық егізді қолдану жекелеген модульдердің өзара әсерін талдауға, жүйенің құрылымдық компоновкасын оңтайландыруға және технологиялық параметрлерді ғылыми негізде таңдауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Сонымен қатар цифрлық модель технологиялық процестерді имитациялық модельдеу, жүйенің тиімділігін бағалау және шығарындыларды азайту көрсеткіштерін болжау үшін қолданылуы мүмкін. Модель сонымен қатар әртүрлі жұмыс режимдерін талдауға, жүйенің тұрақтылығын бағалауға және басқару алгоритмдерін жетілдіруге мүмкіндік береді. Тәсілдің практикалық маңыздылығы эксперименттік және модельдік зерттеулер нәтижелерімен расталады (Khusain et al., 2018; Khussain et al., 2020; Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024; Khusain et al., 2024). Алынған нәтижелер цифрлық егіздерді инженерлік талдау, жүйені оңтайландыру және шешім қабылдауды қолдау құралы ретінде қолданудың тиімді екенін көрсетеді. Бұл тәсіл өнеркәсіптік экологиялық технологияларды жобалау мен дамытуда, сондай-ақ энергия және экология саласындағы инновациялық шешімдерді енгізуде маңызды рөл атқарады.

Түйінсөздер: цифрлық сынары, кешенді газарту жүйесі, көміртексіздендіру, газ тазарту, жылу қондырғылары, CO₂ - ні ұстау, процестерді модельдеу

© Хусаин Б., Тельманов М.М.*, Хусаин А.Б., Бродский А.Р.,
Сасс А.С., 2026.

АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского»,
Алматы, Казахстан.
E-mail: merlan01tel@gmail.com

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ И ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК

Хусаин Болатбек — кандидат технических наук, профессор НАН РК, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: b.khusain@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9588-1012>;

Тельманов Мерлан — магистр, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан, E-mail: merlan01tel@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9193-8414>;

Хусаин Атабек — магистр, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: atabek.khussain@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0899-6872>;

Бродский Александр — кандидат химических наук, ассоциированный профессор, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: albrod@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6216-4738>;

Сасс Александр — кандидат химических наук, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: alex-sass@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>.

Аннотация. В работе рассматривается цифровой двойник комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых энергетических установок, функционирующих на основе ископаемого топлива. Предлагаемый подход основан на представлении мультимодульной системы газоочистки в виде виртуальной инженерной модели, описывающей структуру физической системы, функциональные связи между её модулями и основные режимы работы. Такая модель позволяет воспроизводить поведение реальной технологической системы в цифровой среде и использовать её для анализа, оптимизации и прогнозирования технологических процессов. Концепция цифрового двойника опирается на современные научные подходы к созданию цифровых моделей промышленных систем (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018; ISO, 2021) и учитывает технологические особенности процессов очистки дымовых газов и улавливания диоксида углерода (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011). Разработанная модель описывает интегрированную структуру системы газоочистки, объединяющую ключевые технологические элементы: модуль электрофльтрации для удаления твёрдых частиц, каталитический модуль для нейтрализации вредных газовых компонентов и модуль декарбонизации для улавливания диоксида углерода. Результаты исследования показывают, что использование цифрового двойника позволяет анализировать взаимное влияние отдельных модулей системы, оптимизировать её конфигурацию и обосновывать выбор технологических параметров на этапе проектирования. Кроме того, цифровая модель может применяться для имитационного моделирования технологических процессов, оценки эффективности системы и прогнозирования показателей снижения выбросов. Модель также обеспечивает возможность анализа различных режимов работы системы, оценки её устойчивости и совершенствования алгоритмов управления. Практическая значимость предложенного подхода подтверждается результатами экспериментальных и модельных исследований, представленными в ранее опубликованных работах авторов и других исследователей (Khusain et al., 2018; Khussain et al., 2020; Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024). Полученные результаты демонстрируют эффективность использования цифровых двойников как инструмента инженерного анализа, оптимизации технологических процессов и поддержки принятия решений при разработке и внедрении комплексных систем очистки выбросов.

Ключевые слова: цифровой двойник; комплексная система очистки; декарбонизация; газоочистка; тепловые установки; улавливание CO₂; моделирование процессов

Работа выполнена при финансовой поддержке ГУ «Комитет науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан» по проекту AP23488040 «Цифровой двойник процесса декарбонизации на основе системы сбора и утилизации оксидов углерода дымовых выбросов тепловых

устройств, использующих ископаемое топливо» согласно договору № 222/ГФ24-26 от 09.09.2024 г.

Введение. Проблема снижения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов тепловыми установками остаётся одной из ключевых задач энергетики и промышленности. Основными компонентами дымовых газов являются твёрдые минеральные частицы, оксиды азота, диоксид серы, монооксид углерода и диоксид углерода, совокупное воздействие которых приводит к ухудшению качества атмосферного воздуха и усилению антропогенного воздействия на окружающую среду. Современные подходы к улавливанию и утилизации CO₂ рассматриваются как важный элемент стратегии декарбонизации энергетического сектора (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011).

Традиционные системы газоочистки, как правило, проектируются для удаления отдельных классов загрязняющих веществ и слабо, учитывают взаимосвязь между отдельными технологическими модулями. Это ограничивает возможности оптимизации компоновки оборудования и согласования режимов работы системы в целом. В последние годы всё большее внимание уделяется применению цифровых двойников как инструмента моделирования и анализа сложных инженерных систем (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018). Согласно международным стандартам, цифровой двойник представляет собой виртуальное представление физического объекта, связанное с ним на протяжении жизненного цикла и используемое для анализа, оптимизации и прогнозирования поведения системы (ISO, 2021).

Ранее авторами были выполнены исследования, посвящённые моделированию аэродинамики газовых потоков, процессам нейтрализации токсичных компонентов выбросов и разработке комплексных систем очистки дымовых газов (Khusain et al., 2018; Khussain et al., 2020; Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024). В более поздних работах был предложен подход к созданию цифровых двойников систем очистки с интеграцией модулей декарбонизации, ориентированный на задачи проектирования и визуализации технологических процессов (Khusain et al., 2024). Эти результаты создают основу для дальнейшего развития инженерных цифровых двойников комплексных систем очистки и улавливания CO₂.

Целью настоящей работы является разработка и описание концепции цифрового двойника комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок, ориентированной на инженерное сопровождение процессов проектирования и внедрения мультимодульных систем газоочистки.

Литературный обзор. В современной научной литературе цифровые двойники рассматриваются как один из ключевых инструментов цифровизации промышленности, обеспечивающий моделирование, анализ и оптимизацию сложных технологических систем. Согласно работам (Grieves and Vickers,

2017, Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018, Perno et al., 2021; Javaid et al., 2023) а также положениям стандарта (ISO, 2021), цифровой двойник представляет собой связанную с физическим объектом цифровую модель, позволяющую воспроизводить его структуру, состояние и режимы функционирования в виртуальной среде. Такой подход особенно актуален для многокомпонентных инженерных систем, где требуется учитывать взаимосвязь между отдельными модулями и изменяющимися технологическими параметрами.

Важное место в литературе занимают исследования, посвященные очистке дымовых газов и декарбонизации выбросов тепловых установок. В работах (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011) показано, что технологии улавливания CO₂ являются важным элементом снижения антропогенной углеродной нагрузки, особенно для энергетических объектов, работающих на ископаемом топливе. При этом эффективность улавливания углекислого газа напрямую зависит от предварительной подготовки газового потока, включая удаление твердых частиц и токсичных примесей. Это обосновывает необходимость комплексного рассмотрения электрофильтрационного, каталитического и декарбонизационного модулей как единой технологической системы.

Теоретической базой для описания процессов, протекающих в отдельных модулях системы, служат классические труды по химической инженерии, процессам массопереноса, теплотеплопереноса, каталитической кинетике и сорбции. Эти подходы позволяют формировать инженерно обоснованные математические модели, пригодные для цифрового воспроизведения работы системы в различных режимах. В контексте данной статьи это особенно важно, поскольку предлагаемый цифровой двойник описывает не отдельный аппарат, а мультимодульную структуру, включающую электрофильтрацию, каталитическую нейтрализацию и улавливание CO₂ (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999; Perry, Green, 2019).

В предыдущих наших работах были исследованы аэродинамика выбросов, свойства каталитических материалов, процессы предварительной очистки дымовых газов и подходы к созданию цифровых моделей экологических систем. Эти исследования послужили основой для разработки представленного в статье цифрового двойника комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов (Khusain et al., 2018; Khussain et al., 2020; Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024; Khussain et al., 2022; Khussain et al., 2024; Khussain et al., 2025).

Таким образом, анализ литературы показывает, что, несмотря на значительное число работ по цифровым двойникам и отдельным технологиям газоочистки и улавливания CO₂, вопрос создания единой цифровой модели комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов остается недостаточно раскрытым. Именно этот аспект составляет научную основу представленного исследования.

Материалы и методы

1. Комплексная система очистки и декарбонизации выбросов

Комплексная система очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок представляет собой мультимодульную технологическую структуру, предназначенную для последовательного удаления основных компонентов загрязняющих выбросов. В состав системы входят модули удаления твёрдых минеральных частиц, модули нейтрализации газообразных загрязнителей и модули улавливания диоксида углерода. Подобная компоновка позволяет обеспечить глубокую очистку дымовых газов и создать условия для последующей декарбонизации выбросов.

Процессы удаления твёрдых частиц и нейтрализации газообразных компонентов сопровождаются сложными аэродинамическими и физико-химическими явлениями, что требует учёта взаимного влияния отдельных модулей. Ранее авторами были показаны особенности прохождения газовых потоков в системах нейтрализации и влияние режимов работы оборудования на эффективность очистки (Khusain et al., 2018). Использование каталитических систем на основе термоустойчивых носителей позволяет эффективно удалять токсичные компоненты выбросов в широком диапазоне температур (Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021).

Модуль улавливания диоксида углерода является завершающим элементом системы и основан на процессах сорбции и десорбции CO_2 . Применение сорбционных материалов, в том числе разработанных и исследованных авторами, позволяет интегрировать процессы улавливания CO_2 в общую технологическую схему без существенного усложнения оборудования (Khusain et al., 2024; Khussain et al., 2025). Комплексный характер системы требует согласования режимов работы всех модулей, что делает использование цифрового двойника особенно актуальным.

2. Концепция цифрового двойника системы

Цифровой двойник комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов представляет собой виртуальную инженерную модель, воспроизводящую структуру и функциональные связи физической установки. Концепция цифрового двойника основана на модульном принципе, при котором каждый элемент системы описывается в виде отдельного виртуального блока с заданными входными и выходными параметрами (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018, Perno et al., 2021).

В цифровом двойнике реализуется моделирование последовательного прохождения газового потока через все модули системы с учётом изменения температуры, состава и расхода газа. Такой подход позволяет анализировать влияние параметров отдельных модулей на эффективность системы в целом и выявлять критические режимы эксплуатации. Подобная логика моделирования соответствует современным представлениям о цифровых двойниках промышленных систем, зафиксированным в международных стандартах (ISO, 2021).

Ранее авторами был предложен и реализован подход к созданию

цифровых двойников систем очистки дымовых газов с интеграцией модуля декарбонизации, ориентированный на задачи моделирования и визуализации технологических процессов (Khusain et al., 2024). Настоящая работа развивает этот подход в направлении комплексного инженерного анализа и поддержки проектирования мультимодульных систем очистки.

Общая структура комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов, используемой в цифровом двойнике, представлена на рисунке 1.

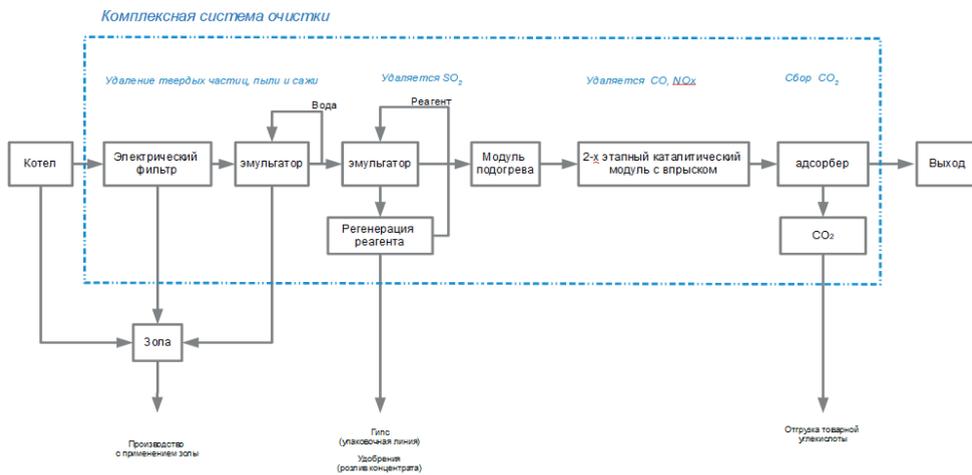


Рисунок 1 – Структурная схема комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок.

3. Архитектура цифрового двойника системы

Цифровой двойник комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов представляет собой интегрированную виртуальную среду, предназначенную для воспроизведения структуры и режимов функционирования физической установки. Архитектура цифрового двойника формируется на основе модульного принципа, при котором каждый элемент технологической системы представлен отдельным программным блоком с определёнными входными и выходными параметрами. Подобный подход соответствует современным концепциям построения цифровых двойников промышленных систем (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018).

Функциональная архитектура цифрового двойника включает несколько уровней: уровень физической системы, уровень виртуальной модели и уровень взаимодействия пользователя с системой. На уровне физической системы располагаются реальные технологические модули очистки дымовых газов и улавливания диоксида углерода. Эти модули обеспечивают удаление твёрдых частиц, нейтрализацию газообразных загрязнителей и улавливание CO_2 .

На уровне виртуальной модели формируется математическое и алгоритмическое описание процессов, происходящих в каждом модуле системы. Виртуальная модель воспроизводит основные характеристики газового потока, включая температуру, давление, скорость движения газа и концентрацию отдельных компонентов газовой смеси. Такие модели широко используются при анализе технологических процессов в химической инженерии и энергетике (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999; Perry and Green, 2019).

Уровень взаимодействия пользователя включает средства визуализации и анализа результатов моделирования. Этот уровень обеспечивает мониторинг технологических параметров, анализ режимов работы системы и оценку эффективности очистки выбросов при различных условиях эксплуатации. В соответствии с международными стандартами цифровых двойников такие системы могут использоваться для анализа, оптимизации и прогнозирования поведения технологических установок на протяжении всего жизненного цикла оборудования (ISO, 2021).

В архитектуре цифрового двойника реализуется последовательная передача данных между отдельными модулями системы. Изменение параметров газового потока после прохождения одного модуля непосредственно влияет на условия работы последующих модулей. Такой подход позволяет учитывать взаимосвязь процессов очистки и декарбонизации и обеспечивает более реалистичное моделирование функционирования всей системы.

Дополнительным элементом архитектуры является база параметров технологических процессов, включающая характеристики газовых потоков, свойства каталитических материалов и параметры сорбционных процессов. Использование такой базы данных позволяет адаптировать цифровой двойник к различным условиям эксплуатации и применять его для анализа различных вариантов компоновки системы очистки.

4. Моделирование основных технологических процессов

Моделирование технологических процессов в цифровом двойнике комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов направлено на воспроизведение ключевых физических и химических преобразований, происходящих в каждом модуле системы. Основной задачей является получение инженерно адекватного описания процессов, достаточного для анализа режимов работы и оптимизации системы в целом, без избыточного усложнения вычислительных моделей, что соответствует классическим подходам химической инженерии (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999; Perry and Green, 2019).

4.1 Моделирование газодинамики потока

Моделирование движения газового потока в элементах системы очистки основано на использовании уравнений сохранения массы, импульса и энергии. Эти уравнения позволяют описывать распределение параметров газового потока в различных элементах технологической системы и оценивать влияние геометрии оборудования на эффективность очистки.

Математическое описание движения газового потока в элементах системы может быть представлено с использованием уравнения баланса массы. В общем виде баланс массы для стационарного потока может быть записан следующим образом:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (1)$$

где,

\dot{m}_{in} - массовый расход газа на входе в модуль,

\dot{m}_{out} - массовый расход газа на выходе из модуля.

Данное уравнение отражает сохранение массы при прохождении газового потока через технологический элемент системы очистки. Подобные зависимости широко применяются при инженерном моделировании процессов химической технологии и газоочистки (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

Дополнительно учитывается уравнение сохранения энергии, позволяющее описывать изменение температуры газовой смеси при прохождении через элементы системы. Температурные изменения оказывают значительное влияние на эффективность каталитических реакций и процессы сорбции диоксида углерода.

Для описания движения газового потока используются зависимости, связывающие скорость потока, давление и гидравлическое сопротивление элементов системы. Эти зависимости позволяют учитывать влияние конструктивных особенностей оборудования на распределение потоков газа. Использование подобных моделей обеспечивает возможность анализа различных режимов работы системы очистки и позволяет прогнозировать изменение параметров газового потока при изменении условий эксплуатации.

4.2 Моделирование каталитических процессов

Каталитические процессы нейтрализации газообразных загрязнителей играют важную роль в обеспечении эффективности очистки дымовых газов. В цифровом двойнике эти процессы описываются с использованием кинетических моделей, отражающих зависимость скорости химических реакций от температуры, состава газовой смеси и времени контакта газа с каталитической поверхностью.

Каталитическая нейтрализация токсичных компонентов дымовых газов основана на реакциях окисления и восстановления. В частности, процессы окисления монооксида углерода и углеводородов приводят к образованию диоксида углерода и воды, тогда как восстановительные реакции способствуют удалению оксидов азота из газовой смеси.

Скорость каталитической реакции может быть описана с использованием кинетического уравнения, отражающего зависимость скорости реакции от концентрации реагентов и температуры:

$$r = kC^n \quad (2)$$

где,

r — скорость химической реакции,

k — константа скорости реакции,

C — концентрация реагента,

n - порядок реакции.

Температурная зависимость константы скорости реакции определяется уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

где,

k_0 - предэкспоненциальный множитель,

E_a - энергия активации реакции,

R - универсальная газовая постоянная,

T - абсолютная температура.

Подобные кинетические зависимости широко используются при анализе каталитических процессов в химической инженерии (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999; Perry and Green, 2019).

Кинетические параметры реакций определяются на основе экспериментальных данных и результатов исследований каталитических систем. Использование кинетических моделей позволяет оценивать степень превращения загрязняющих компонентов в зависимости от температуры и времени контакта газа с каталитическим слоем. Подобные подходы широко используются при анализе каталитических реакторов и процессов химической технологии (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999; Perry and Green, 2019).

Важным фактором является распределение температуры в каталитическом реакторе. Повышение температуры способствует ускорению реакций, однако чрезмерные температурные значения могут приводить к деградации каталитических материалов. Поэтому моделирование температурных режимов является важным элементом цифрового двойника.

4.3 Моделирование процессов улавливания CO_2

Моделирование процессов улавливания диоксида углерода основано на описании сорбционных процессов, происходящих при взаимодействии газовой смеси с сорбционным материалом. В цифровом двойнике используются модели адсорбции и десорбции CO_2 , позволяющие оценивать эффективность улавливания углекислого газа при различных температурных и давленческих условиях.

Процессы адсорбции диоксида углерода могут быть описаны с использованием изотермы Лэнгмюра, которая широко применяется для

моделирования сорбционных процессов (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011):

$$q = \frac{q_{max}bP}{1+bP} \quad (4)$$

где,

q - количество адсорбированного CO_2 ,

q_{max} - максимальная сорбционная ёмкость сорбента,

b - константа адсорбции,

P - парциальное давление CO_2 .

Сорбционные процессы характеризуются циклическим режимом работы, включающим стадии адсорбции, регенерации сорбента и повторного использования материала. При моделировании учитываются свойства сорбционного материала, включая удельную поверхность, пористость и способность к связыванию диоксида углерода.

Подобные технологии широко рассматриваются в современных исследованиях по улавливанию и хранению углекислого газа и являются важным элементом стратегий декарбонизации энергетики (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011, Raganati et al., 2021; Hasan et al., 2024, Sharma et al., 2024). Использование математических моделей сорбционных процессов позволяет оценивать влияние параметров процесса на эффективность улавливания CO_2 и оптимизировать режимы работы оборудования.

Цифровой двойник позволяет анализировать влияние параметров сорбционного процесса на эффективность улавливания CO_2 и оценивать энергетические затраты, связанные с регенерацией сорбента. Такой подход позволяет оптимизировать параметры работы модуля декарбонизации и повысить эффективность всей системы очистки выбросов.

Моделирование процессов удаления твёрдых минеральных частиц и сажи основано на учёте аэродинамических характеристик газового потока и дисперсного состава частиц. Ранее авторами были показаны особенности прохождения газовых потоков в элементах систем нейтрализации и влияние геометрии и режимов работы оборудования на эффективность очистки (Khusain et al., 2018). Эти зависимости используются в цифровом двойнике в виде параметрических моделей, позволяющих оценивать степень очистки при различных условиях эксплуатации.

Процессы нейтрализации газообразных загрязнителей моделируются с учётом протекания каталитических реакций окисления и восстановления токсичных компонентов. В цифровом двойнике используются обобщённые зависимости, отражающие влияние температуры, времени контакта и состава газовой смеси на степень удаления оксидов азота, диоксида серы и монооксида углерода. Экспериментальные и модельные исследования каталитических систем, выполненные авторами ранее, подтверждают эффективность такого

подхода для инженерных расчётов (Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khussain et al., 2022; Khussain et al., 2024).

Важным элементом моделирования является учёт взаимного влияния модулей системы. Изменение характеристик газового потока после одного этапа очистки непосредственно отражается на условиях работы последующих модулей, что требует согласованного моделирования всей технологической цепочки. Цифровой двойник обеспечивает возможность анализа таких взаимодействий и выявления режимов, обеспечивающих максимальную суммарную эффективность очистки и декарбонизации.

5. Использование цифрового двойника на этапах проектирования и внедрения

Применение цифрового двойника на этапах проектирования комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов позволяет существенно повысить обоснованность инженерных решений. Виртуальная модель используется для анализа различных вариантов компоновки системы, подбора рациональных параметров оборудования и предварительной оценки эффективности очистки до физической реализации установки (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018; ISO, 2021).

На стадии проектирования цифровой двойник применяется для оценки влияния последовательности расположения модулей и их производительности на итоговые показатели очистки. Такой подход особенно важен для объектов с переменной нагрузкой и нестабильным составом выбросов, где традиционные методы проектирования не позволяют в полной мере учесть динамику процессов. Использование цифрового двойника снижает потребность в многоэтапных натурных испытаниях и позволяет выявлять потенциальные ограничения системы на ранних этапах (Khusain et al., 2024).

На этапе внедрения цифровой двойник используется для поддержки пусконаладочных работ и адаптации системы к реальным условиям эксплуатации. Сопоставление расчётных и фактических параметров работы установки позволяет корректировать режимы работы отдельных модулей и обеспечивать согласованное функционирование всей системы. Ранее авторами было показано, что использование цифровых двойников в задачах моделирования и визуализации процессов очистки дымовых газов способствует повышению устойчивости работы систем газоочистки (Khusain et al., 2024).

Кроме того, цифровой двойник может использоваться при модернизации и масштабировании комплексных систем очистки. На его основе возможно обоснование внедрения новых модулей, замены каталитических систем или интеграции усовершенствованных сорбционных материалов для улавливания CO₂ (Khusain et al., 2024; Khussain et al., 2025). Это обеспечивает преимущество инженерных решений и повышает гибкость применения системы в промышленных условиях.

6. Практическая значимость и области применения

Практическая значимость цифрового двойника комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов заключается в возможности его применения для решения прикладных инженерных задач в энергетике и промышленности. Виртуальная модель позволяет обосновывать выбор технологических решений, оценивать эффективность очистки и снижать риски, связанные с проектированием и внедрением мультимодульных систем газоочистки.

Цифровой двойник может применяться при проектировании и эксплуатации тепловых электростанций, промышленных котельных, а также предприятий металлургической, нефтехимической и химической промышленности. Использование разработанных ранее каталитических и сорбционных решений позволяет адаптировать модель под конкретные условия эксплуатации и требования к степени очистки выбросов (Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024; Khussain et al., 2022; Khussain et al., 2024; Khussain et al., 2025).

Дополнительной областью применения является инженерное сопровождение эксплуатации систем очистки. Цифровой двойник может использоваться для анализа отклонений режимов работы, оценки последствий изменения состава топлива и формирования рекомендаций по оптимизации параметров эксплуатации. Это способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению экологической эффективности промышленных объектов.

7. Экологический эффект применения системы

Применение комплексных систем очистки и декарбонизации выбросов способствует значительному снижению негативного воздействия энергетических и промышленных объектов на окружающую среду. Использование интегрированных технологических решений позволяет одновременно уменьшать выбросы твёрдых частиц, токсичных газов и парниковых газов.

Снижение выбросов загрязняющих веществ достигается благодаря последовательному прохождению дымовых газов через несколько технологических модулей. Удаление твёрдых частиц предотвращает поступление в атмосферу минеральной пыли и продуктов неполного сгорания топлива. Каталитические процессы нейтрализации обеспечивают преобразование токсичных компонентов газовой смеси в менее опасные соединения.

Особое значение имеет улавливание диоксида углерода, который является одним из основных парниковых газов. Использование технологий улавливания CO₂ рассматривается как важный элемент глобальных стратегий декарбонизации энергетики и промышленности (Bui et al., 2018; Rochelle, 2009; Wang et al., 2011, Raganati et al., 2021; Hasan et al., 2024).

Использование цифровых двойников при проектировании и эксплуатации систем очистки позволяет более точно прогнозировать экологический эффект внедрения таких технологий. Это способствует принятию обоснованных

инженерных решений и повышает эффективность экологической модернизации энергетических объектов.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования была разработана концептуальная модель цифрового двойника комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок. Созданная модель отражает структуру технологической системы и обеспечивает воспроизведение взаимодействия между её основными модулями, включая модуль электрофильтрации, каталитический модуль и модуль улавливания диоксида углерода.

Реализация цифрового двойника позволила смоделировать последовательное прохождение дымовых газов через все элементы системы и оценить изменение параметров газового потока на каждом этапе очистки. В ходе моделирования учитывались такие параметры, как температура газа, скорость потока, концентрация загрязняющих компонентов и эффективность их удаления в каждом технологическом модуле.

Полученные результаты показали, что использование интегрированной мультимодульной системы очистки обеспечивает существенное снижение концентрации загрязняющих веществ. Электрофильтрационный модуль обеспечивает эффективное удаление твердых частиц, каталитический модуль способствует нейтрализации токсичных газообразных компонентов, а модуль декарбонизации позволяет улавливать значительную часть диоксида углерода.

Применение цифрового двойника позволило также провести анализ различных режимов функционирования системы. Моделирование показало, что изменение параметров отдельных модулей оказывает значительное влияние на эффективность работы всей технологической цепочки. В частности, температура газового потока и время контакта газа с каталитическим слоем оказывают существенное влияние на эффективность каталитических реакций, тогда как свойства сорбционного материала и режим регенерации определяют эффективность улавливания CO_2 .

Результаты моделирования подтверждают, что цифровой двойник может использоваться как инструмент инженерного анализа и оптимизации параметров комплексных систем очистки выбросов.

Обсуждение результатов. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал применения цифровых двойников при разработке и оптимизации систем очистки дымовых газов и улавливания углекислого газа. Использование виртуальной модели позволяет учитывать взаимное влияние технологических процессов, протекающих в различных модулях системы, что трудно реализовать при традиционных методах проектирования.

Одним из ключевых преимуществ цифрового двойника является возможность анализа различных конфигураций системы на ранних этапах проектирования. Виртуальное моделирование позволяет изменять параметры модулей, последовательность их расположения и режимы работы без

необходимости проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний. Это существенно снижает затраты времени и ресурсов при разработке новых экологических технологий.

Результаты исследования согласуются с современными научными представлениями о применении цифровых двойников в промышленности, где подобные модели используются для анализа, оптимизации и прогнозирования работы сложных технологических систем (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019). Применительно к системам газоочистки цифровые двойники позволяют учитывать взаимосвязь аэродинамических, химических и сорбционных процессов.

Следует отметить, что разработанная модель носит инженерно-ориентированный характер и предназначена прежде всего для анализа и оптимизации технологических параметров системы. Дальнейшее развитие цифрового двойника может быть связано с интеграцией данных реальных измерительных приборов и систем мониторинга, что позволит реализовать режимы оперативного контроля и адаптивного управления процессами очистки выбросов.

Таким образом, использование цифрового двойника открывает новые возможности для повышения эффективности комплексных систем очистки дымовых газов и внедрения технологий декарбонизации в энергетическом и промышленном секторе.

Заключение. В работе представлена концепция цифрового двойника комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок, ориентированная на инженерное сопровождение процессов проектирования и внедрения мультимодульных систем газоочистки. Показано, что использование цифрового двойника позволяет учитывать взаимосвязь отдельных технологических модулей и анализировать их совместную работу в рамках единой виртуальной модели.

Предложенный подход обеспечивает возможность виртуальной оптимизации компоновки системы, выбора рациональных режимов эксплуатации и предварительной оценки эффективности процессов очистки и улавливания диоксида углерода. Опора на ранее выполненные исследования авторов в области газоочистки, каталитических систем, сорбентов CO₂ и цифровых двойников подтверждает практическую реализуемость и прикладную значимость предложенной концепции (Khusain et al., 2018; Khussain et al., 2020; Khusain et al., 2020; Khusain et al., 2021; Khusain et al., 2024; Khusain et al., 2024; Khussain et al., 2022; Khussain et al., 2024; Khussain et al., 2025).

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения цифровых двойников при решении задач декарбонизации и комплексной очистки выбросов тепловых установок и могут быть использованы при разработке и модернизации экологических технологий для энергетического и промышленного секторов.

References

- Bui M., Adjiman C.S., Bardow A., et al. (2018) Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy and Environmental Science*, 11, 1062–1176. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A> (in Eng.).
- Fogler H.S. (2016) *Elements of Chemical Reaction Engineering*. 5th ed. Pearson. ISBN: 978-0-13-388751-8 (in Eng.).
- Hasan H.F., Al-Sudani, F.T., Albayati T.M., Salih I.K., Hharah H.N., Majdi H.S., Saady N.M.C., Zendejboudi S., Amari A., and Ghenni S.A. (2024) Solid adsorbent material: A review on trends of post-combustion CO₂ capture. *Process Safety and Environmental Protection*, 182, 975–988. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.025> (in Eng.).
- Grieves M., Vickers J. (2017) Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (in Eng.).
- Javaid M., Haleem A., and Suman R. (2023) Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003> (in Eng.).
- Khussain B., Brodskiy A., Sass A., et al. (2022) Research of the thermal effect on the Fe–Cr–Al alloy foil. *Coatings*, 12(9), Article 1266. <https://doi.org/10.3390/coatings12091266> (in Eng.).
- Khussain B., Sass A., Brodskiy A., et al. (2025) Dry carbonate sorbents for CO₂ capture from flue gases. *Molecules*, 30(13), Article 2859. <https://doi.org/10.3390/molecules30132859> (in Eng.).
- Khussain B.Kh., Zhurinov M.Zh., Sass A.S., et al. (2020) Novye nanostrukturnye katalizatory dlya neytralizatsii toksichnykh gazov v promyshlennosti [New nanostructured catalysts for neutralization of toxic gases in industry]. *Izvestiya NAN RK. Seriya Khimii i Tekhnologii*, 1(439), 116–122. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.15> (in Eng.).
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., and Sihn W. (2018) Digital twin in manufacturing: A categorical literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474> (in Eng.).
- Khussain B. Kh., Brodskiy A. R., Sass A.S., and Telmanov M. M. (2024). Sozdanie tsifrovyykh dvoynikov, vkhlyuchaya modul' dekarbonizatsii, pri modelirovaniy sistem ochistki dymovykh gazov [Creation of digital twins, including a decarbonization module, in modeling flue gas purification systems]. *Reports of the NAS RK*. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1483.318> (in Russian)
- Levenspiel O. (1999) *Chemical reaction engineering* (3rd ed.). Wiley. (in Eng.).
- Perry R.H., and Green D.W. (2019) *Perry's chemical engineers' handbook* (9th ed.). McGraw-Hill. (in Eng.).
- Perno M., Hvam L., and Haug A. (2021) Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558> (in Eng.).
- Raganati F., Miccio F., and Ammendola P. (2021) Adsorption of Carbon Dioxide for Post-combustion Capture: A Review. *Energy and Fuels*, 35(16), 12845–12868. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01618>
- Rochelle G.T. (2009) Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*, 325(5948), 1652–1654. <https://doi.org/10.1126/science.1176731> (in Eng.).
- Tao F., Zhang H., Liu A., and Nee A.Y.C. (2019) Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186> (in Eng.).
- Sharma A., Pareek V., Zhang D., et al. (2024) CO₂ Post-combustion Capture: A Critical Review of Current Technologies and Future Directions. *Energy and Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02513> (in Eng.).
- Wang M., Lawal A., Stephenson P., Sidders J., and Ramshaw C. (2011) Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1609–1624. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005>(in Eng.).
- ISO (2021) ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 1: Overview and general principles. International Organization for Standardization. (in Eng.).

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 31.03.2026.

Формат 60x881/8.

20,0 п.л. Заказ 1.