

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№3
2026**

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

2026 • 3



ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

Editor-in-Chief:

ZHURINOV Murat Zhurinovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of IAAS and NAS RK, General Director of the Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemicals (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960> <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Editorial Board:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the JSC "Phytochemistry Research and Production Center", (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

RAMAZANOV Tlekkaul Sabitovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

ABIEV Rufat, Doctor of Technical Sciences (Biochemistry), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

TIGINYANU 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>

SANG SU Kwak, PhD (Biochemistry, Agricultural Chemistry), Professor, Chief Scientist, Research Center for Plant Systems Engineering, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), (Daecheon, Korea), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi Iskenderovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of NAS RK, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

BOSHKAEV Kuantai Avgazyevich, PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ZHUSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS 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/65533963>

TAKIBAEV Nurgali Zhabagaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

KHARIN Stanislav Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, First Deputy Director General of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky", (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.

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

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

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of Information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan № **KZ93VPY00121157** issued **05.06.2025**

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрыңұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХҒАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, "Фитохимия" ғылыми-өндірістік орталығы " АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тілеккабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

ӘБИЕВ Руфат, техника ғылымдарының докторы (биохимия), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты «Химиялық және биотехнологиялық аппаратураны оңтайландыру» кафедрасының меңгерушісі, (Санкт-Петербург, Ресей), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Сесаре, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГІНЯНУ 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>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корея Биология және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIIBV), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСІМБАЕВ Рахметжол Ескендірұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. (Астана, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), нанотехнология материалдары зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БҮРКІТБАЕВ Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖҮСІПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнуталлайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы "Отын, катализ және электрохимия институты" АҚ Бас директорының бірінші орынбасары, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

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

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 № KZ93VPY00121157 Куәлік.

Тақырыптық бағыты: физика, химия.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

АДЕКЕНОВ Сергезы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор АО "Научно-производственного центра "Фитохимия" (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

АБИЕВ Руфат, доктор технических наук (биохимия), профессор, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Санкт-Петербург, Россия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

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>

САНГ-СУ Квак, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB), (Джэон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендинович, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Куантай Авгазыевич, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БУРКИТБАЕВ Мухамбеткали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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/65533963>

ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

АБИШЕВ Медеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

АБИЛМАТЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич, кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

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

Свидетельство № KZ93VPY00121157 о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан 05.06.2025

Тематическая направленность: физика, химия.

Периодичность: 4 раза в год.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

CONTENTS

PHYSICS

Aliuly A., Kaltayev A.

Aliuly A., Kaltayev A. Assessment of the Applicability of Similarity Laws for Centrifugal Pump Scaling Based on Hydrodynamic Modeling.....14

Baratov A.G., Sailaubek A., Serik A.S.

Synthesis and Investigation of a Narrow-Bandgap SrTaO₂N-Based Photocatalyst.....33

Nurbayev B., Dmitriyeva E., Kemelbekova A.

Modern Methods of Selective Lithium Leaching from Spent Lithium-Ion Batteries.....45

Seitov A., Amanzholov T.

Comparative Analysis of One-Dimensional Physical-Hydrodynamic Models of Centrifugal Flow in an Impeller for Mineralized Media.....60

Syzdykova A.M., Serikbayev N.S., Kutum B.B.

Local Kodama-Type Transformations and Integrability Limits of the Extended Fifth-Order Korteweg-de Vries Equation.....83

Ualikhanova U.A., Ussipkyzy T., Altayeva G.S., Razina O.V.

Calculation of the Screened $f(T)$ Gravity Model.....101

Zhadyranova A.A., Tsyba P.Yu., Ismail U.K., Yerzhan B.

Divergence-Free Deceleration Parameter, Kinematic Constraints from DESI DR2 and Cosmic Chronometers.....123

Zhenishan K., Bekov S.S., Syzdykova A.M.

The Influence of Gaussian Process Parameters on Reconstructing the Hubble Constant.....146

CHEMISTRY

Amangeldi B., Zhanikulov N., Taimasov B., Aitureev M., Dauletiyarov M.

Research of the Firing Processes and Whiteness of White Cement Clinkers.....155

Baisalova G.Zh., Bauyrzhanova G.B., Niyaz G.A., Taltenov A.A., Ainabayev A.A.

Study of the Chemical Composition of Ethanol Extracts of Lady's Mantle by Gas Chromatography-Mass Spectrometry.....169

Bishimbaev V.K., Kapsalyamov B.A.

Hydrogeochemical Indicators of Sulfuric-Acid Uranium Leaching Impact on Groundwater in Shieli and Zhanakorgan Districts.....183

Darmenbayeva A.S., Aubakirova R.A. Nurgaliyeva D.A., Abylkassova G.E., Abilmazhinova G.A.

Structural and Morphological Features of Polymer-Metal Functional Materials.....205

Dyusebaeva M.A., Berganayeva A.E., Ibragimova N.A., Utaraliev D.M., Berganayeva G.E.

Green synthesis of silver nanoparticles using the n-butanol fraction of Galega officinalis L.....223

Dyussembekova S.B., Utarova D.A., Kuspanov Zh.B., Daulbayev Ch.B., Abdikarimova U.A. Investigation of the Effect of SrTiO ₃ Heat Treatment on the Photocatalytic Efficiency of the \	
Decomposition of an Amphoteric Antibiotic.....	239
Issayeva U.B., Akhmetova G.S., Praliyev K.D., Malmakova A.E., Seilkhanov T.M. 1-Benzyl-4-(p-Fluorobenzoyloxyimino)Piperidine Hydrochloride as a Candidate for	
an Anti-Infective Agent.....	252
Kamunur K., Yskak M., Mussapyrova L. Effect of Chemical Modification of Sodium Lignosulfonate on Flotation Properties in the	
Barite – Calcite System.....	264
Kononov A., Kamunur K., Mussapyrova L., Assylkhanova D., Batkal A. Obtaining and Studying the Inorganic Flocculant Al–Fe–Mn Based on Modified Bentonite.....	276
Kurmangaliyeva A.1, Akhmetova F.2, Kareshova Zh.1, Iskakov R. PDMA-Modified Tagan Bentonite for Hydrogen Production in Catalytic Conversion	
of Hydrocarbons.....	292
Kurtebayeva A.A., Silvia Álvarez-Torrellas., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Kalmakhanova M.S. Corn-Cob-Derived Fe-Modified Activated Carbons for Paracetamol and Sulfamethoxazole	
Removal by Adsorption and Oxidative Treatment.....	307
Nadirov R.K., Nurtazina N.D., Ryskaliyeva R.G. Response Surface Modelling and Optimisation of Ilmenite Flotation Using a Modified	
Lignosulphonate Reagent.....	334
Nefedov A.N., Taikenova A.T., Imashev B.K., Nurislamov R.M., Leontyeva X. Quantum Computing in the Modeling of Corrosion Processes.....	350
Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Kabiyeva S.K., Zhaslan R.K. Synthesis and Structural Study of 3,5-Dimethylisoxazole Sulfone Derivatives with Secondary	
Amines.....	365
Orazbekova R.S., Tungatarova S.A., Baizhumanova T.S., Kaumenova G.B., Zhumabek M. Influence of Reaction Mixture Composition in Steam Reforming of Bioethanol on a High-Entropy	
Oxide Catalyst.....	382
Ryskaliyeva R.G., L.K. Beisembayeva, Osserov T.B. Hydrocyclone Classification of Balkhash Processing Plant Tailings.....	398
Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Kenzin E.N., Zhurinov M. Formation and Maturation of Phosphate Coatings on Steel from an Alcohol-Based	
Phosphating Solution.....	418
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Balkembay A.S., Sarova N.B., Zhaltyrbayeva N.K. Effect of Electrolyte Formulation on the Characteristics of Zinc-Based	
Electroplated Coatings.....	435
Seitkaliyeva N., Kussainova G., Zhursumbayeva M., Mohamad Ibrahim M.N., Abdiyev K. Study of the Flocculation Properties of Itaconic Acid-Based Copolymers.....	448

Sergazina S.M., Nurmukhanbetova N.N., Ostretsova I.B., Kamze A.R., Kassenova N.B. Comprehensive Assessment of Natural Drinking Water Quality and Statistical Analysis of Physicochemical Parameters.....	460
Talgatkyzy A., Nazhipkyzy M., Otenov A., Seitkazinova A., Issanbekova A. Wood Waste-Derived Organosolv Lignin-Based Carbon Nanofibers For Energy Storage Applications.....	475
Toktabayeva A.K., Makhayeva D.N., Rakhmetullayeva R.K., Rvaidarova G.O., Issenova G.D. Synthesis, Structure, and Physicochemical Properties of Sulfur-Containing Composites Based on Aniline, p-Phenylenediamine, Phenol, and Formaldehyde.....	498
Yeshmanova G.B., Smagulov D.U. Effect of Silicon-Based Particles on the Formation and Composition of PEO Coatings.....	517
Zhortarova A.A., Kubicek V., Ibrayev M.K., Panshina S.Y., Seidakhmetova R.B. N-Phosphorylation of Amino-thiazoles and Amino-Thiadiazoles with P(III)- and P(V)-Reagents: Synthesis, Structure, and Biological Activity.....	538
Zhussupova A., Tyumentseva O., Antonyuk V. Comparative Study of the Kinetics and Energy Characteristics of Planetary Milling of Copper Smelting Dump Slag and Granulated Lead-Smelting Slag.....	552

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Гидродинамикалық модельдеу негізінде ортадан тепкіш сорғыларды масштабтауда ұқсастық заңдарының қолданылуын бағалау.....14

Баратов А.Ғ., Сайлаубек А., Серік А.С.

SrTaO_2N негізіндегі тар тыйым салынған аймақты фотокатализаторды алу және зерттеу.....33

Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.

Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторлардан литийді селективті шаймалаудың заманауи әдістері.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Минералданған орталарға арналған жұмыс дөңгелегіндегі ортадан тепкіш ағыстың бірөлшемді физикалық–гидродинамикалық модельдерін салыстырмалы талдау.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Кенетейлген бесінші ретті Кортевег-де Фриз тендеуінің локалды кодам типті түрлендіруі мен интегралдану шектері.....83

Уалиханова У.А., Үсіпқызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.

Экрандалған $f(T)$ – гравитация моделінің есебі.....101

Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил Ү.Қ., Ержан Б.

Дивергенциясыз бәсеңдеу параметрі, DESI DR2 және космикалық хронометрлер деректері бойынша кинематикалық шектеулер.....123

Жеңіскан Қ., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Хаббл тұрақтысын реконструкциялауға Гаусстық процестер параметрлерінің әсері.....146

ХИМИЯ

Амангелді Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтурсев М., Даулетияров М.

Ақ цемент клинкерлерінің күйдіру процестерін және ақтығын зерттеу.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Газ хроматография-масс-спектрометрия әдісімен кәдімгі теңгежапырақ өсімдігінің этанолды сығындыларының химиялық құрамын зерттеу.....169

Бишимбаев В.К., Капсаямов Б.А.

Шиелі және Жаңақорған аудандарындағы уранды күкірт қышқылымен шаймалаудың жер асты суларына әсерінің гидрогеохимиялық көрсеткіштері.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нурғалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абильмажинова Г.А.

Полимер-металл функционалдық материалдардың құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктері.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е.

Galega officinalis L. өсімдігінің N-бутанолдық фракциясы арқылы күміс нанобөлшектерін жасыл синтездеу.....223

Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Құспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Әбдікәрімова Ұ.Ә. Термиялық өңделген SrTiO ₃ фотокатализаторларының екідайлы антибиотикті тиімді ыдыратуын зерттеу.....	239
Исаева Ұ.Б., Ахметова Г.С., Пірәлиев Қ.Ж., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Жұқпалы ауруларға қарсы кандидат ретінде 1-бензил-4-(П-фторбензоилоксиимино) пиперидин гидрохлориді.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мусапирова Л. Барит–кальцит жүйесіндегі натрий лигносульфонатының флотациялық қасиеттеріне химиялық модификацияның әсері.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мусапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Модификацияланған бентонит негізіндегі Al–Fe–Mn бейорганикалық флокулянтын алу және зерттеу.....	276
Қурманғалиева А.1, Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. Көмірсутектердің каталитикалық конверсиясы арқылы сутек алуға арналған ПДМА-модификацияланған таған бентониті.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Калмаханова М.С. Жүгері собықтарынан алынған темірмен модификацияланған белсендірілген көмірлермен парацетамол мен сульфаметоксазолды адсорбциялық-тотығу жолымен жою.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Модификацияланған лигносульфонатты реагентті қолдану арқылы ильменит флотациясының жауап бетін модельдеу және оңтайландыру.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Коррозиялық процестерді модельдеудегі кванттық есептеулер.....	350
Нүркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Қабиева С.Қ., Жаслан Р.К. Екіншілік аминдермен 3,5-диметилизоксазолдың сульфотуындыларын синтездеу және құрылымдық зерттеу.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Жоғары энтропиялық оксид катализаторы қатысында биоэтанолдың бу риформингісіне реакциялық қоспа құрамының әсері.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Балқаш байыту фабрикасының байыту қалдықтарын гидроциклондық классификациялау.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Жұрынов М. Спирт негізіндегі фосфаттау ерітіндісінен болат бетінде фосфатты жабындардың қалыптасуы және жетілуі.....	418
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Мырыш негізіндегі гальваникалық қаптамалардың қасиеттеріне электролит құрамының әсері.....	435

Сейтқалиева Н., Құсаинова Г., Жүрсімбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Әбдиев Қ. Итакон қышылы негізіндегі сополимерлердің флокуляциялық қасиеттерін зерттеу.....	448
Сергазина С.М., Нұрмұханбетова Н.Н., Острцова И.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Табиғи ауыз су сапасын кешенді бағалау және физика-химиялық көрсеткіштерге статистикалық талдау.....	460
Талгатқызы Ә., Нажи́пқызы М., Өтенов Ә., Сейтқазинаова Ә., Исанбекова А. Ағаш қалдықтарынан алынған органосольв лигнин негізіндегі көміртекті талшықтарды энергия сақтау жүйелерінде қолдану.....	475
Тоқтабаева Ә.Қ., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.Қ., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Анилин, п-фенилендиамин, фенол және формальдегид негізіндегі күкіртқұрамды композиттердің синтезі, құрылымы және физика-химиялық қасиеттері.....	498
Ешманова Г.Б., Смағұлов Д.У. Кремний негізіндегі бөлшектердің ПЭО жабындарының қалыптасуы мен құрамына әсері.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.Қ., Паньшина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. P(III) және P(V) реагенттерімен аминотиазолдар мен аминок-тиадиазолдарды N-фосфорлирлеу: синтезі, құрылымы және биологиялық белсенділігі.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Үйінді мыс балқыту шлагы мен қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлагын планетарлық ұнтақтау кинетикасы мен энергетикасын салыстырмалы зерттеу.....	552

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Оценка применимости законов подобия при масштабировании центробежных насосов на основе гидродинамического моделирования.....14

Баратов А.Г., Сайлаубек А., Серік А.С.Получение и исследование узкозонного фотокатализатора на основе SrTaO_2N33**Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.**

Современные методы селективного выщелачивания лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Сравнительный анализ одномерных физико-гидродинамических моделей центробежного течения в рабочем колесе для минерализованных сред.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Локальные преобразование типа кодамы и пределы интегрируемости расширенного уравнения Кортевега-де Фриза пятого порядка.....83

Уалиханова У.А., Усипкызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.Расчёт экранированной модели $f(T)$ -гравитации.....101**Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил У.Қ., Ержан Б.**

Дивергентно-свободный параметр замедления, кинематические ограничения по данным DESI DR2 и космических хронометров.....123

Женискан К., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Влияние параметров Гауссового процесса на реконструкцию постоянной Хаббла.....146

ХИМИЯ

Амангелди Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтурсев М., Даулетияров М.

Исследование процессов обжига и белизны клинкеров белых цементов.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Изучение химического состава этанольных экстрактов манжетки обыкновенной методом газ хроматографии-масс-спектрометрии.....169

Бишимбаев В.К., Капсалямов Б.А.

Гидрогеохимические индикаторы воздействия сернокислотного выщелачивания урана на подземные воды районов Шиели и Жанакоргана.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нургалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абилямажинова Г.А.

Структурно-морфологические особенности полимер-металлических функциональных материалов.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е. Зеленый синтез серебряных наночастиц с использованием N-бутанольной фракции Galega Officinalis L.....	223
Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Куспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Абдикаримова У.А. Исследование влияния термической обработки SrTiO ₃ на фотокаталитической эффективности разложения амфотерного антибиотика.....	239
Исаева У.Б., Ахметова Г.С., Пралиев К.Д., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Гидрохлорид 1-бензил-4-(п-фторбензоилоксиимино) пиперидина в качестве кандидата в противомикробное средство.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мұсапирова Л. Влияние химической модификации лигносульфоната натрия на его флотационные свойства в системе барит–кальцит.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мұсапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Получение и исследование неорганического флокулянта Al–Fe–Mn на основе модифицированного бентонита.....	276
Қурманғалиева А., Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. ПДМА-модифицированный таганский бентонит для получения водорода при каталитической конверсии углеводородов.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes Н.Т., Калмаханова М.С. Модифицированные железом активированные угли из кукурузных початков для адсорбционно-окислительного удаления парацетамола и сульфаметоксазола.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Моделирование поверхности отклика и оптимизация флотации ильменита с использованием модифицированного лигносульфонатного реагента.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Квантовые вычисления в моделировании коррозионных процессов.....	350
Нуркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Кабиева С.К., Жаслан Р.К. Синтез и структурное исследование сульфопроизводных 3,5-диметилизоксазола совторичными аминами.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Влияние состава реакционной смеси в паровом риформинге биоэтанола на высокоэнтропийном оксидном катализаторе.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Гидроциклонная классификация хвостов обогащения Балхашской обогажительной фабрики.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Журинов М. Формирование и созревание фосфатных покрытий на стали из фосфатирующего раствора на основе спирта.....	418

Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Влияние состава электролита на свойства гальванических покрытий на основе цинка.....	435
Сейткалиева Н., Кусаинова Г., Журсумбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Абдиев К. Исследование флокулирующих свойств сополимеров на основе итаконовой кислоты.....	448
Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Острцова Н.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Комплексная оценка качества природной питьевой воды и статистический анализ физико-химических показателей.....	460
Талгаткызы А., Нажипкызы М., Отонов А., Сейтказинова А., Исанбекова А. Углеродные волокна на основе органосольв лигнина, полученного из древесных отходов, для применения в системах хранения энергии.....	475
Токтабаева А.К., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.К., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Синтез, структура и физико-химические свойства серосодержащих композитов на основе анилина, п-фенилендиамина, фенола и формальдегида.....	498
Ешманова Г.Б., Смагулов Д.У. Влияние частиц на основе кремния на формирование и состав ПЭО покрытий.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.К., Панышина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. N-фосфорилирование аминотиазолов и амино-тиадиазолов с помощью реагентов Р(III) и Р(V): синтез, структура и биологическая активность.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Сравнительное исследование кинетики и энергетики планетарного измельчения отвального медеплавильного шлака и гранулированного шлака свинцовой плавки.....	553

©Aliuly A. *, Kaltayev A., 2026.

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: aliuly.abdurashid@gmail.com

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF SIMILARITY LAWS FOR CENTRIFUGAL PUMP SCALING BASED ON HYDRODYNAMIC MODELING

Aliuly Abdurashid — PhD student, Senior Lecturer, Institute of Automation and Information Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: aliuly.abdurashid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6845-6571>;

Kaltayev Aidarkhan — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Academician of NEA RK, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2180-2785>.

Abstract. Centrifugal pumps are widely used in industrial systems; however, applying classical similarity laws to pumps of different sizes may result in discrepancies between analytical and numerical hydraulic characteristics. This study aims to assess the applicability of similarity laws by comparing analytical calculations with three-dimensional CFD simulations for different geometric scales and impeller rotational speeds. The investigation was based on a reference centrifugal pump geometry developed from a hydraulic design calculation. Four computational variants with different geometric scales and rotational speeds were generated using similarity theory. The internal flow was simulated in ANSYS CFX 2023 R2 using a finite-volume approach, a steady-state RANS formulation, and the SST $k-\omega$ turbulence model. For each variant, pump head, power, hydraulic efficiency, pressure and velocity distributions, and flow-structure features were evaluated. For the full-scale models, the deviation of CFD-predicted head from the analytical value was 6.6–6.8%, whereas for the reduced-scale models it increased to 11.9–12.5%. The deviation in power ranged from 11.8% to 14.6%. CFD predicted hydraulic efficiencies of 86.7–86.8% for the full-scale models and 81.7–81.9% for the reduced-scale models, while the theoretical efficiency was assumed to be 80%. The results demonstrate that geometric scaling has a stronger effect on pump characteristics than changes in rotational speed. The findings confirm that similarity laws can be used for preliminary pump design, while CFD verification is recommended for the development of reduced-scale pump models. The

proposed approach can be used to improve the reliability of centrifugal pump design for different sizes.

Keywords: centrifugal pump design, impeller, similarity theory, CFD modeling, hydraulic characteristics, hydraulic efficiency, pump head

Funding: This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR28713691).

For citations: Aliuly A., Kaltayev A. Assessment of the Applicability of Similarity Laws for Centrifugal Pump Scaling Based on Hydrodynamic Modeling. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.3. Pp. 14–32. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.460>

©Әлиұлы А.*, Калтаев А., 2026.

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

*E-mail: aliuly.abdurashid@gmail.com

ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ ОРТАДАН ТЕПКІШ СОРҒЫЛАРДЫ МАСШТАБТАУДА ҰҚСАСТЫҚ ЗАҢДАРЫНЫҢ ҚОЛДАНЫЛУЫН БАҒАЛАУ

Әлиұлы Абдурашид — PhD докторант, аға оқытушы, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

E-mail: aliuly.abdurashid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6845-6571>;

Калтаев Айдархан — Физика-математика ғылымдарының докторы, Профессор, ҚР ҰҒА және ҚР ҰИА академигі, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

E-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2180-2785>.

Аннотация. Ортадан тепкіш сорғылар өнеркәсіптің әртүрлі салаларында кеңінен қолданылады, алайда әртүрлі типөлшемдегі сорғыларды жобалау кезінде классикалық ұқсастық заңдарын қолдану аналитикалық және сандық алынған гидравликалық сипаттамалар арасында айырмашылықтың пайда болуына әкелуі мүмкін. Жұмыстың мақсаты – жұмыс дөңгелегінің геометриялық масштабы мен айналу жиілігі өзгерген кезде аналитикалық есептеулерді үш өлшемді CFD-модельдеу нәтижелерімен салыстыру арқылы ұқсастық заңдарының қолданылу мүмкіндігін бағалау. Зерттеу гидравликалық есептеу нәтижелері бойынша қалыптастырылған ортадан тепкіш сорғының базалық геометриялық моделі негізінде жүргізілді. Оның негізінде ұқсастық теориясын пайдаланып, геометриялық масштабы және айналу жиілігі әртүрлі төрт есептік нұсқа әзірленді. Ішкі ағынды сандық модельдеу ANSYS CFX 2023 R2 бағдарламасында ақырғы көлемдер әдісімен, стационарлық RANS моделі және SST k- ω турбуленттік моделі негізінде орындалды. Әрбір нұсқа үшін арын, қуат, гидравликалық пайдалы әсер коэффициенті, қысым мен жылдамдықтың таралуы және ағын құрылымының

ерекшеліктері анықталды. Толық масштабты модельдер үшін CFD арқылы алынған арынның аналитикалық мәннен ауытқуы 6,6–6,8 %, ал кішірейтілген модельдер үшін 11,9–12,5 % болды. Қуат бойынша айырмашылық 11,8–14,6 % аралығында өзгерді. CFD бойынша ПӘК толық масштабты модельдерде 86,7–86,8 %, ал кішірейтілген модельдерде 81,7–81,9 % болды, теориялық мән 80 % деп қабылданды. Геометриялық масштабтаудың сорғы сипаттамаларына айналу жиілігін өзгертуге қарағанда едәуір күшті әсер ететіні анықталды. Нәтижелер ұқсастық заңдарын алдын ала жобалауда қолдануға болатынын, ал кішірейтілген модельдерді әзірлеу кезінде CFD-тексеру жүргізу қажеттігін көрсетті. Ұсынылған тәсіл әртүрлі типөлшемдегі ортадан тепкіш сорғыларды жобалау сенімділігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: ортадан тепкіш сорғыны жобалау, жұмыс дөңгелегі, ұқсастық теориясы, гидродинамикалық модельдеу, гидравликалық сипаттамалар, гидравликалық ПӘК, екпін

©Әлиұлы А. *, Калтаев А., 2026.

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.

*E-mail: aliuly.abdurashid@gmail.com

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНОВ ПОДОБИЯ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Әлиұлы Абдурашид — PhD докторант, старший преподаватель, Институт автоматики и информационных технологий, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: aliuly.abdurashid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6845-6571>;

Калтаев Айдархан — доктор физико-математических наук, профессор, Академик НАН РК и НИА РК, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2180-2785>.

Аннотация. Центробежные насосы широко применяются в различных отраслях промышленности, однако применение классических законов подобия при проектировании насосов различного типоразмера может сопровождаться расхождением аналитических и численно полученных гидравлических характеристик. Целью работы является оценка применимости законов подобия путем сопоставления аналитических расчетов с результатами трехмерного CFD-моделирования при изменении геометрического масштаба и частоты вращения рабочего колеса. Исследование выполнено на основе базовой геометрической модели центробежного насоса, сформированной по результатам гидравлического расчета. С применением теории подобия были подготовлены четыре расчетные модели, которые отличались друг от друга геометрическим масштабом и частотой вращения. Расчет внутренних течений проводился в программном комплексе ANSYS CFX 2023 R2 методом конечных объемов (в

стационарной постановке RANS с использованием модели турбулентности SST $k-\omega$). Для каждой конфигурации оценивались напор, потребляемая мощность и гидравлический КПД. Дополнительно анализировались поля давления и скорости, а также локальные особенности структуры потока. Сравнение результатов численного моделирования с аналитическими расчетами выявило следующие закономерности. У полноразмерных моделей расхождение по напору составило всего 6,6–6,8 %, тогда как при уменьшении габаритов погрешность возросла до 11,9–12,5 %. Отклонения в значениях мощности находились в диапазоне 11,8–14,6 %. Расчетный гидравлический КПД для крупных моделей достиг 86,7–86,8 %, а для уменьшенных – 81,7–81,9 % (при теоретически заложенном значении 80 %). Анализ данных показал, что масштабирование геометрии сказывается на характеристиках насоса заметно сильнее, чем варьирование рабочих оборотов. Таким образом, законы подобия вполне применимы для этапа эскизного проектирования, однако разработка уменьшенных версий насосов требует обязательной поверочной оценки методами вычислительной гидродинамики (CFD). Предложенный подход может быть использован для повышения достоверности проектирования центробежных насосов различных типоразмеров.

Ключевые слова: проектирование центробежного насоса, рабочее колесо, теория подобия, гидродинамическое моделирование, гидравлические характеристики, гидравлический КПД, напор

Введение. Насосное оборудование играет ключевую роль в технологических циклах нефтегазового сектора, химической индустрии, энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. Уровень энергопотребления таких установок напрямую зависит от гидродинамического совершенства проточной области и, в первую очередь, от геометрии рабочего колеса. В связи с этим разработка более точных подходов к проектированию и прогнозированию рабочих параметров центробежных машин сохраняет свою высокую практическую значимость.

Одним из методов сокращения объема расчетных и экспериментальных исследований является применение теории гидродинамического подобия. Законы подобия позволяют определять основные характеристики геометрически подобных насосов при изменении их размеров и частоты вращения. Однако при масштабировании изменяются условия течения и гидравлические потери, вследствие чего фактические характеристики могут отличаться от значений, полученных по классическим масштабным зависимостям.

Современные методы вычислительной гидродинамики позволяют оценивать влияние масштабирования на внутреннее течение и гидравлические характеристики насосов. Методы вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют напрямую связать интегральные показатели – напор, мощность и КПД – с локальными полями скоростей и давлений в проточной части. Благодаря этому можно точно установить причины, по которым теоретические характеристики насоса расходятся с фактическими.

Цель настоящей работы – определить границы применимости законов

подобия при проектировании центробежных насосов. Для этого классические аналитические расчеты сопоставляются с результатами трехмерного CFD-моделирования, выполненного для вариантов с разным геометрическим масштабом и частотой вращения вала.

Литературный обзор. Современные исследования центробежных насосов сфокусированы на трех основных направлениях: улучшении методик гидравлического расчета, поиске оптимальной формы рабочего колеса и прогнозировании рабочих параметров с помощью CFD-кодов. Пристальное внимание авторы уделяют тому, как именно геометрия лопастной системы влияет на напор, энергопотребление и КПД. Как показывают недавние публикации (Chen et al., 2021; Li et al., 2022; Wang et al., 2022), интеграция численного моделирования с алгоритмами параметрической оптимизации позволяет анализировать широкий спектр конструктивных решений виртуально, избавляя от необходимости создавать десятки дорогостоящих опытных образцов.

CFD-моделирование широко используется для анализа внутренних течений в центробежных насосах и оптимизации их проточной части. С помощью численных методов исследуется влияние формы лопаток, параметров входной и выходной кромок, а также других геометрических характеристик рабочего колеса на гидравлические характеристики насоса. Результаты таких исследований показывают возможность использования CFD не только для оценки интегральных параметров, но и для анализа распределений давления, скорости и особенностей структуры потока (Li et al., 2023; Cao et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Другим важным направлением является применение методов автоматизированной оптимизации совместно с CFD. Использование методов планирования эксперимента, поверхностей отклика и алгоритмов оптимизации позволяет определять рациональные сочетания геометрических параметров рабочего колеса и повышать гидравлическую эффективность насосов (Wang et al., 2022; Wang et al., 2023). Вместе с тем такие подходы в основном направлены на оптимизацию конкретной конструкции и не рассматривают подробно вопрос сохранения гидродинамических характеристик при изменении геометрического масштаба. Современные CFD-исследования также применяются для совершенствования конструкции рабочего колеса и оценки влияния выбранной модели турбулентности на характеристики центробежных насосов (Hassan et al., 2024; Hundshagen et al., 2020).

При проектировании линеек насосного оборудования и пересчете рабочих параметров инженеры традиционно опираются на теорию гидродинамического подобия. Для геометрически подобных машин базовые формулы связывают напор, подачу и мощность с диаметром рабочего колеса и частотой его вращения. На практике, однако, точность этих законов напрямую зависит от соблюдения условий динамического подобия. Эксперименты с геометрически подобными насосами (Kearney et al., 2009) доказывают: при уменьшении габаритов оборудования его эффективность часто падает, а реальные характеристики отклоняются от теоретических масштабных кривых – в первую очередь из-за

изменения числа Рейнольдса. Как отмечают Nguyen et al. (2023), варьирование размеров влечет за собой искажение гидродинамики течения и перераспределение радиальных сил, что необходимо учитывать при переносе данных с одной модели на другую.

Проблема масштабных эффектов закономерно привела к попыткам скорректировать классические законы подобия (affinity laws). Исследователи выяснили, что колебания вязкости и числа Рейнольдса критически влияют на работу насоса, из-за чего стандартные формулы часто дают погрешность. Чтобы нивелировать этот недостаток, ряд авторов (Morrison et al., 2018; Patil et al., 2019; Agarwal et al., 2020) предложили модифицированные уравнения, в которые дополнительно введены безразмерные критерии течения.

Отдельный пласт работ посвящен прямой верификации законов подобия методами вычислительной гидродинамики. Так, Rosa et al. (2024) сопоставили данные CFD-расчета центробежного насоса с аналитическими результатами при варьировании оборотов. Их работа наглядно демонстрирует, что численные методы отлично подходят для оценки того, насколько классические зависимости соответствуют реальной физике процесса.

Анализ литературы показывает: CFD-моделирование стало надежным инструментом для исследования центробежных насосов, а применять классические законы подобия напрямую мешают масштабные эффекты. Тем не менее, в большинстве работ эта проблема рассматривается фрагментарно – изучается либо смена режимов работы, либо влияние какого-то одного фактора (например, только числа Рейнольдса). Вопрос сопоставления аналитических масштабных зависимостей с результатами трехмерного CFD-моделирования при одновременном изменении геометрического масштаба и частоты вращения требует дальнейшего изучения.

В предыдущих работах авторов были разработаны методика гидравлического проектирования рабочего колеса центробежного насоса (Momysh et al., 2024; Aliuly et al., 2024a), подход к его масштабированию на основе теории подобия (Bodau et al., 2023), а также методика численного гидродинамического моделирования центробежного насоса (Aliuly et al., 2024a; Aliuly et al., 2024b). В частности, было показано, что расчетная геометрия рабочего колеса может использоваться для формирования уменьшенной модели насоса с сохранением основных условий геометрического и кинематического подобия.

На основании рассмотренных исследований в настоящей работе проводится дальнейшее развитие данного подхода путем количественного сопоставления законов подобия с результатами CFD-моделирования. При этом базовая геометрическая модель, методика гидравлического проектирования и подход к масштабированию основаны на ранее опубликованных работах авторов. Основное внимание в настоящем исследовании уделено сравнению аналитически рассчитанных и CFD-полученных характеристик для четырех расчетных конфигураций, различающихся геометрическим масштабом и частотой вращения рабочего колеса. Это позволяет оценить соответствие масштабных зависимостей результатам численного моделирования для рассмотренных конфигураций.

Материалы и методы. Методика исследования основана на последовательном применении гидравлического расчета, теории подобия и методов вычислительной гидродинамики для оценки влияния масштабирования геометрических параметров и частоты вращения на гидравлические характеристики центробежных насосов. В качестве исходной модели использован центробежный консольный насос, геометрические параметры которого определены на основе ранее разработанной авторами методики гидравлического расчета. На основании законов геометрического, кинематического и динамического подобия сформированы расчетные модели насосов, отличающиеся линейным масштабом и частотой вращения рабочего колеса.

Методологической основой работы стало трехмерное численное моделирование гидродинамических процессов, выполненное в программной среде ANSYS CFX 2023 R2. Для каждой исследованной конфигурации были рассчитаны интегральные параметры, а также детальные поля давлений и скоростей в проточной части. Прямое сопоставление аналитических выкладок с данными CFD-анализа дало возможность четко определить границы применимости законов подобия для насосов различных типоразмеров.

Далее последовательно рассмотрены методика проектирования базовой геометрической модели насоса, формирование расчетных вариантов на основе законов подобия, а также особенности построения численной модели течения и параметры CFD-моделирования.

Проектирование базовой геометрической модели центробежного насоса на основе гидравлического расчета. В качестве базовой модели для последующего исследования использован центробежный консольный насос с расчетными параметрами: подача $Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H = 32 \text{ м}$, частота вращения рабочего колеса $n = 1500 \text{ об/мин}$, мощность $N = 32.7 \text{ кВт}$, кавитационный запас $\text{NPSH} = 3 \text{ м}$ и КПД = 80%. На текущем этапе работы определялись ключевые геометрические размеры проточной части насоса. Полученные параметры легли в основу трехмерной твердотельной модели, что позволило в дальнейшем корректно применить законы гидродинамического подобия.

Геометрические параметры рабочего колеса определялись с использованием разработанной авторами методики гидравлического расчета, основанной на одномерной теории лопастных гидромашин и эмпирических зависимостях для определения основных размеров рабочего колеса. Подробное описание расчетной методики, последовательности определения геометрических параметров и ее верификация представлены в работах авторов (Momysh et al., 2024; Aliuly et al., 2024a).

В результате гидравлического расчета были определены основные геометрические параметры рабочего колеса [таблица 1], включая наружный и входной диаметры, ширину лопаток на входе и выходе, углы установки лопаток, толщину передней и задней кромок, а также размеры ступицы и вала. Полученные параметры использовались при построении трехмерной модели рабочего колеса и остальных элементов проточной части насоса.

Таблица 1. Геометрические параметры базовой модели насоса.

Параметры	Значения
Диаметр вала D_{sh} , [мм]	46.8
Диаметр ступицы D_h , [мм]	61.8
Диаметр входа D_o , [мм]	187.9
Диаметр входа лопасти (середина) D_l , [мм]	131.5
Диаметр колеса D_z , [мм]	296.1
Диаметр входа лопасти (кожух) D_{lshr} , [мм]	187.9
Диаметр входа лопасти (ступица) D_{lh} , [мм]	75.2
Ширина входа лопасти b_l , [мм]	75.4
Ширина выхода лопасти b_z , [мм]	42
Угол входа лопасти (середина) β_{lb} , [°]	19.92
Угол выхода лопасти β_{zb} , [°]	34.53
Угол входа лопасти (кожух) β_{lshr} , [°]	15.07
Угол входа лопасти (ступица) β_{lbh} , [°]	30.01
Толщина передней кромки лопасти δ_l , [мм]	3.9
Толщина задней кромки лопасти δ_z , [мм]	6.2
Радиус входа в улитку r_z , [мм]	171.41
Ширина входа улитки b_z , [мм]	57
Диаметр выходного патрубка d_a , [мм]	150
Расстояние от центра до выхода патрубка L , [мм]	404
Примечание: Составлено авторами на основе результатов расчетов.	

Полученная базовая геометрическая модель была принята в качестве прототипа для формирования масштабированных моделей центробежного насоса на основе законов гидродинамического подобия, рассмотренных в следующем разделе.

Формирование масштабированных моделей центробежного насоса. Для исследования влияния изменения геометрических размеров и частоты вращения на гидравлические характеристики центробежного насоса использована теория гидродинамического подобия. Применение законов подобия позволяет определить параметры проектируемого насоса на основе характеристик базовой модели без выполнения полного гидравлического расчета для каждого нового варианта конструкции.

Разработка расчетных моделей в данном исследовании базировалась на строгом соблюдении трех видов подобия: геометрического, кинематического и динамического. Геометрическое подобие реализовано за счет пропорционального масштабирования линейных размеров проточной части без изменения базовой формы рабочих элементов. Кинематическое подобие выдерживалось путем сохранения соотношений скоростей в потоке, а динамическое – через соблюдение законов пересчета ключевых гидравлических параметров.

Детальный анализ этих условий, а также расчет безразмерных чисел (критериев Рейнольдса, Эйлера, Струхала и Фруда), подробно разобран в работе (Bodau et

al., 2023). Как известно, при жестком выполнении требований геометрического и кинематического подобия главные параметры центробежных насосов строго подчиняются классическим масштабным зависимостям.

В настоящем исследовании использованы классические законы подобия, связывающие подачу, напор и мощность проектируемого насоса с соответствующими параметрами базовой модели:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = K_l^3 \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = K_l^2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad (2)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = K_l^5 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3. \quad (3)$$

где Q_1 и Q_2 – подачи базовой и проектируемой моделей, соответственно, м³/ч; H_1 и H_2 – соответствующие значения напора, м; N_1 и N_2 – потребляемая мощность, кВт; n_1 и n_2 – частоты вращения рабочего колеса, об/мин; $K_l = D_2/D_1$ – линейный коэффициент геометрического масштабирования, определяемый отношением характерных размеров рабочего колеса проектируемой и базовой моделей.

При этом в соответствии с классическими законами подобия коэффициент полезного действия при сохранении условий подобия принимается неизменным. Поэтому для всех четырех расчетных вариантов при аналитическом проектировании было принято $\eta = 80\%$. В дальнейшем полученные значения напора, мощности и КПД сопоставлялись с результатами CFD-моделирования для оценки точности масштабных зависимостей.

Опираясь на приведенные зависимости, для численного анализа были отобраны четыре конфигурации центробежного насоса (таблица 2 и 3). За базовую модель (вариант 1) принята конструкция, спроектированная по результатам исходного гидравлического расчета. Остальные три версии получены путем модификации базовых параметров. Так, во втором варианте геометрия проточной части уменьшена вдвое при неизменных оборотах вала, тогда как в третьем – сохранены исходные габариты, но частота вращения увеличена в два раза. Четвертая конфигурация носит комбинированный характер: в ней двукратное масштабное уменьшение размеров сочетается с повышением частоты вращения до 3000 об/мин.

Таблица 2. Основные данные проектированных насосов.

Показатели насоса	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Подача Q , [м ³ /ч]	300	37.5	600	75
Напор H , [м]	32	8	128	32
Частота вращения n , [об/мин]	1 500	1 500	3 000	3 000
Мощность N , [кВт]	32.7	1.02	261.6	8.18
КПД η , [%]	80	80	80	80
$NPSH$, [м]	3	-	12	12
Примечание: Составлено авторами на основе результатов расчетов.				

Таблица 3. Геометрические параметры проектированных насосов.

Параметры	Варианты 1 и 3	Варианты 2 и 4
Диаметр вала D_{sh} , [мм]	46.8	23.4
Диаметр ступицы D_{jh} , [мм]	61.8	30.9
Диаметр входа D_{θ} , [мм]	187.9	93.95
Диаметр входа лопасти (середина) D_{j} , [мм]	131.5	65.75
Диаметр колеса D_2 , [мм]	296.1	148.05
Диаметр входа лопасти (кожух) D_{lshr} , [мм]	187.9	93.95
Диаметр входа лопасти (ступица) D_{ljb} , [мм]	75.2	37.6
Ширина входа лопасти b_{j} , [мм]	75.4	37.6
Ширина выхода лопасти b_{2} , [мм]	42	21
Угол входа лопасти (середина) β_{lb} , [°]	19.92	19.92
Угол выхода лопасти β_{2b} , [°]	34.53	34.53
Угол входа лопасти (кожух) β_{lshr} , [°]	15.07	15.07
Угол входа лопасти (ступица) β_{ljb} , [°]	30.01	30.01
Толщина передней кромки лопасти δ_j , [мм]	3.9	1.95
Толщина задней кромки лопасти $\delta_{j'}$, [мм]	6.2	3.1
Примечание: Составлено авторами на основе результатов расчетов.		

Для каждого расчетного варианта была построена отдельная трехмерная модель проточной части насоса, на основе которой выполнено численное моделирование внутренних течений. Полученные результаты использовались для оценки применимости законов подобия и сравнения аналитически рассчитанных и CFD-полученных гидравлических характеристик. В рамках настоящего исследования рассмотрены четыре расчетные конфигурации, различающиеся геометрическим масштабом и частотой вращения; для каждой конфигурации анализировалась одна расчетная рабочая точка.

Численное моделирование течения в центробежном насосе. Для оценки гидравлических характеристик исследуемых моделей насосов выполнено трехмерное численное моделирование течения жидкости с использованием программного комплекса ANSYS CFX 2023 R2. Расчеты проводились в стационарной постановке на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) (Menter, 1994). Численная модель включала все основные элементы проточной части насоса (рисунок 1): входной патрубок, рабочее колесо, спиральный отвод и выходной патрубок.

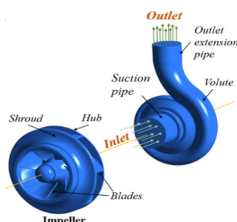


Рисунок 1. Вычислительная область центробежного насоса.

Каждый элемент проточной части выделялся в самостоятельный расчетный домен. В единую модель они объединялись уже в препроцессоре ANSYS CFX 2023 R2 с помощью стандартных интерфейсов между вращающимся ротором и неподвижными статорными зонами.

Расчетная сетка формировалась в модуле ANSYS Meshing 2023 R2 (рисунок 2). Для дискретизации проточной области использовалась неструктурированная тетраэдральная сетка с локальным сгущением на поверхностях лопаток рабочего колеса. Общая размерность сетки составила порядка 4 млн элементов для полноразмерного насоса и 1,9 млн – для его масштабированной версии. Формальный анализ сеточной независимости и количественная оценка дискретизационной неопределенности в настоящей работе не выполнялись.

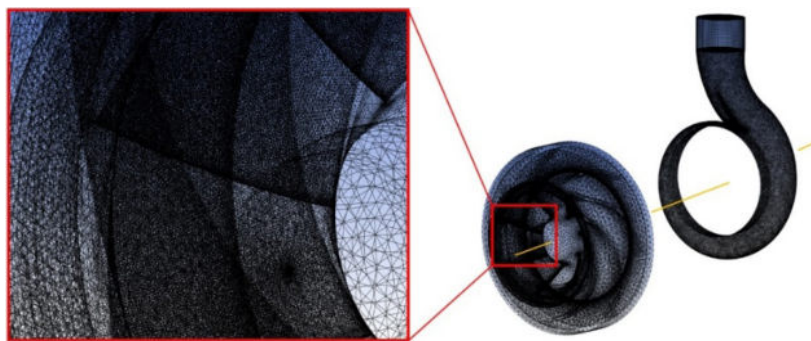


Рисунок 2. Вычислительная сетка расчетной области.

Для моделирования турбулентного режима была выбрана двухпараметрическая модель SST $k - \omega$. Ее ключевое достоинство заключается в комбинировании подходов: вдали от стен расчет ведется по модели $k - \epsilon$, а в пристеночной зоне – по $k - \omega$. Именно поэтому данный инструмент стал стандартом при расчете лопастных гидромашин, где критически важно точно разрешить пограничный слой и вовремя зафиксировать возможные зоны отрыва потока.

На входе расчетной области задавалось полное давление, соответствующее условиям (NPSH) каждого расчетного варианта. На выходе задавался массовый расход (Q), рассчитанный на основе законов подобия. Рабочее колесо вращалось с частотой 1500 или 3000 об/мин в зависимости от рассматриваемого случая. Интерфейс между вращающейся и неподвижными областями реализован по схеме Frozen Rotor. Схема Frozen Rotor выбрана для выполнения стационарного сравнительного анализа гидравлических характеристик исследуемых расчетных конфигураций. Кавитационное моделирование в настоящем исследовании не проводилось.

Настройки решателя:

- стационарный расчет;
- High Resolution;
- критерий RMS 10^{-4} ;

- вода при 25°C;
- ускорение свободного падения.

Следует отметить, что применяемая CFD-методика ранее была проверена авторами путем сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными производителя для центробежного насоса (Aliuly et al., 2024a). Полученные в указанной работе результаты показали приемлемое соответствие расчетных и экспериментальных гидравлических характеристик. В настоящем исследовании данная CFD-методика применяется для сравнительного анализа четырех расчетных конфигураций, полученных путем изменения геометрического масштаба и частоты вращения. При этом непосредственная экспериментальная проверка масштабированных вариантов, рассмотренных в настоящей работе, не проводилась.

Раскрытие использования инструментов искусственного интеллекта. При подготовке рукописи использовались инструменты искусственного интеллекта Elicit и ChatGPT (GPT-5.6 Luna, OpenAI). Elicit использовался для поиска, систематизации и предварительного обзора научных публикаций по тематике исследования. ChatGPT использовался в качестве вспомогательного инструмента для языкового редактирования текста, структурирования рукописи и подготовки аннотаций на русском, казахском и английском языках. Все научные положения, исходные данные, результаты численного моделирования, их интерпретация, библиографические сведения и окончательный текст рукописи были проверены авторами. Авторы несут полную ответственность за содержание и достоверность представленной работы.

Результаты. Для оценки применимости законов подобия были сопоставлены гидравлические характеристики, рассчитанные аналитически на основе масштабных зависимостей, с результатами CFD-моделирования (таблица 4). В соответствии с законами подобия предполагалось, что гидравлический КПД остается неизменным и составляет 80 % для всех исследуемых моделей. Однако результаты CFD-моделирования показали, что расчетный гидравлический КПД изменяется в зависимости от рассматриваемой конфигурации.

Таблица 4. Сравнение расчетных и CFD-полученных гидравлических характеристик исследуемых моделей насосов.

Вариант	$H_{\text{теор}}, \text{ м}$	$H_{\text{CFD}}, \text{ м}$	$\Delta H, \%$	$N_{\text{теор}}, \text{ кВт}$	$N_{\text{CFD}}, \text{ кВт}$	$\Delta N, \%$	$\text{КПД}_{\text{CFD}}, \%$
1	32	29.8	6.8	32.7	28.1	14.1	86.7
2	8	7.0	12.5	1.02	0.9	11.8	81.7
3	128	119.6	6.6	261.6	225.2	13.9	86.8
4	32	28.2	11.9	8.2	7.0	14.6	81.9

Примечание: Составлено авторами на основе результатов расчетов.

Сопоставление данных показало в целом хорошую сходимость между аналитическими формулами и результатами 3D-моделирования. Наибольшее соответствие аналитических расчетов результатам CFD-моделирования зафиксировано для полноразмерных конфигураций (варианты 1 и 3), где

погрешность по напору не превышает 6,6–6,8 %. Однако при переходе к уменьшенным геометриям (варианты 2 и 4) расхождение заметно увеличивается – до 11,9–12,5 %. Полученные результаты показывают, что при уменьшении масштаба в рассмотренных конфигурациях расхождение между аналитическими расчетами и результатами CFD-моделирования увеличивается.

Интересные результаты получены при анализе гидравлического КПД. Численное моделирование дало более оптимистичные оценки по сравнению с базовыми 80 %, заложенными в аналитическом расчете. У полноразмерных машин расчетный КПД достиг 86,7–86,8 %, однако при уменьшении геометрии он упал до 81,7–81,9 %. Показательно, что двукратный рост оборотов (с 1500 до 3000 об/мин) на эффективность практически не повлиял, тогда как одно лишь масштабирование размеров «срезало» КПД почти на 5 %.

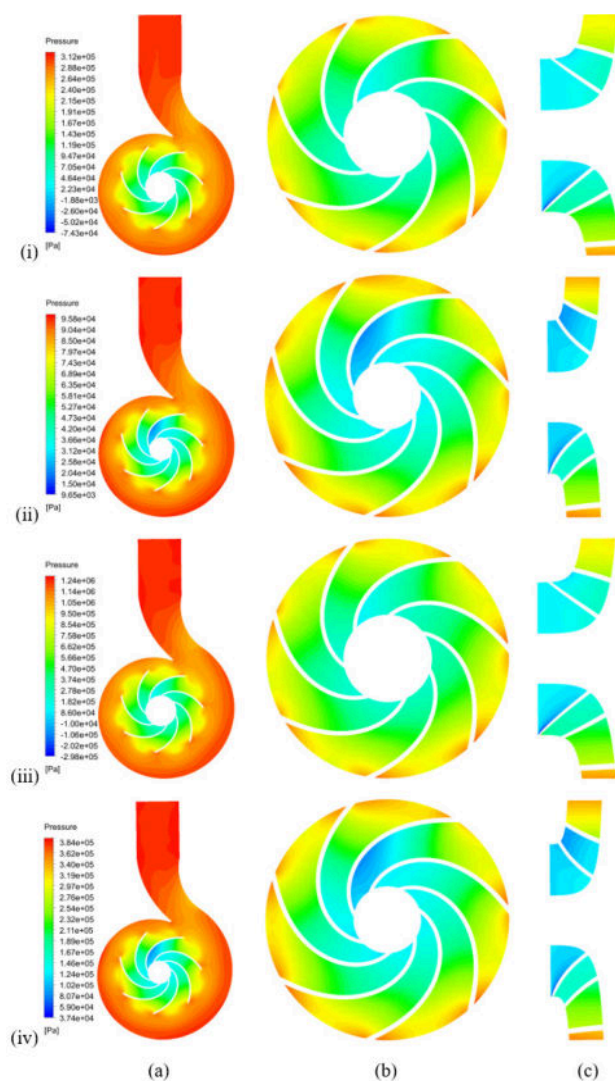
Что касается потребляемой мощности, то отклонение теории от данных 3D-моделирования стабильно держалось в коридоре 11,8–14,6 % для всех четырех случаев. Такой ровный уровень расхождения говорит о том, что масштабные формулы адекватно предсказывают тренд изменения мощности, но «не видят» дополнительных внутренних потерь, которые неизбежно возникают из-за перестроения структуры потока.

Подводя итоги, можно утверждать: законы гидродинамического подобия остаются надежным инструментом для эскизного проектирования и быстрой прикидки характеристик. Однако нужно учитывать важную оговорку: чем сильнее мы уменьшаем насос, тем сильнее теория расходится с реальностью (CFD-анализом). Это прямо указывает на ограничения классических формул. Поэтому при разработке компактных моделей использование CFD-моделирования становится не просто желательным, а необходимым шагом для верификации и уточнения проектных данных.

Анализ структуры потока в проточной части насоса. Для качественной оценки особенностей структуры течения в проточной части насоса были рассмотрены поля давлений, распределения скоростей и векторы скорости. Сопоставление полученных результатов позволяет оценить влияние изменения геометрического масштаба и частоты вращения рабочего колеса на характер течения в исследуемых расчетных конфигурациях.

Поля статического давления в проточной части для всех рассмотренных конфигураций показаны на рисунке 3. Закономерно, что зоны минимального давления стабильно локализуются у входных кромок лопастей – именно там поток испытывает максимальное локальное ускорение. Далее, по мере продвижения жидкости по межлопаточным каналам, давление плавно нарастает за счет силовой работы колеса. Своего максимума оно достигает уже в спиральном отводе, который работает как диффузор, переводя скоростной напор (кинетическую энергию) в статическое давление.

Важно отметить специфику масштабирования: при уменьшении габаритов насоса локальные градиенты давления становятся более резкими, а общая картина поля давлений в проточной части заметно теряет свою равномерность.

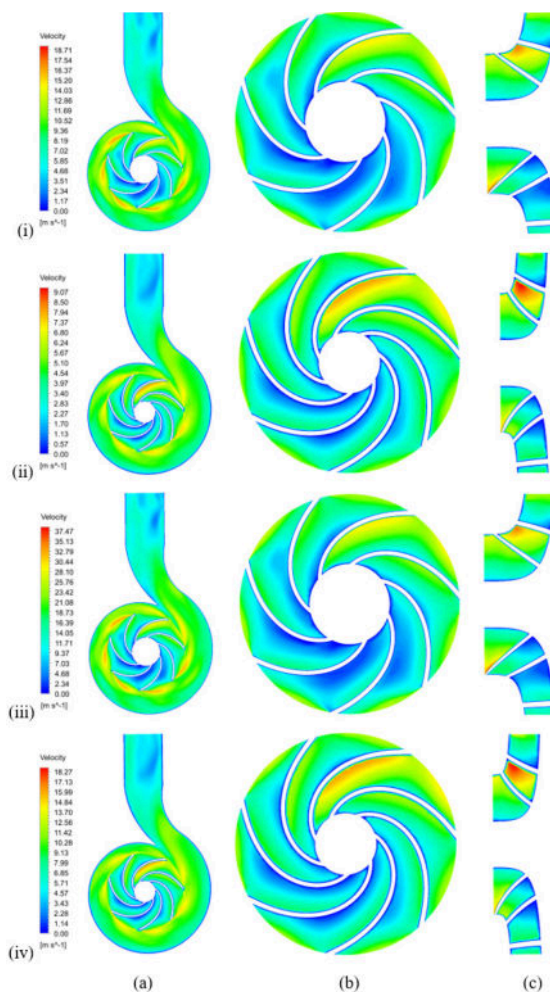


(i) вариант 1; (ii) вариант 2; (iii) вариант 3; (iv) вариант 4.

Рисунок 3. Распределение контура давления в радиальном сечении насоса (a) и рабочего колеса (b, c).

Поля скоростей для всех исследуемых конфигураций представлены на рисунке 4. Ожидается, зоны максимальных скоростей локализованы внутри межлопаточных каналов рабочего колеса – именно здесь механическая энергия вращения передается жидкости, разгоняя поток. Покидая колесо и попадая в спиральный отвод, жидкость тормозится за счет диффузорного эффекта (плавного расширения проходного сечения). Сопоставление расчетных вариантов выявило важную гидродинамическую особенность. Варьирование оборотов вала практически не влияет на общую топологию течения – характер

распределения скоростей сохраняется. Однако при уменьшении геометрического масштаба структура потока заметно искажается: кинематическое поле теряет свою равномерность, и в проточной части возникают локальные зоны резкого ускорения.

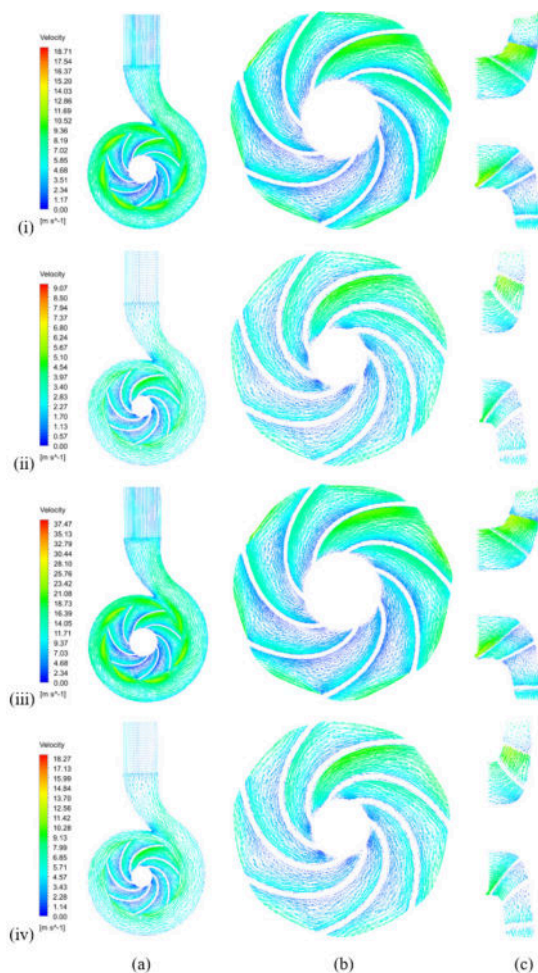


(i) вариант 1; (ii) вариант 2; (iii) вариант 3; (iv) вариант 4.

Рисунок 4. Распределение контура скорости в радиальном сечении насоса (a) и рабочего колеса (b, c).

Визуализация линий тока (рисунок 5) дает наглядное представление о кинематике течения внутри насоса. Во всех расчетных вариантах на представленных полях не наблюдаются явно выраженные области нарушения структуры потока. Однако при масштабировании геометрии в меньшую сторону картина меняется: на выходе из рабочего колеса и в спиральном отводе заметно интенсифицируются вторичные течения, а сам поток становится менее

однородным. По всей видимости, именно эти локальные гидродинамические эффекты провоцируют падение гидравлического КПД и объясняют растущую погрешность между классической аналитикой и CFD-расчетом.



(i) вариант 1; (ii) вариант 2; (iii) вариант 3; (iv) вариант 4.

Рисунок 5. Распределение векторов скорости в радиальном сечении насоса (a) и рабочего колеса (b, c).

Сопоставление полей давления, скоростей и векторов скорости показывает, что в рассмотренных расчетных конфигурациях изменение геометрического масштаба оказывает более выраженное влияние на структуру течения, чем изменение частоты вращения рабочего колеса. Выявленные особенности могут быть связаны с различиями в интегральных гидравлических характеристиках насоса и расхождениями между аналитическими оценками, полученными по законам подобия, и результатами CFD-моделирования.

Следует отметить, что представленный анализ структуры течения носит преимущественно качественный характер; количественная оценка неравномерности скорости, локальных потерь, зон рециркуляции и генерации энтропии в настоящем исследовании не проводилась.

Обсуждение. Анализ интегральных характеристик и структуры потока показывает, что в рассмотренных расчетных конфигурациях изменение геометрического масштаба сопровождается увеличением расхождения между аналитическими и CFD-результатами. Даже при соблюдении геометрического и кинематического подобия уменьшение размеров сопровождается изменением структуры течения и гидравлических характеристик.

Следует отметить, что количественная оценка неопределенности численного моделирования и отдельный анализ чувствительности результатов к параметрам расчетной постановки в настоящем исследовании не проводились. Поэтому выявленные расхождения следует рассматривать как результат совокупного влияния геометрического масштабирования и особенностей принятой численной модели.

Таким образом, классические законы подобия сохраняют свою актуальность для этапа эскизного проектирования, обеспечивая приемлемую точность предварительных оценок. Тем не менее, для разработки уменьшенных моделей одной аналитики недостаточно: риск существенной погрешности требует обязательной верификации характеристик методами CFD. Интеграция аналитических расчетов с численным моделированием – наиболее эффективная стратегия, позволяющая не только повысить точность проекта, но и глубоко понять физику течения в проточной части при масштабировании насоса.

Следует отметить, что полученные результаты характеризуют только рассмотренный диапазон расчетных условий. В настоящей работе исследованы два геометрических масштаба (1 и 0,5), две частоты вращения (1500 и 3000 об/мин) и по одной расчетной рабочей точке для каждого варианта. Поэтому полученные значения расхождений не следует рассматривать как универсальную границу применимости законов подобия. Для установления количественной зависимости точности масштабных зависимостей от геометрического масштаба, режима работы и числа Рейнольдса необходимы дополнительные расчетные варианты и исследование рабочих характеристик насоса в диапазоне подач.

Заключение. В работе выполнена оценка применимости законов подобия при проектировании центробежных насосов на основе комплексного подхода, объединяющего гидравлический расчет, масштабирование геометрических параметров и трехмерное CFD-моделирование. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. На основе ранее разработанной методики гидравлического расчета сформирована базовая геометрическая модель центробежного насоса, которая использована в качестве прототипа для построения масштабированных моделей с различными геометрическими размерами и частотами вращения рабочего колеса.

2. Сравнение аналитических расчетов, выполненных по законам подобия, с результатами CFD-моделирования показало их удовлетворительную согласованность. Для моделей исходного масштаба относительное отклонение расчетного напора составило 6,6–6,8 %, тогда как для уменьшенных моделей оно увеличилось до 11,9–12,5 %.

3. В рассмотренных расчетных конфигурациях изменение геометрического масштаба сопровождалось более заметным изменением гидравлических характеристик насоса, чем изменение частоты вращения рабочего колеса. При этом влияние числа Рейнольдса не исследовалось изолированно, поэтому его вклад в выявленные расхождения не может быть количественно определен на основании проведенных расчетов. При уменьшении линейных размеров наблюдается снижение гидравлического КПД примерно на 5 процентных пунктов, тогда как увеличение частоты вращения практически не влияет на его величину.

4. Анализ распределений давления, скорости и структуры течения показал, что уменьшение геометрического масштаба сопровождается увеличением неравномерности течения и локальных гидравлических потерь, что является одной из причин увеличения расхождения между аналитическими расчетами и результатами CFD-моделирования.

5. Полученные результаты относятся к четырем рассмотренным расчетным конфигурациям и не позволяют установить универсальные границы применимости законов подобия. Для определения количественной зависимости расхождений от геометрического масштаба и режима работы требуется расширение диапазона исследуемых масштабов и рабочих режимов.

References

Agarwal R., Patil A., Morrison G. (2020). Efficiency prediction of centrifugal pump using the modified affinity laws. *Journal of Energy Resources Technology*. – Vol. 142 (3). – P. 032102. <https://doi.org/10.1115/1.4044940> (in Eng.).

Aliuly A., Amanzholov T., Seitov A., Momysh N., Jaichibekov N., Kaltayev A. (2024a). Hydraulic design and CFD-based parametric study for optimizing centrifugal pump impeller performance. *Applied Sciences*. – Vol. 14 (22). – P. 10161. <https://doi.org/10.3390/app142210161> (in Eng.).

Aliuly A., Seitov A., Kaltayev A. (2024b). Hydrodynamic modelling and analysis of single-stage single-suction centrifugal pump. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*. – Springer. – Vol. 167. – P. 381–389. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_43 (in Eng.).

Bodau B.B., Bazarlinov Zh., Belyaev E.K., Toleukhanov A.A., Kaltayev A. (2023). Uqsastyq adisin paydalanyp tsentrden tepkish sorghy satysynyn zhumys dongelegin zhovalau [Design of the impeller of a centrifugal pump stage using the similarity method]. *International Satbayev Conference*. – Vol. 3. – P. 132–147. <https://doi.org/10.51301/ISC.2023.v3.23> (in Kaz.).

Cao W., Wang H., Yang X., Leng X. (2023). Optimization of guide vane centrifugal pumps based on response surface methodology and study of internal flow characteristics. *Journal of Marine Science and Engineering*. – Vol. 11 (10). – P. 1917. <https://doi.org/10.3390/jmse11101917> (in Eng.).

Chen J., Shi W., Zhang D. (2021). Influence of blade inlet angle on the performance of a single blade centrifugal pump. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – Vol. 15 (1). – P. 462–475. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1868341> (in Eng.).

Hassan A.F.S.A., Hashish A., Saleh S. (2024). Simulation based design tool for radial impellers of

centrifugal pumps. *Scientific Reports*. – Vol. 14. – P. 13014. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62808-3> (in Eng.).

Hundshagen M., Casimir N., Pesch A., Falsafi S., Skoda R. (2020). Assessment of scale-adaptive turbulence models for volute-type centrifugal pumps at part load operation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – Vol. 85. – P. 108621. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108621> (in Eng.).

Kearney D., Grimes R., Punch J. (2009). An experimental investigation of the flow fields within geometrically similar miniature-scale centrifugal pumps. *Journal of Fluids Engineering*. – Vol. 131 (10). – P. 101101. <https://doi.org/10.1115/1.3176985> (in Eng.).

Li H., Chen Y., Yang Y., Wang S., Bai L., Zhou L. (2023). CFD simulation of centrifugal pump with different impeller blade trailing edges. *Journal of Marine Science and Engineering*. – Vol. 11 (2). – P. 402. <https://doi.org/10.3390/jmse11020402> (in Eng.).

Li H., Han Y., Shi W., Tiganik T., Zhou L. (2022). Automatic optimization of centrifugal pump based on adaptive single-objective algorithm and computational fluid dynamics. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – Vol. 16 (1). – P. 2222-2242. <https://doi.org/10.1080/19942060.2022.2143901> (in Eng.).

Menter F.R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. – Vol. 32 (8). – P. 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149> (in Eng.).

Momysh N., Amanzholov T., Jaichibekov N., Aliuly A., Seitov A., Bazarlinov Zh., Kaltayev A. (2024). Hydraulic calculation and structural design of the single-stage centrifugal pump impeller. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*. – Springer. – Vol. 167. – P. 361-370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_41 (in Eng.).

Morrison G., Yin W., Agarwal R., Patil A. (2018). Development of modified affinity law for centrifugal pump to predict the effect of viscosity. *Journal of Energy Resources Technology*. – Vol. 140 (9). – P. 092005. <https://doi.org/10.1115/1.4039874> (in Eng.).

Nguyen D.-A., Roh M.-S., Kim S., Kim J.-H. (2023). Hydrodynamic and radial force characteristics with design of a single-channel pump for wastewater treatment based on the similarity law. *Process Safety and Environmental Protection*. – Vol. 170. – P. 590-601. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.090> (in Eng.).

Patil A., Yin W., Agarwal R., Delgado A., Morrison G. (2019). Extending classical friction loss modeling to predict the viscous performance of pumping devices. *Journal of Fluids Engineering*. – Vol. 141 (10). – P. 101202. <https://doi.org/10.1115/1.4043162> (in Eng.).

Rosa H.M.P., Brito R.F., Tibiriça Á.M.B., Campos J.C.C., Chohfi F.M. (2024). Comparison between CFD simulation and affinity laws and analysis of the degree of reaction. *Acta Scientiarum. Technology*. – Vol. 46 (1). – P. e64413. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v46i1.64413> (in Eng.).

Wang C., Yao Y., Yang Y., Chen X., Wang H., Ge J., Cao W., Zhang Q. (2023). Automatic optimization of centrifugal pump for energy conservation and efficiency enhancement based on response surface methodology and computational fluid dynamics. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – Vol. 17 (1). – P. 2227686. <https://doi.org/10.1080/19942060.2023.2227686> (in Eng.).

Wang C.N., Yang F.C., Nguyen V.T.T., Vo N.T.M. (2022). CFD analysis and optimum design for a centrifugal pump using an effectively artificial intelligent algorithm. *Micromachines*. – Vol. 13 (8). – P. 1208. <https://doi.org/10.3390/mi13081208> (in Eng.).

Zhang L., Wang X., Wu P., Huang B., Wu D. (2023). Optimization of a centrifugal pump to improve hydraulic efficiency and reduce hydro-induced vibration. *Energy*. – Vol. 268. – P. 126677. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126677> (in Eng.).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty)

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 National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described 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 National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan 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 originality detection service Cross Check <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 National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Requirements for articles design for publication in the journal are available on the websites:

www.nauka-nanrk.kz

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

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Managing Editor: T. Apendiev
Editors: D.S. Alenov, A.Shormakova
Computer layout: G.D. Zhadyranova

Signed for print: September 29, 2026
Format: 70×90 1/16. 34.5 printed sheets. Order No. 3.

*«Central Asian Academic Research Center» LLP
Almaty, Shevchenko Street, 28*