

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%2638>; <https://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 Рахметқажы 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), (Дэжон, 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., Айтүреев 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., Абилямжинова 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., Нажипқызы М., Өтенов Ә., Сейтқазинаева 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
Курмангалиева А., Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. ПДМА-модифицированный таганский бентонит для получения водорода при каталитической конверсии углеводов.....	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

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 3.
Number 359 (2026), 60–82

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.463>

UDC: 532.51
IRSTI: 29.05.03

©Seitov A.^{1,2*}, Amanzholov T.^{1,2}, 2026.

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: seitov.abzal9@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF ONE-DIMENSIONAL PHYSICAL- HYDRODYNAMIC MODELS OF CENTRIFUGAL FLOW IN IMPELLER FOR MINERALIZED MEDIA

Seitov Abzal — PhD student, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: seitov.abzal9@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7317-3047>;

Amanzholov Tangnur — PhD student, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: tannur.amanzholov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7386-9717>.

Abstract. One-dimensional methods used at the initial stage of centrifugal pump impeller design make the calculation considerably simpler, but different methods can give noticeably different results. This is particularly important for pumps handling seawater, since the dimensions of the impeller flow passage under such operating conditions may differ from recommendations developed for clean water. In this study, calculations obtained using the Gülich–Pfleiderer, Ivanovsky, Spiridonov, and Karassik methods, as well as the Cordier diagram, were compared. The actual geometric parameters of the CHP 150–315/1500 cantilever centrifugal pump designed for seawater transportation were used as the reference data. The comparison was based mainly on the impeller outer diameter, the outlet width of the blade passage, and the blade outlet angle. The calculations showed that none of the considered methods reproduced all parameters of the actual impeller with the same accuracy. The largest differences were found for the blade passage width, for which the calculated values were approximately 30–45% lower than the reference value. The Gülich–Pfleiderer and Karassik methods provided the closest results for the impeller outer diameter. The Ivanovsky and Spiridonov methods gave a better agreement in determining the blade outlet angles. The obtained results indicate that a single one-dimensional method is not sufficient for determining the complete initial geometry of an impeller for seawater pumping. A more suitable approach is to combine the results of several design methods when selecting the main geometric parameters. The resulting preliminary geometry can then be checked and

adjusted using CFD modeling, taking into account the actual operating conditions of the pump and the properties of the transported liquid.

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: Seitov A., Amanzholov T. Comparative Analysis of One-Dimensional Physical-Hydrodynamic Models of Centrifugal Flow in an Impeller for Mineralized Media. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.3. Pp. 60–82. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.463>

©Сейтов А.Н.^{1,2*}, Аманжолов Т.Е.^{1,2}, 2026.

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: seitov.abzal9@gmail.com

МИНЕРАЛДАНҒАН ОРТАЛАРҒА АРНАЛҒАН ЖҰМЫС ДӨНГЕЛЕГІНДЕГІ ОРТАДАН ТЕПКІШ АҒЫСТЫҢ БІРӨЛШЕМДІ ФИЗИКАЛЫҚ–ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Сейтов Абзал — PhD докторант, аға оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: seitov.abzal9@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7317-3047>;

Аманжолов Таңнұр — PhD докторант, аға оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: tannur.amanzholov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7386-9717>.

Аннотация. Ортадан тепкіш сораптың жұмыс дөңгелегін бастапқы жобалау кезінде қолданылатын бірөлшемді әдістемелер есептеу процесін жеңілдетуге және негізгі геометриялық параметрлерді қысқа уақытта анықтауға мүмкіндік береді. Дегенмен әртүрлі әдістемелерде қолданылатын эмпирикалық коэффициенттер мен жобалау ұсыныстарының айырмашылығы алынатын нәтижелердің өзара сәйкестігіне әсер етеді. Бұл мәселе теңіз суын тасымалдауға арналған сораптарды жобалау кезінде ерекше маңызды, себебі мұндай жұмыс ортасының қасиеттері таза суға арналған дәстүрлі есептік тәуелділіктерден өзгеше және жұмыс дөңгелегінің протокалық бөлігінің өлшемдерін таңдауға әсер етеді. Осы жұмыстың мақсаты – ортадан тепкіш сораптың жұмыс дөңгелегін есептеуде қолданылатын классикалық бірөлшемді әдістемелердің нәтижелерін салыстыру және олардың нақты сорап геометриясына сәйкестігін бағалау. Зерттеу барысында Gülich–Pfleiderer, Ивановский, Спиридонов, Karassik әдістемелері және Cordier диаграммасы

бойынша есептеулер орындалды. Алынған нәтижелер теңіз суын тасымалдауға арналған СНР 150–315/1500 консольді сорабының нақты геометриялық және кинематикалық параметрлерімен салыстырылды. Салыстыру кезінде жұмыс дөңгелегінің сыртқы диаметрі, шығу бөлігіндегі қалақаралық арнаның ені және қалақтардың орнату бұрышы сияқты негізгі параметрлер қарастырылды. Есептеулер бірде–бір әдістеменің жұмыс дөңгелегінің барлық параметрлерін бірдей дәлдікпен анықтай алмайтынын көрсетті. Ең үлкен айырмашылық қалақаралық арнаның ені бойынша байқалды: есептік мәндер нақты мәндерден шамамен 30–45 % төмен болды. Сыртқы диаметрді анықтауда Gülich–Pfleiderer және Karassik әдістемелері, ал қалақтардың орнату бұрыштарын есептеуде Ивановский мен Спиридонов әдістемелері нақты геометрияға жақынырақ нәтиже көрсетті. Алынған нәтижелер жұмыс дөңгелегінің бастапқы геометриясын қалыптастыру кезінде бірнеше әдістеменің артықшылықтарын бірге пайдаланудың тиімділігін көрсетеді. Қалыптастырылған бастапқы геометрияны кейін CFD–модельдеу арқылы тексеріп, сораптың нақты жұмыс жағдайларына сәйкес түзетуге болады.

Түйін сөздер: ортадан тепкіш сорап, жұмыс дөңгелегі, бірөлшемді теория, гидравликалық есептеу, жобалау әдістері, теңіз суын тасымалдау, CFD

©Сейтов А.Н.^{1,2*}, Аманжолов Т.Е.^{1,2}, 2026.

¹Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
*E-mail: seitov.abzal9@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОДНОМЕРНЫХ ФИЗИКО– ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТЕЧЕНИЯ В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ ДЛЯ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ СРЕД

Сейтов Абзал — PhD докторант, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: seitov.abzal9@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7317-3047>;

Аманжолов Таңнұр — PhD докторант, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: tannur.amanzholov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7386-9717>.

Аннотация. Одномерные методики, применяемые на начальном этапе проектирования рабочего колеса центробежного насоса, позволяют существенно упростить расчет, однако результаты, получаемые по различным методам, могут заметно отличаться. Особенно это проявляется при проектировании насосов для перекачивания морской воды, поскольку размеры проточной части рабочего колеса в таких условиях могут отличаться от рекомендаций, разработанных для чистой воды. В работе проведено сопоставление расчетов по методикам Gülich–Pfleiderer, Иванковского, Спиридонова, Karassik и диаграмме Cordier. В качестве исходных данных для сравнения использованы реальные геометрические параметры консольного центробежного насоса СНР 150–315/1500, предназначенного для

перекачивания морской воды. Основными параметрами сравнения выбраны наружный диаметр рабочего колеса, ширина межлопаточного канала на выходе и угол установки лопаток. Проведенные расчеты показали, что ни одна из рассмотренных методик не воспроизводит с одинаковой точностью все параметры реального рабочего колеса. Наиболее значительные расхождения получены для ширины межлопаточного канала: расчетные значения оказались примерно на 30–45 % меньше фактического значения. По наружному диаметру наиболее близкие к реальному насосу результаты получены по методикам Gülich–Pfleiderer и Karassik. При определении углов установки лопаток лучшее соответствие показали методики Иванковского и Спиридонова. Полученные результаты показывают, что при начальном проектировании рабочего колеса целесообразно использовать не одну расчетную методику, а сочетать результаты нескольких подходов. Сформированная таким образом базовая геометрия, может быть, в дальнейшем проверена и скорректирована с использованием CFD–моделирования с учетом конкретных условий работы насоса и свойств перекачиваемой жидкости.

Ключевые слова: центробежный насос, рабочее колесо, одномерная теория, гидравлический расчет, методы проектирования, перекачивание морской воды, CFD

Введение. Центробежные насосы обладают простой и надежной конструкцией, легко адаптируются к разнообразным условиям эксплуатации и являются наиболее широко используемым оборудованием в таких сферах, как водоснабжение, автомобилестроение, аэрокосмическая отрасль, нефтедобыча и энергетика. Выполняя функцию транспортировки различных типов жидкостей за счет преобразования механической энергии двигателя в кинетическую энергию потока, они потребляют около 10% от всей производимой в мире электроэнергии. Современные требования к энергосбережению делают разработку высокоэффективных насосов (в частности, типа СНР) критически важной задачей.

Ключевым и наиболее ответственным элементом центробежного насоса выступает рабочее колесо. Повышение его гидравлической эффективности напрямую ведет к снижению общего энергопотребления агрегата. Однако создание новой высокоэффективной модели традиционно представляет собой трудоемкий процесс, включающий сложный цикл первоначального проектирования, вычислительного моделирования, физического тестирования и длительных итеративных модификаций.

В связи с этим, целью данного исследования является комплексное сравнение методик проектирования рабочего колеса центробежного насоса типа СНР. Путем сопоставления традиционных аналитических подходов с современными методами гидродинамического профилирования и алгоритмической оптимизации планируется выявить наиболее эффективный и наименее ресурсоемкий алгоритм разработки. Решение этой задачи позволит существенно повысить качество проектирования, сократить время внедрения новых моделей и обеспечить высокий уровень их энергоэффективности.

Литературный обзор. Исторически базовым фундаментом для расчета проточной части любых лопастных гидромашин является основное уравнение, связывающее теоретический напор с изменением момента количества движения жидкости. В современной инженерной практике одномерная теория потока, базирующаяся на уравнениях Эйлера, остается наиболее удобным, простым и широко применяемым инструментом при проектировании рабочих колес центробежных насосов на производстве. В рамках данной теории поток в меридиональной плоскости принимается симметричным и осредненным, что позволяет определять главные кинематические параметры (Momysh et al., 2024). При оптимизации рабочего колеса по одномерной теории наиболее значимыми геометрическими параметрами выступают угол выхода лопасти (обычно варьирующийся в диапазоне от 15° до 40°) и угол охвата лопасти (от 90° до 130°).

Классическое уравнение Эйлера выведено для идеализированного колеса с бесконечным числом бесконечно тонких лопастей. В реальных насосах с конечным числом лопаток возникает явление «отставания» или скольжения потока (slip), из-за которого фактический напор оказывается ниже теоретического. Для компенсации этого эффекта в традиционное проектирование вводятся коэффициенты скольжения. Наибольшее распространение получили теоретические и полуэмпирические поправки Стодола (Stodola, 1927), точное аналитическое решение Буземана (Busemann, 1928) для логарифмических спиралей, а также универсальная эмпирическая формула Визнера (Wiesner, 1967), которая до сих пор активно применяется в алгоритмах первичного проектирования.

Развитие насосостроения привело к созданию нескольких фундаментальных школ проектирования, опирающихся на статистические данные и теорию подобия:

- Методика Степанова: Первоначальное проектирование моделей насосов традиционно опирается на классическую полуэмпирическую теорию Степанова (Stepanoff, 1957). Этот метод использует теорию подобия и эмпирические коэффициенты (диаграммы коэффициентов расхода и напора в зависимости от коэффициента быстроходности N_s), полученные на основе испытаний исторических моделей.

- Методика Пфлейдерера: параллельно сформировался аналитический подход европейской школы (Pfleiderer, 1961). Метод Пфлейдерера уделяет особое внимание расчету оптимальных площадей проходных сечений, плавному построению меридионального профиля и включает собственный метод учета поправки на конечное число лопастей.

- Методика Лобанова и Росса: для насосов нефтяной, химической и судовой промышленности часто применяется метод Лобанова (Lobanoff and Ross, 1992).

- Комплексная методика Гюлиха: одним из наиболее полных современных обобщений традиционных методов является подход Гюлиха (Gulich, 2014).

Важным этапом развития стала трехмерная теория (Wu, 1952), также известная как теория поверхностей относительного потока S1 (от лопасти к лопасти) и S2 (от ступицы к покрывному диску). В этом методе сложный трехмерный поток математически конвертируется в два взаимосвязанных двумерных потока. На базе

теории Ву сформировалась квазитрехмерная (Q3D) методика проектирования, ставшая отраслевым стандартом до повсеместного внедрения CFD (Brennen, 1994). Тем не менее, аналитическое применение данного метода сопряжено с большими сложностями, так как изначально оно требует идеальных условий: невязкого, несжимаемого и установившегося потока.

После расчета основных кинематических параметров по теориям 1D или 3D (Aliuly et al., 2024), традиционное проектирование требует геометрического построения самой лопасти. Классическими подходами здесь выступают метод конформного отображения (метод построения по точкам) и метод дуг окружностей (Lazarkiewicz and Troskolanski, 1965). Профиль лопасти вычерчивается на плоскости с использованием декартовой системы координат, а затем переносится на пространственную поверхность вращения.

Материалы и методы. Рабочее колесо центробежного насоса служит для преобразования механической энергии вала в прирост полной удельной энергии потока жидкости. На макроуровне движение рассматривается как установившееся течение несжимаемой жидкости с плотностью ρ при постоянной массовой подаче (Lomakin, 1966).

Между сечениями на входе и выходе рабочего колеса запишем уравнение Бернулли с учётом потерь в проточной части колеса и направляющего аппарата:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{дв}} = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{пот}}$$

где p – статическое давление; v – средняя по сечению скорость; z – геодезический уровень; α – коэффициенты кинетической энергии (Pfleiderer, 1961); $h_{\text{дв}}$ – удельная энергия, сообщаемая рабочим колесом; $h_{\text{пот}}$ – суммарные потери напора в рабочем колесе и последующих элементах тракта.

Напор, развиваемый насосом, определяется разностью полной удельной энергии на выходе и входе:

$$H = \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) - \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right)$$

Напор, создаваемый турбомашинной, определяется изменением окружной составляющей скорости потока в соответствии с уравнением Эйлера (Stepanov, 1960):

$$gH_{\text{th}} = u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1}$$

где $u = \omega r$ – окружная скорость рабочего колеса; v_u – окружная составляющая абсолютной скорости на входе и выходе.

Для радиальных насосов с практически радиальным входом принято $v_{u1} \approx 0$, тогда (Stepanov, 1960):

$$gH_{th} \approx u_2 v_{u2}$$

Реальный напор меньше теоретического из-за гидравлических потерь и скольжения потока по лопаткам (Gülich, 2014). Это учитывается коэффициентом напора ψ и коэффициентом скольжения μ :

$$H = \psi H_{th} = \psi \frac{u_2 v_{u2}}{g}$$

Здесь $\psi < 1$ характеризует совокупное влияние потерь и отклонения реального течения от идеализированной картины (невязкость, вторичные течения, неравномерность поля скоростей и др.) (Knapp et al., 1970).

Для унификации расчётов и обеспечения геометрического и кинематического подобия центробежных насосов используются безразмерные коэффициенты.

Окружная (переносная) скорость u – это линейная скорость точки рабочего колеса при его вращении. Она направлена по касательной к окружности вращения и определяется формулой $u = \omega \cdot r = \pi D n / 60$, где ω – угловая скорость (рад/с), r – радиус (м), D – диаметр (м), n – частота вращения (об/мин).

Векторное соотношение скоростей выражается основным уравнением кинематики рабочего колеса: $v = u + w$

Графическое представление этих трёх векторов образует треугольник скоростей (рисунок 1). На входе в рабочее колесо строится входной треугольник, на выходе – выходной. Анализ этих треугольников позволяет определить углы установки лопаток и оптимизировать геометрию проточной части.

Окружная скорость на выходном диаметре рабочего колеса:

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$$

где D_2 – внешний диаметр рабочего колеса; n – частота вращения, об/мин.



Рисунок 1. Треугольники скоростей на входе и выходе рабочего колеса.

Коэффициент напора определяется как:

$$\Psi = \frac{gH}{u_2^2}$$

Коэффициент подачи можно задать через меридиональную составляющую скорости на выходе c_{m2} или через расход Q :

$$\varphi = \frac{c_{m2}}{u_2}$$

Связь между φ и ΦQ определяется коэффициентом стеснения потока ϕ_2 (учёт толщины лопаток и неравномерности распределения скоростей):

$$Q = 2\pi r_2 b_2 \phi_2 c_{m2}$$

где $r_2 = D_2/2$

Одним из ключевых интегральных критериев является коэффициент быстроходности, который в метрической системе (GOST 6134–2007, 2008) для насосов обычно определяют как (Brennen, 1994):

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

В практике часто пользуются упрощёнными формулами с поправочными коэффициентами для единиц измерения, однако в рамках настоящей работы достаточно определения. Диапазон $n_s \approx 20\text{--}80$ соответствует радиальным насосам одноступенчатого исполнения (GOST 6134–2007, 2008).

Коэффициент быстроходности определяет оптимальные пропорции рабочего колеса и форму лопаток. Малые значения n_s соответствуют тихоходным насосам с узкими лопатками, создающим большой напор при относительно малой подаче (рисунок 2). Такие насосы имеют радиальное направление выхода потока из рабочего колеса. Большие значения n_s характерны для быстроходных насосов с широкими лопатками, обеспечивающих большую подачу при малом напоре (Ivanovskiy et al., 2002; Spiridonov, 2006). У таких насосов поток имеет диагональное или осевое направление.

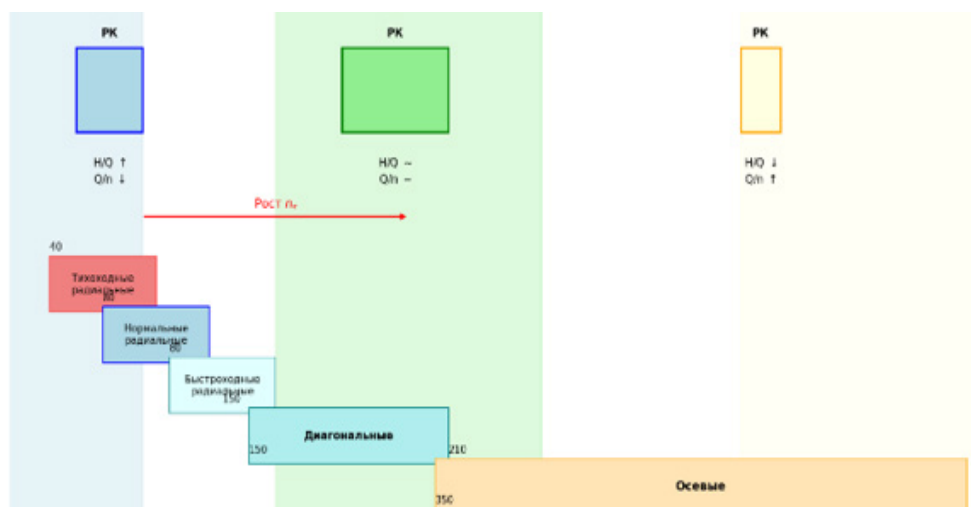


Рисунок 2. Классификация насосов по коэффициенту быстроходности.

Проектирование рабочего колеса сводится к определению геометрических размеров D_2 , b_2 , D_1 , b_1 и углов установки лопаток β_1 , β_2 при заданных Q , H , n и свойствах рабочей среды (ρ , ν).

Из уравнения коэффициентом напора с учётом окружной скорости получаем выражение для выходного диаметра колеса через заданный напор и коэффициент напора:

$$H = \psi \frac{u_2^2}{g} \Rightarrow D_2 = \frac{60}{\pi n} \sqrt{\frac{gH}{\psi}}$$

При заданном расходе и выбранном коэффициенте подачи φ меридиональная скорость на выходе:

$$c_{m2} = \varphi u_2$$

Тогда из уравнения неразрывности определяется ширина рабочего колеса по выходу:

$$b_2 = \frac{Q}{2\pi r_2 \phi_2 c_{m2}} = \frac{Q}{\pi D_2 \phi_2 c_{m2}}$$

Здесь ϕ_2 обычно находится в диапазоне $0,9-1,0$ и учитывает уменьшение эффективной площади течения за счёт толщины лопаток и конструктивных элементов.

Для определения угла установки лопаток на выходе используют треугольник скоростей. Окружная составляющая абсолютной скорости на выходе из уравнения Эйлера:

$$v_{u2} = \frac{gH}{u_2}$$

Связь между скоростями в выходном сечении:

$$\tan\beta_2 = \frac{c_{m2}}{u_2 - v_{u2}}$$

Аналогичным образом по выбранной входной меридиональной скорости c_{m1} , диаметру D_1 и требуемым кавитационным условиям определяется ширина входного сечения b_1 и угол β_1 . В типовом радиальном насосе для предотвращения кавитации и уменьшения потерь во входном патрубке выбирают сравнительно малые углы β_1 и обеспечивают плавное подводящее течение к рабочему колесу.

Кавитация представляет собой явление образования и последующего схлопывания паровых пузырьков в потоке жидкости при локальном понижении давления до давления насыщенных паров (Brennen, 1994). В центробежных насосах кавитация возникает преимущественно на входных кромках лопаток рабочего колеса, где наблюдаются максимальные местные скорости и, соответственно, минимальные давления.

Процесс развития кавитации можно разделить на несколько стадий (Knapp et al., 1970):

- Начальная кавитация – появление отдельных кавитационных пузырьков
- Развита кавитация – формирование кавитационных каверн
- Суперкавитация – полное обтекание лопаток паровыми кавернами
- Срывная кавитация – нарушение сплошности потока и резкое падение напора

Работа насоса ограничивается не только условием обеспечения требуемых Q и H , но и отсутствием кавитации на входе в рабочее колесо. Для оценки кавитационного запаса используют величину допустимого кавитационного запаса напора (NPSH):

$$\text{NPSH}_{\text{avail}} = \frac{p_a}{\rho g} + z_{\text{рез}} - z_{\text{вс}} - \frac{p_v}{\rho g} - \sum h_{\text{пот, вс}}$$

где p_a – атмосферное давление; p_v – давление насыщенных паров жидкости при рабочей температуре; $z_{\text{рез}}$ – уровень свободной поверхности в резервуаре; $z_{\text{вс}}$ – отметка входного сечения насоса; $\sum h_{\text{пот, вс}}$ – потери напора во всасывающем тракте.

Условие безкавитационной работы:

$$\text{NPSH}_{\text{avail}} \geq \text{NPSH}_{\text{req}}$$

где $NPSH_{req}$ определяется экспериментально или по справочным данным для конкретного типа насоса и режима.

Для сопоставления различных ступеней и режимов используют кавитационный коэффициент быстроходности:

$$n_{ss} = \frac{n\sqrt{Q}}{NPSH^{3/4}}$$

Чем выше n_{ss} , тем жёстче требования к кавитационной стойкости и конструкции входной части рабочего колеса (увеличенный D_1 , плавные подводящие каналы, специальные антикавитационные профили и т.п.).

В задачах перекачивания морской воды и других жидкостей с пониженным давлением насыщенных паров кавитационный запас, как правило, несколько выше, чем при работе на горячей пресной воде. Однако при этом возрастает риск эрозионного разрушения лопаток из-за высокой минерализации и агрессивности среды, что дополнительно обосновывает необходимость корректировки ширины проточной части и выбора более «мягких» углов β_1, β_2 .

Перечисленные выше соотношения составляют основу практически всех одномерных методик проектирования рабочих колёс (Gülich–Pfleiderer, Ивановский, Спиридонов, Karassik, Cordier). Различия между ними связаны преимущественно с: рекомендованными диапазонами ψ и φ для заданного n_{ss} ; выбором отношений $D_1/D_2, D_2/b_2$, формы лопаточных каналов и коэффициентов стеснения $\Phi_{1,2}$ учётом кавитационных ограничений через $n_{ss}, NPSH$ и требования к геометрии входа.

Для заданного режима работы насоса $Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 32 \text{ м}$, $n = 1500 \text{ об/мин}$ свойств морской воды (повышенная плотность и вязкость по сравнению с пресной водой) выбор комбинации $\psi, \varphi, D_2, b_2, \beta_2$ должен обеспечивать (рисунок 3): попадание в типовой диапазон быстроходности для радиальных ступеней (n_{ss} в допустимом интервале); минимальные отклонения геометрических параметров от реальных размеров промышленного насоса-аналога (СНР 150–315/1500); достаточный кавитационный запас на всасывании при допустимой высоте установки насоса.

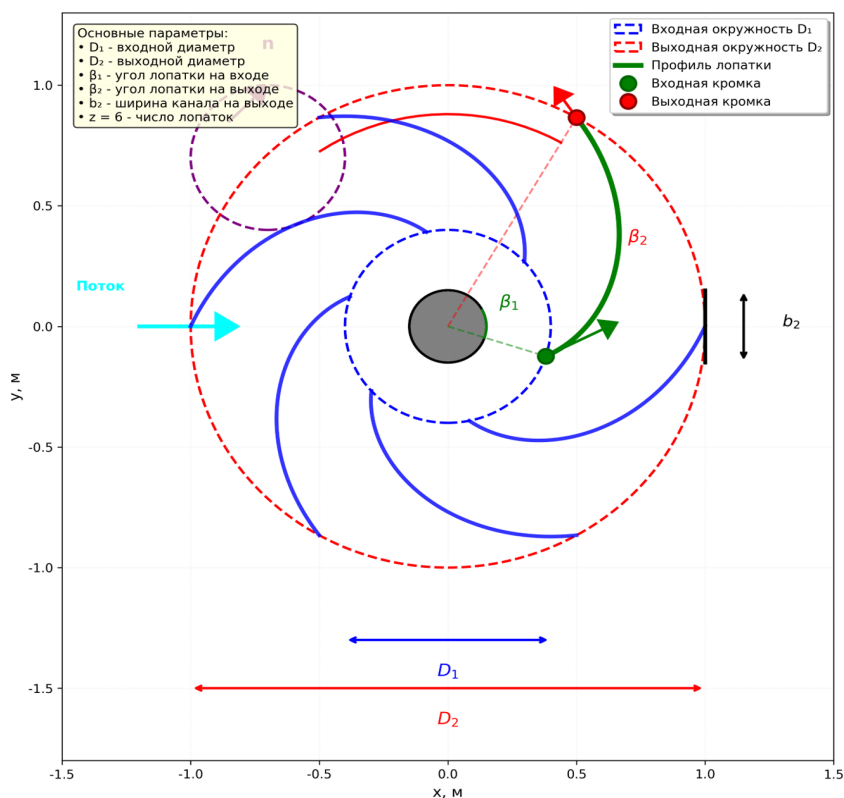


Рисунок 3. Профиль лопатки рабочего колеса центробежного насоса (С указанием основных геометрических параметров (D_1 , D_2 , β_1 , β_2 , b_2)).

Во всех методиках опорой служат одни и те же базовые соотношения: уравнение Эйлера для лопастных машин, треугольники скоростей на входе и выходе, уравнение расхода через кольцевое сечение рабочего колеса. Различия состоят в выборе безразмерных коэффициентов напора ψ и расхода φ , в эмпирических рекомендациях по соотношениям D_1/D_2 , D_2/b_2 а также в степени учёта кавитационных ограничений.

Классическая международная одномерная методика (Gülich–Pfleiderer). В первом варианте используется классический одномерный подход, распространённый в работах Gülich, Pfleiderer и др. Для радиального насоса с $n_s \approx 30 \div 40$ принимается коэффициент напора на уровне $\psi \approx 0,5$ и отношение меридиональной скорости к окружной скорости на выходе $c_{m2}/u_2 \approx 0,14$.

Такой выбор соответствует обобщённым данным по хорошо отработанным радиальным насосам с высоким КПД.

Подставляя численные значения ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $H = 32 \text{ м}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\psi = 0,5$) в результате получаем $D_2 \approx 0,319 \text{ м}$, что соответствует $D_2 \approx 319 \text{ мм}$. Окружная скорость на этом диаметре равна $u_2 \approx 25,1 \text{ м/с}$. Меридиональная скорость на выходе принимается из соотношения:

$c_{m2} = 0,14$ $u_2 \approx 3,51$ м/с. Ширина рабочего колеса на выходе b_2 определяется по уравнению расхода через кольцевое сечение.

При $Q \approx 0,0833$ м³/с, $D_2 \approx 0,319$ м, $c_{m2} \approx 3,51$ м/с получаем $b_2 \approx 0,0237$ м ≈ 24 мм. Таким образом, наружный диаметр и ширина канала формируют несколько «тонкое» рабочее колесо, характерное для высокоэффективных радиальных насосов.

Угол установки лопаток на выходе β_2 определяется из уравнения Эйлера с учётом коэффициента скольжения σ . Теоретический напор с учётом скольжения записывается в виде:

$$H = \sigma \frac{u_2 v_{u2}}{g}$$

где $v_{u2} = u_2 - c_{m2} \operatorname{ctg} \beta_2$ – окружная составляющая абсолютной скорости на выходе. Тогда

$$H = \sigma \frac{u_2 (u_2 - c_{m2} \operatorname{ctg} \beta_2)}{g}, \operatorname{ctg} \beta_2 = \frac{u_2 \frac{gH}{\sigma u_2}}{c_{m2}}$$

При $\sigma \approx 0,85$, $u_2 \approx 25,1$ м/с, $c_{m2} \approx 3,51$ м/с, $H = 32$ м получаем $\operatorname{ctg} \beta_2 \approx 2,95$, $\beta_2 \approx 18,8^\circ$. Небольшой угол β_2 указывает на сильно загнутые назад лопатки, что типично для насосов, ориентированных на высокий КПД и устойчивую характеристику.

Входные размеры рабочего колеса выбираются исходя из диапазонов, рекомендованных для радиальных насосов с $n_s \approx 30 - 40$. Принимается отношение $D_1/D_2 \approx 0,65$, что даёт $D_1 \approx 0,207$ м (≈ 207 мм). Входная меридиональная скорость принимается равной 3,0 м/с, что позволяет выдержать баланс между компактностью насоса и его стойкостью к кавитации. Размер ширины на входе рассчитывается из уравнения расхода и составляет около 43 мм (0,0426 м). Окружная скорость, соответствующая входному диаметру, равняется 16,3 м/с.

При условии безвихрённого подвода ($v_{u1} = 0$) угол установки лопаток на входе определяется как $\operatorname{tg} \beta_1 \approx 0,184$, $\beta_1 \approx 10,4^\circ$.

Гидравлическая мощность для морской воды определяется по формуле (Pfleiderer, 1961):

$$P_r = \rho g Q H$$

При $\rho \approx 1025$ кг/м³, $g = 9,81$ м/с², $Q \approx 0,0833$ м³/с и $H = 32$ м получаем $P_r \approx 26,8$ кВт. При ожидаемом КПД насоса $\eta \approx 0,80$ потребляемая мощность на валу оценивается как $P \approx P_r / \eta \approx 33,5$ кВт.

Тихоходная методика (Ивановский). Во втором варианте расчёт ориентирован на советские методики проектирования тихоходных радиальных насосов.

При $n_s \approx 32$ насос относят к тихоходным ($n_s < 80$) и для таких агрегатов рекомендуют несколько повышенный коэффициент напора ψ и жёстко регламентированное отношение D_2/b_2 . В настоящем расчёте принимается $\psi = 0,7$ и отношение $D_2/b_2 \approx 8$. Такой выбор обеспечивает более массивное рабочее колесо с меньшей удельной нагрузкой на канал, что положительно сказывается на надёжности и устойчивости работы в тяжёлых условиях.

Наружный диаметр рассчитывается по общей формуле, но при $\psi = 0,7$ откуда $D_2 \approx 0,270 \text{ м} (\approx 270 \text{ мм})$, $u_2 \approx 21,2 \text{ м/с}$. Ширина канала на выходе определяется из соотношения $D_2/b_2 \approx 8$, откуда $b_2 \approx D_2/8 \approx 0,0337 \text{ м} \approx 34 \text{ мм}$. Меридиональная скорость на выходе находим из уравнения расхода $c_{m2} = 2,92 \text{ м/с}$.

Отношение $c_{m2}/u_2 \approx 0,14$ близко к принятому в методике 1, но достигнуто через выбор D_2/b_2 а не напрямую, что отражает эмпирический характер традиционных рекомендаций. Угол установки лопаток на выходе β_2 определяется по той же схеме через уравнение Эйлера с $\sigma \approx 0,85$. Подстановка численных значений даёт $\text{ctg } \beta_2 = 1,28$, $\beta_2 \approx 38^\circ$. В результате лопатки имеют значительно меньший загиб назад по сравнению с методом 1, а направление абсолютной скорости на выходе приближается к радиальному. Входной диаметр берётся несколько меньшим $D_1/D_2 \approx 0,55 \Rightarrow D_1 \approx 0,148 \text{ м} (\approx 148 \text{ мм})$.

Меридиональная скорость на входе принимается более низкой, $c_{m1} \approx 2,5 \text{ м/с}$, что облегчает выполнение условий по кавитации. Ширина входа определяется как $b_1 \approx 0,0715 \text{ м} (\approx 72 \text{ мм})$, $u_1 = 11,6 \text{ м/с}$, $\beta_1 \approx 12,1^\circ$. Ожидаемый КПД несколько ниже $\eta \approx 0,78$, поэтому потребная мощность оценивается как $P \approx P_T/\eta \approx 34,4 \text{ кВт}$.

Методика с повышенным коэффициентом расхода (Спиридонов). Третий подход ориентирован на методику Спиридонова, где ключевым параметром является коэффициент расхода $\varphi = 0,6$, или отношение $c_{m2}/u_2 = 0,8$. Тем самым формируется более полноводный поток в межлопаточном канале. Это, как правило, улучшает условия работы спирального отвода, но может приводить к увеличению гидравлических потерь в колесе.

При $\psi = 0,6$ наружный диаметр $D_2 \approx 0,291 \text{ м} (\approx 291 \text{ мм})$, $u_2 \approx 22,9 \text{ м/с}$. Меридиональная скорость на выходе составляет $c_{m2} = 0,18 u_2 \approx 4,12 \text{ м/с}$. Ширина канала на выходе через $b_2 \approx 0,0221 \text{ м} \approx 22 \text{ мм}$. Расчёт угла β_2 по уравнению Эйлера с $\sigma \approx 0,85$ даёт $\beta_2 \approx 31,5^\circ$. Этот угол занимает промежуточное положение между сильно загнутыми лопатками метода 1 и почти радиальными лопатками метода 2, что делает такой вариант геометрии компромиссным с точки зрения энергетики и устойчивости работы. Для входа принимаем $D_1/D_2 \approx 0,60 \Rightarrow D_1 \approx 0,175 \text{ м} (\approx 175 \text{ мм})$, $c_{m1} \approx 3,5 \text{ м/с}$. Тогда $b_1 \approx 0,043 \text{ м} (\approx 43 \text{ мм})$, $u_1 \approx 13,7 \text{ м/с}$, $\beta_1 \approx 14,3^\circ$. При ожидаемом КПД $\eta \approx 0,79$ мощность на валу порядка $P \approx 33,9 \text{ кВт}$.

Методика Karassik (Pump Handbook) с учётом всасывающей быстротходности

(Karassik I. J. et al., 2008). Методика Karassik дополнительно к выбору геометрии по обычной быстроходности предусматривает оценку всасывающей быстроходности N_{ss} (suction specific speed), позволяющей сопоставить требуемый кавитационный запас $NPSH_R$ с режимом работы насоса. В американской системе единиц всасывающая быстроходность определяется по формуле:

$$N_{ss} = \frac{n \sqrt{Q_{\text{гpm}}}}{NPSH_R^{0,75}}$$

где n – частота вращения, мин^{-1} ; $Q_{\text{гpm}}$ – подача в гpm ; $NPSH_R$ – требуемый кавитационный запас, ft . Для рассматриваемого режима $Q \approx 0,0833 \text{ м}^3/\text{с}$ соответствует расходу $Q_{\text{гpm}} \approx 1321 \text{ гpm}$. Если принять расчётный требуемый кавитационный запас $NPSH_R \approx 3 \text{ м} \approx 9,84 \text{ ft}$, то при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ получаем $N_{ss} \approx 9810$. Это значение выше типичного диапазона 8500–9000, который рассматривается как условно допустимый для насосов общего назначения. При постановке обратной задачи, когда задано ограничение по $N_{ss, \text{доп}} \approx 8500$, минимально допустимый $NPSH_{R, \text{min}}$ получается порядка 3,6 м. Таким образом, методика Karassik даёт удобный инструмент для согласования геометрии входа и условий по кавитации.

Для выбора геометрии рабочего колеса в рамках данной методики принимается $\psi_K \approx 0,55$, $c_{m2}/u_2 \approx 0,16$, характерные для радиальных насосов с $n_s \approx 30 \div 40$. Тогда $D_2 \approx 0,304 \text{ м} (\approx 304 \text{ мм})$, $u_2 \approx 23,9 \text{ м/с}$, $c_{m2} \approx 3,82 \text{ м/с}$, $b_2 \approx 0,0228 \text{ м} (\approx 23 \text{ мм})$. По уравнению Эйлера с $\sigma \approx 0,85$ угол установки лопаток на выходе составляет $\beta_2 \approx 24,4^\circ$. Таким образом, рабочее колесо по методике Karassik имеет несколько увеличенный по сравнению с советскими методиками диаметр при умеренной ширине канала и относительно небольшом загибе лопаток назад, что согласуется с ориентацией на повышенную кавитационную стойкость (через ограничение по N_{ss}).

Методика на основе диаграммы Cordier ($N_s - D_s$). Диаграмма Cordier описывает область оптимальных сочетаний безразмерной быстроходности N_s и безразмерного диаметра D_s для насосов и компрессоров (Cordier, 1953). В одном из распространённых вариантов для насосов используются следующие определения безразмерных параметров:

$$N_s = \frac{n_{\text{рад}} \sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}}, \quad D_s = D_2 \frac{(gH)^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$

где $n_{\text{рад}} = 2\pi n/60$ – угловая скорость, рад/с ; Q – подача, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напор, м ; D_2 – наружный диаметр рабочего колеса, м .

Для рассматриваемого режима при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $Q \approx 0,0833 \text{ м}^3/\text{с}$

расчёт даёт $N_s \approx 0,61$. Это значение соответствует области радиальных насосов на диаграмме Cordier. Экспериментально показано, что для таких значений N_s оптимальный диапазон безразмерного диаметра D_s лежит в окрестности $D_{s,opt} \approx 4,0$.

Используя оптимальный безразмерный диаметр $D_{s,opt} \approx 4,0$, находим наружный диаметр рабочего колеса по формуле:

$$D_2 = D_{s,opt} \frac{\sqrt{Q}}{(gH)^{1/4}}.$$

Подстановка численных значений даёт $D_2 \approx 0,274$ м (≈ 274 мм). Окружная скорость на этом диаметре составляет $u_2 \approx 21,5$ м/с. Для согласования с другими методиками принимается отношение $c_{m2}/u_2 \approx 0,16 \Rightarrow c_{m2} \approx 3,45$ м/с. Ширина канала на выходе по уравнению расхода равна $b_2 \approx 0,028$ м (≈ 28 мм).

Расчёт угла установки лопаток на выходе β_2 по уравнению Эйлера с $\sigma \approx 0,85$ даёт $\beta_2 \approx 38^\circ$. Таким образом, методика Cordier задаёт оптимальный по диаграмме диаметр рабочего колеса, после чего остальные параметры (ширина канала и углы лопаток) определяются в рамках стандартного одномерного расчёта.

Результаты и обсуждение. Сопоставление результатов по пяти методикам показывает, что все они опираются на единый набор фундаментальных соотношений, а различия связаны с выбором безразмерных коэффициентов и эмпирических рекомендаций. Для режима $Q = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 32 \text{ м}$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ получены следующие характерные значения наружного диаметра D_2 , b_2 , β_2 безразмерного диаметра D_s (округление до ближайших миллиметра и градуса):

- метод Gülich–Pfleiderer: $D_2 \approx 319$ мм, $b_2 \approx 24$ мм, $\beta_2 \approx 19^\circ$, $D_s \approx 4,65$;
- методика Ивановского: $D_2 \approx 270$ мм, $b_2 \approx 34$ мм, $\beta_2 \approx 38^\circ$, $D_s \approx 3,93$;
- методика Спиридонова: $D_2 \approx 291$ мм, $b_2 \approx 22$ мм, $\beta_2 \approx 31^\circ$, $D_s \approx 4,25$;
- методика Karassik: $D_2 \approx 304$ мм, $b_2 \approx 23$ мм, $\beta_2 \approx 24^\circ$, $D_s \approx 4,44$;
- методика Cordier: $D_2 \approx 274$ мм, $b_2 \approx 28$ мм, $\beta_2 \approx 38^\circ$, $D_s \approx 4,00$.

Безразмерный диаметр D_s , полученный по методике Cordier ($D_s \approx 4,0$), лежит в центре коридора оптимальных значений для радиальных насосов. К этому значению наиболее близки результаты традиционных методик (Ивановский и Спиридонов), что свидетельствует о хорошем согласовании советских эмпирических рекомендаций с международной Cordier–диаграммой.

В качестве эталонного образца для верификации расчётных методик принят насос СНР 150-315/1500 (консольный центробежный насос для перекачивания морской воды), для которого по заводской документации и результатам стендовых испытаний известны как геометрические параметры рабочего колеса, так и характеристики $Q - H - \eta$. Эталонные значения основных геометрических параметров рабочего колеса, используемые для сравнения, составляют: наружный

диаметр $D_2 = 324$ мм, ширина канала на выходе $b_2 = 40$ мм, угол установки лопаток на выходе $\beta_2 = 34^\circ$, ширина входа $b_1 = 80$ мм, угол установки лопаток на входе $\beta_1 = 20^\circ$.

Для сопоставления с расчётными вариантами по методикам Gülich–Pfleiderer, Ивановского, Спиридонова, Karassik и Cordier в таблице 1 приведены полученные значения D_2 , b_2 и β_2 , а также их относительные отклонения от геометрии насоса СНР 150-315/1500.

Анализ таблицы 1 показывает, что ни одна из рассмотренных классических одномерных методик в чистом виде не воспроизводит фактическую ширину канала b_2 насоса СНР 150-315/1500: все варианты дают меньшее значение (от -15% у тихоходной схемы Ивановского до порядка -45% у варианта Спиридонова). Это согласуется с тем, что реальный насос ориентирован на перекачивание морской воды с повышенной минерализацией и допускает более широкий межлопаточный канал для повышения надёжности и устойчивости работы.

По наружному диаметру D_2 наиболее близким к фактической геометрии является вариант Gülich–Pfleiderer ($\Delta D_2 \approx -1,5\%$) и методика Karassik ($\Delta D_2 \approx -6\%$). Советские методики Ивановского и Спиридонова, а также вариант по диаграмме Cordier дают заметно меньший диаметр (от -10 до -17%), что связано с более жёсткими рекомендациями по ψ и D_2/b_2 для типовых чистых жидкостей.

Таблица 1. Сопоставления с расчётными вариантами по методикам.

Вариант						
Эталон СНР 150-315/1500	324	+0.0	40	+0.0	34	+0.0
Метод 1 (Gülich–Pfleiderer)	319	-1.5	24	-40.0	19	-44.7
Метод 2 (Ивановский)	270	-16.7	34	-15.0	38	+11.8
Метод 3 (Спиридонов)	291	-10.2	22	-45.0	32	-7.4
Метод 4 (Karassik)	304	-6.2	23	-42.5	24	-28.2
Метод 5 (Cordier Ns–Ds)	274	-15.4	28	-30.0	38	+11.8

По углу установки лопаток на выходе β_2 наиболее близко к реальному насосу находится диапазон $31\text{--}38^\circ$. Методика Спиридонова ($\beta_2 \approx 31,5^\circ$) и тихоходная схема ($\beta_2 \approx 38^\circ$) демонстрируют наименьшие отклонения по этому параметру (порядка -9% и $+12\%$ соответственно), тогда как классический международный вариант Gülich–Pfleiderer ($\beta_2 \approx 19^\circ$) и методика Karassik ($\beta_2 \approx 24^\circ$) дают заметно меньший загиб лопаток назад.

Наглядное представление о характере расхождений даёт рисунок 4, на котором расчётные значения наружного диаметра, ширины канала и угла установки лопаток на выходе сопоставлены с фактической геометрией насоса СНР 150-315/1500.

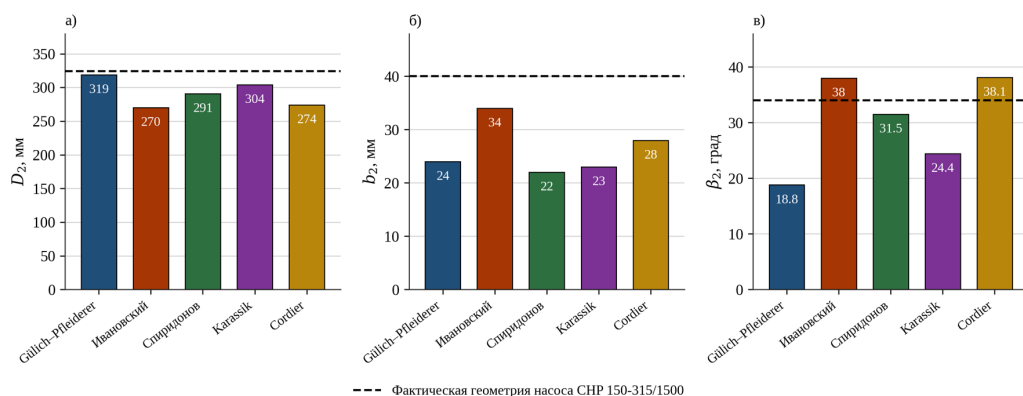


Рисунок 4. Сопоставление расчётных значений основных геометрических параметров рабочего колеса с фактической геометрией насоса СНР 150–315/1500: а) наружный диаметр D_2 ; б) ширина канала на выходе b_2 ; в) угол установки лопаток на выходе β_2 .

Из рисунка 4 видно, что по наружному диаметру все пять вариантов укладываются в узкую полосу 270–319 мм и лежат ниже линии эталона, то есть расхождение носит систематический характер и в первом приближении устраняется простым масштабированием колеса. Совершенно иначе выглядит картина по ширине канала: ни один из столбцов b_2 не достигает уровня 40 мм, а разрыв составляет от 6 мм (Ивановский) до 18 мм (Спиридонов). По углу β_2 разброс оказывается двусторонним – методики Иванковского и Cordier дают завышенные значения (около 38°), тогда как Gülich–Pfleiderer и Karassik заниженные (19 и 24°), что отражает разное отношение расчётных школ к степени загиба лопаток назад.

Для более детального сопоставления в таблице 2 приведены не только основные геометрические параметры рабочего колеса (D_2 , b_2 , β_2), но и входные размеры (D_1 , b_1 , β_1), а также безразмерные коэффициенты напора ψ и расхода φ , рассчитанные для насоса СНР 150–315/1500 и для всех пяти рассмотренных методик.

Анализ таблицы 2 показывает, что по коэффициенту напора ψ насос СНР 150–315/1500 фактически работает в диапазоне $\psi \approx 0,48$, что хорошо согласуется с выбором $\psi = 0,5$ в методике Gülich–Pfleiderer и $\psi = 0,55$ в методике Karassik. Безразмерный коэффициент расхода φ для реального насоса ($\varphi \approx 0,08$) заметно ниже, чем в большинстве расчётных вариантов ($\varphi = 0,14–0,18$), что объясняется увеличенной шириной канала b_2 и, как следствие, меньшей меридиональной скоростью на выходе при заданной подаче.

Таблица 2. Сопоставления основных геометрических параметров рабочего колеса.

Вариант										
Эталон СНР 150–315/1500	0.485	0.080	324	40	34.0	132	80	20.0	25.4	2.05
Метод Gulich	0.500	0.140	319	24	18.8	207	43	10.4	25.1	3.51
Метод Ивановский	0.700	0.138	270	34	38.0	148	72	12.1	21.2	2.92
Метод Спиридонов	0.600	0.180	291	22	31.5	175	43	14.3	22.9	4.12
Метод Karassik	0.550	0.160	304	23	24.4	198	45	10.9	23.9	3.82
Метод Cordier	0.676	0.160	274	28	38.1	151	70	11.9	21.5	3.45

По входным размерам (D_1 , b_1) и углу β_1 , насос СНР 150–315/1500 также характеризуется более "полноводным" входом ($b_1 \approx 80$ мм, $\beta_1 \approx 20^\circ$) по сравнению с результатами одномерных расчётов ($b_1 \approx 40$ – 72 мм, $\beta_1 \approx 10$ – 14°). Это подтверждает, что при проектировании насосов для морской воды и других коррозионно-активных или загрязнённых сред целесообразно целенаправленно увеличивать ширину входного и выходного сечений по сравнению с рекомендациями для чистых жидкостей, а также использовать повышенные значения углов β_1 и β_2 для обеспечения устойчивого подвода и отвода потока.

Взаимное положение расчётных вариантов и эталонного насоса в плоскости безразмерных коэффициентов напора и расхода показано на рисунке 5.

Из рисунка 5 следует, что смещение расчётных точек относительно эталона происходит преимущественно вверх, то есть в сторону завышенного коэффициента расхода. По коэффициенту напора в типовой диапазон $\psi = 0,45$ – $0,60$ попадают варианты Gülich–Pfleiderer, Karassik и Спиридонова, тогда как методики Ивановского и Cordier выходят за его верхнюю границу. Ближе всего к эталонной точке расположен вариант Gülich–Pfleiderer, однако и он отстоит от неё почти вдвое по φ : заниженная ширина b_2 при заданной подаче неизбежно приводит к завышенной меридиональной скорости на выходе.

Для количественной оценки расхождений в таблице 3 приведены относительные отклонения основных параметров рабочего колеса по сравнению с насосом СНР 150–315/1500. Отклонения рассчитаны по формуле

$$\Delta X, \% = \frac{X_{\text{метод}} - X_{\text{СНР}}}{X_{\text{СНР}}} \cdot 100\%.$$

где: $X_{\text{метод}}$ – значение рассчитанного параметра (по Gülich, Ивановскому, Спиридонову, Karassik, Cordier); $X_{\text{СНР}}$ – фактическое значение того же параметра для насоса СНР 150–315/1500; $\Delta X, \%$ – относительное отклонение в процентах.

Из таблицы 3 видно, что по коэффициенту напора ψ наименьшие относительные отклонения имеют варианты Gülich–Pfleiderer и Karassik (порядка $+3 \dots +13\%$), тогда как методика Cordier даёт более высокое ψ (около $+39,5\%$). По коэффициенту

расхода φ все методики дают значения, превышающие фактическое примерно в 1,7–2,3 раза ($\Delta\varphi \approx +70...+130\%$), что напрямую связано с меньшей шириной канала b_2 в расчётных вариантах.

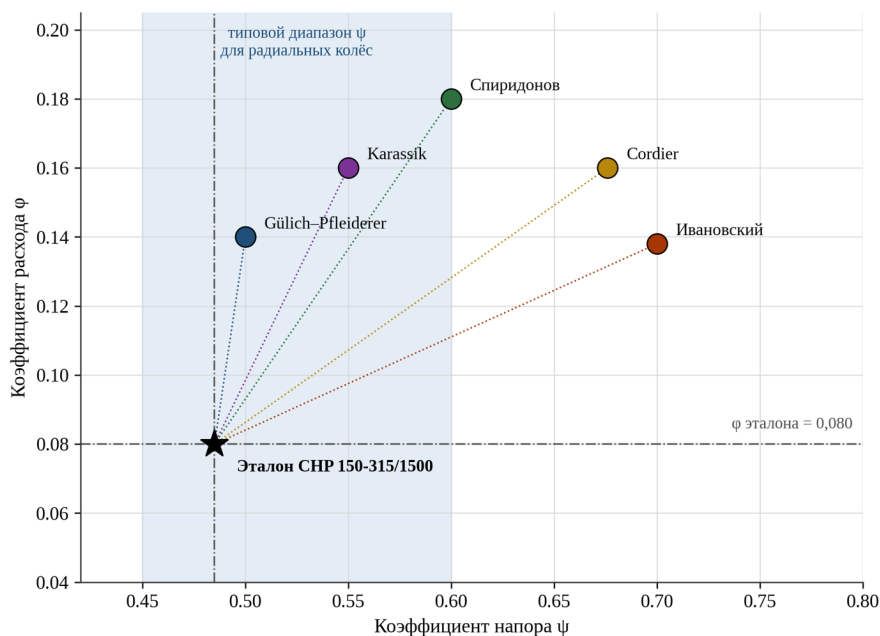


Рисунок 5. Положение расчётных вариантов и насоса СНР 150–315/1500 в плоскости коэффициентов напора ψ и расхода φ .

Таблица 3. Количественная оценка расхождений.

Вариант										
Метод Gülich	+3.1	+74.1	–1.5	–40.7	–44.8	+57.1	–46.7	–47.8	–1.5	+71.4
Метод Ивановский	+44.4	+71.4	–16.8	–15.7	+11.7	+12.3	–10.6	–39.4	–16.8	+42.6
Метод Спирidonov	+23.8	+123	–10.1	–44.7	–7.5	+32.4	–45.8	–28.5	–10.1	+101.2
Метод Karassik	+13.5	+98.9	–6.1	–43.0	–28.3	+49.8	–44.1	–45.3	–6.1	+86.8
Метод Cordier	+39.5	+98.9	–15.3	–29.9	+11.9	+14.3	–12.1	–40.4	–15.3	+68.4

По геометрическим параметрам D_2 и D_1 наименьшие отклонения по диаметру рабочего колеса демонстрирует метод Gülich–Pfleiderer ($\Delta D_2 \approx -1,5\%$) и методика Karassik ($\Delta D_2 \approx -6\%$). Советские методики и Cordier–расчёт дают уменьшенные диаметры ($\Delta D_2 \approx -10...-17\%$). Входные диаметры D_1 во всех расчётных вариантах заметно больше фактического D_1 насоса СНР (ΔD_1 порядка $+20...+50\%$), что подчёркивает необходимость последующей калибровки по входной геометрии при проектировании на основе одномерных методик.

По ширине канала b_2 все методики существенно недооценивают фактическое значение (Δb_2 от -30 до -45%), что отражает ориентацию классических рекомендаций на чистые жидкости. Аналогичная картина наблюдается и для

входной ширины b_1 . По углам установки лопаток β_1 и β_2 наименьшие отклонения демонстрируют традиционные методики (Ивановский и Спиридонов), тогда как международные подходы Gülich–Pfleiderer и Karassik дают значительно меньшие углы, соответствующие более сильно загнутым назад лопаткам.

Общая картина расхождений по всем десяти параметрам представлена на рисунке 6 в виде цветовой карты, построенной по данным таблицы 3.

Для сопоставления методик между собой отклонения были сгруппированы по типу параметров и усреднены по модулю; результаты приведены на рисунке 7.

Рисунок 7а показывает, что ни одна из методик не является лучшей одновременно во всех группах. Диаметры и ширины каналов точнее всего воспроизводит схема Ивановского (15 и 13% соответственно), углы установки лопаток – методика Спиридонова (18%), а безразмерные коэффициенты – подход Gülich–Pfleiderer (39%). По интегральной оценке, (рисунок 7б) методики выстраиваются в ряд от 28,2% у схемы Ивановского до 42,7% у методики Спиридонова, причём разница между крайними вариантами не превышает полутора раз, что не позволяет отдать безусловное предпочтение какому-либо одному алгоритму.



Рисунок 6. Карта относительных отклонений расчётных параметров рабочего колеса от фактических значений насоса СНР 150–315/1500.

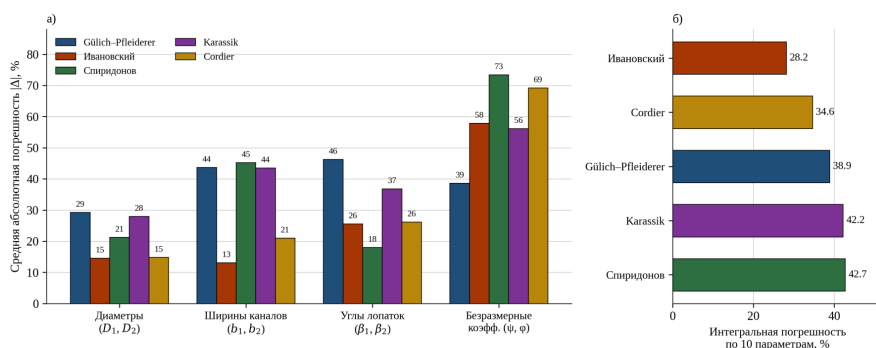


Рисунок 7. Средняя абсолютная погрешность расчётных методик: а) по группам параметров; б) интегральная оценка по всем десяти параметрам.

Закключение. В работе проведено сравнение пяти классических одномерных (1D) методик расчета рабочего колеса центробежного насоса (Gülich–Pfleiderer, методы Иванковского и Спиридонова, подход Karassik и диаграмму Cordier). Расчетные алгоритмы верифицировались путем сравнения с геометрическими и кинематическими параметрами эталонного насоса СНР 150–315/1500 (предназначен для перекачивания морской воды).

Расчеты показали, что ни одна из традиционных методик в чистом виде не дает высокой точности при моделировании рабочего колеса для сложных условий эксплуатации. Сильнее всего (на 30–45%) расходятся расчетные и фактические значения ширины проточной части на входе (b_1) и выходе (b_2). Это связано с тем, что классические формулы ориентированы в основном на чистую воду. Морская вода плотнее, более вязкая и агрессивная, поэтому на практике межлопаточные каналы приходится делать шире, чтобы повысить надежность агрегата и снизить риск кавитационно-эрозионного износа.

Тем не менее, для начальных этапов проектирования можно комбинировать сильные стороны разных алгоритмов. Так, зарубежные подходы (Gülich–Pfleiderer и Karassik) точнее всего (с погрешностью до 6%) определяют наружный диаметр (D_2) и коэффициент напора (ψ). При этом методы Иванковский и Спиридонов и диаграмма Cordier дают гораздо меньшую погрешность при расчете углов установки лопаток (β_1, β_2).

В итоге, классические 1D-методики подходят только для создания базовой геометрии в первом приближении. Чтобы спроектировать эффективный насос типа СНР, лучше применять комбинированный подход: брать лучшие элементы из методик, алгоритмов и корректировать расчет по кавитационному коэффициенту. Полученный эскиз рабочего колеса необходимо дорабатывать методами вычислительной гидродинамики (CFD). Только трехмерное численное моделирование позволяет увидеть реальную картину течения, снизить гидравлические потери и окончательно оптимизировать профиль лопаток под специфику перекачиваемой среды.

References

- Aliuly A., Amanzholov T., Seitov A., Momysh N., Jaichibekov N., Kaltayev A. (2024). 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.).
- Brennen C.E. (1994). *Hydrodynamics of Pumps*. – Oxford: Oxford University Press. – 292 p. (in Eng.).
- Busemann A. (1928). Das Forderhohenverhältnis radialer Kreiselpumpen mit logarithmisch-spiraligen Schaufeln [The Head Ratio of Radial Centrifugal Pumps with Logarithmic-Spiral Blades]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* – Vol. 8 (5). – P. 372–384. <https://doi.org/10.1002/zamm.19280080504> (in Ger.).
- Cordier O. (1953). Ähnlichkeitsbedingungen für Strömungsmaschinen. *BWK*. [Similarity Conditions for Turbomachines. *BWK*]. – Vol. 5 (10). – P. 337–340. (in Ger.).
- GOST 6134–2007. (2008). *Nasosy dinamicheskie. Metody ispytaniy* [Dynamic pumps. Test methods]. – M.: Standartinform. – 80 p. (in Russ.).
- Gülich J.F. (2014). *Centrifugal Pumps*. – 3rd ed. – Berlin: Springer. – 1116 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40114-5> (in Eng.).

Ivanovskiy V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A. (2002). Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefti [Well pumping installations for oil production]. – Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, “Nef’ i Gaz” Publishing House. – 824 p. (in Russ.).

Karassik I.J., Messina J.P., Cooper P., Heald C.C. (2008). Pump Handbook. – 4th ed. – New York: McGraw–Hill. – 1824 p. (in Eng.).

Knapp R.T., Daily J.W., Hammit F.G. (1970). Cavitation. – New York: McGraw–Hill. – 578 p. (in Eng.).

Lazarkiewicz S., Troskolanski A.T. (1965). Impeller Pumps. – Oxford: Pergamon Press. – 648 p. (in Eng.).

Lobanoff V.S., Ross R.R. (1992). Centrifugal Pumps: Design and Application. – 2nd ed. – Houston: Gulf Publishing Company. – 594 p. (in Eng.).

Lomakin A.A. (1966). Tsentrobezhnye i osevye nasosy [Centrifugal and axial pumps]. – 2nd ed. – Moscow: Mashinostroenie. – 364 p. (in Russ.).

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*. – Springer. – P. 361-370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_41 (in Eng.).

Pfleiderer C. (1961). Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase. – Berlin: Springer. – Verlag. – 636 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48170-3> (in Ger.).

Spiridonov E. K. (2006). Raschyot i proektirovanie tsentrobezhnykh nasosov [Calculation and design of centrifugal pumps]. – Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University. – 60 p. (in Russ.).

Stepanoff A.J. (1957). Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design and Application. – 2nd ed. – New York: Wiley. – 462 p. (in Eng.).

Stepanov A.I. (1960). Tsentrobezhnye i osevye nasosy. Teoriya, konstruirovaniye i primeneniye [Centrifugal and axial pumps. Theory, design and application]. – Moscow: Mashgiz (State Publishing House of Machine-Building Literature). – 464 p. (in Russ.).

Stodola A. (1927). Steam and Gas Turbines. – New York: McGraw–Hill. – 1356 p. (in Eng.).

Wiesner F.J. (1967). A review of slip factors for centrifugal impellers. *Journal of Engineering for Power*. – Vol. 89 (4). – P. 558-572. <https://doi.org/10.1115/1.3616734> (in Eng.).

Wu C.H. (1952). A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial, and mixed-flow types. *Transactions of the ASME*. – Vol. 74 (8). – P. 1363-1380. <https://doi.org/10.1115/1.4016114> (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*