Қ.ҚҰЛАЖАНОВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ТЕХНОЛОГИЯ ЖӘНЕ БИЗНЕС УНИВЕРСИТЕТІ

K.KULAZHANOV KAZAKH UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND BUSINESS

КАЗАХСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГИИ И БИЗНЕСА ИМЕНИ К.КУЛАЖАНОВА

KAZ UTB

№ 1 (32) - 2026

«Химиялық технология» журналы

The journal «Chemical Technology»

Журнал «Химическая технология»



ISSN: 3136-7445 (Print)
ISSN: 3136-7453 (Online)

Астана - 2026

ISSN (Print) 3136-7445
ISSN (Online) 3136-7453

№ 1 (32) - 2026

Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті

K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business

Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова

«Химиялық технология» журналы

The journal «Chemical Technology»

Журнал «Химическая технология»

Жылына 4 рет электронды форматта шығады
Published 4 times a year in electronic format
Выходит 4 раза в год в электронном формате

Астана - 2026
Astana - 2026

Бас редактор: Айболдинов Еламан Қанатұлы

PhD докторы, ғылым және инновациялар жөніндегі проректор, «Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана қ., Қазақстан

Бас редактордың орынбасары: Нургалиев Нуркен Утеуович

химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана қ., Қазақстан

Редакциялық алқа мүшелері:

Құлажанов Құралбек Сәдібайұлы — химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан

Мансұров Зүлхайыр Аймұхаметұлы — химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

Mercadé-Prieto, Ruben — PhD, профессор, IQS инженерлік мектебі, Рамон Льюль университеті, Барселона қ., Испания

Wim Dehaen — профессор, Leuven университеті, Левен қ., Бельгия

Мымрин Всеволод Анатольевич — техника ғылымдарының докторы, профессор, Парана технологиялық федералдық университеті, Куритиба қ., Бразилия

Омурзак Эмил — PhD, Қырғыз-Түрік «Манас» университеті, Бішкек, Қырғызстан

Фазылов Серік Драхметұлы — химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Органикалық синтез және көмір химиясы институты, Қарағанды қ., Қазақстан

Ватин Николай Иванович — техника ғылымдарының докторы, профессор, Санкт-Петербург политехникалық университеті, Санкт-Петербург қ., Ресей

Guangun Gong — ғылым докторы, профессор, Қытай тау-кен технологиялық университеті, Сюйчжоу қ., Қытай

Бакибаев Абдигали Абдиманапович — химия ғылымдарының докторы, профессор, Ұлттық зерттеу Томск мемлекеттік университеті, Томск қ., Ресей

Базарнова Наталья Григорьевна — химия ғылымдарының докторы, профессор, Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул қ., Ресей

Жауапты редактор (Редакция өкілі): Оспанова Мадина Қапдрахманқызы — физика-математика ғылымдарының кандидаты, Science Publishing Hub басшысы, «Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана қ., Қазақстан

Меншіктенуші: «Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ

ҚР Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 07.02.2014 ж. № 14139-Ж тіркеу куәлігімен тіркелген.

Екінші тіркеу: 31.10.2025 - № KZ00VPY00133404

Мерзімділігі: жылына 4 рет

ISSN: 3136-7445, **ISSN (Online):** 3136-7453

Тақырыптық бағыт: Химиялық инженерия, ең жақсы қолжетімді технологиялар, экологиялық таза технологиялар, нанотехнологиялар, материалтану.

Редакцияның мекенжайы: 010000, Қазақстан, Астана қ., Қайым Мұхамедханов к-сі, 37 «А», тел.: +7(7172)72-58-12 (134), e-mail: ct@kaztbu.edu.kz

© Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті

Главный редактор: Айбульдинов Еламан Канатович
PhD, АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан

Заместитель главного редактора: Нургалиев Нуркен Утеуович
кандидат химических наук, ассоциированный профессор, АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан

Члены редакционной коллегии:

Кулажанов Куралбек Садибаевич — доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан
Мансуров Зулхаир Аймухаметович — доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, Институт проблем горения при КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
Mercadé-Prieto, Ruben — PhD, профессор, Университет Рамона Лулля, Барселона, Испания
Wim Dehaen — профессор, Лёвенский университет, Левен, Бельгия
Мымрин Всеволод Анатольевич — доктор технических наук, профессор, Технологический федеральный университет Параны, Куритиба, Бразилия
Омурзак Эмил — PhD, Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан
Фазылов Серик Драхметович — доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, Институт органического синтеза и углехимии, г. Караганда, Казахстан
Ватин Николай Иванович — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
Guangun Gong — доктор наук, профессор, Китайский горно-технологический университет, Сюйчжоу, Китай
Бакибаев Абдигали Абдиманапович — доктор химических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
Базарнова Наталья Григорьевна — доктор химических наук, профессор, Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

Ответственный редактор (Представитель редакции): Оспанова Мадина Капдрахмановна — к.ф.-м.н., руководитель Science Publishing Hub, АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан

Собственник: АО «Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова»
Регистрация: Министерство информации и коммуникаций Республики Казахстан. Комитет Информации.
Дата и номер первичной постановки на учет: № 14139-Ж от 07.02.2014.
Вторичная постановка на учет: 31.10.2025 - № KZ00VPY00133404
Периодичность: Ежеквартально
ISSN: 3136-7445, **ISSN (Online):** 3136-7453
Тематическая направленность: Химическая инженерия, наилучшие доступные технологии, экологически чистые технологии, нанотехнологии, материаловедение.
Адрес редакции: 010000, г. Астана, Есильский район, ул. Кайыма Мухамедханова, 37 «А», тел.: +7(7172)72-58-12 (134), e-mail: ct@kaztbu.edu.kz

© Казахский университет технологии и бизнеса К. Кулажанова

Chief Editor: Aibuldinov Yelaman
PhD, Professor, Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business JSC, Astana, Kazakhstan

Deputy Chief Editor: Nurgaliyev Nurken
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business JSC, Astana, Kazakhstan

Editorial Board members:

Kulazhanov Kuralbek — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan
Mansurov Zulkhair — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
Mercadé-Prieto, Ruben — PhD, Professor, Ramon Llull University, Barcelona, Spain
Wim Dehaen — Professor, University of Leuven, Leuven, Belgium
Mymrin Vsevolod — Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal University of Technology Paraná, Curitiba, Brazil
Emil Omurzak — PhD, Kyrgyz-Turkish Manas University, Bishkek, Kyrgyzstan
Fazylov Serik — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Institute of Organic Synthesis and Coal Chemistry, Karaganda, Kazakhstan
Vatin Nikolai — Doctor of Technical Sciences, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
Guangun Gong — Doctor of Sciences, Professor, China University of Mining and Technology, Xuzhou, China
Bakibayev Abdigali — Doctor of Chemical Sciences, Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
Bazarnova Natalya — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Altai State University, Barnaul, Russia

Executive Editor (Editorial representative): Ospanova Madina — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Science Publishing Hub, Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business JSC, Astana, Kazakhstan

Owner: JSC «K. Kulazhanov Kazakh University of technology and business»
Registration: Ministry of information and communications of the Republic of Kazakhstan. Committee of Information.
Date and number of initial registration: 14139-Z from 07.02.2014.
Secondary registration: 31.10.2025 - № KZ00VPY00133404
Frequency: Quarterly
ISSN: 3136-7445, **ISSN (Online):** 3136-7453
Thematic direction: Chemical engineering, best available technologies, environmentally friendly technologies, nanotechnologies, materials science.
Address of edition: 010000, Astana city, Esil district, Kaiym Mukhamedkhanov Street, 37 «A», тел.: +7(7172)72-58-12 (134), e-mail: ct@kaztbu.edu.kz

© K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business

СОДЕРЖАНИЕ

Н.У. Нургалиев, Н.Т. Смайлова, Ж.Т. Нұртай, Г.М. Нургазина, А.Ж. Хамит
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ **7**

A.F. Urazova, S.S. Satayeva, D.S. Nazarova, A.I. Khatsrinov, G.A. Otegenova
INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING LIQUID GLASS BASED ON OPOKA FROM THE TASKALA DEPOSIT **18**

Г.К. Мамытбекова, Ж.Е. Нұрлыханова, А.Қ. Кенжеболат, Е.М. Сүлеймен
ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ POLYGONUM ТУЫСЫ ТҮРЛЕРІНІҢ ЭКСТРАКТТАРЫНЫҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ: АНТИМИКРОБТЫҚ, ЦИТОТОКСИКАЛЫҚ ЖӘНЕ АНТИРАДИКАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ **26**

A.B. Bekmagambetov, A.M. Rakhmetova, E.A. Kulmagambetova, G.A. Alshynbekova, I.E. Sarybaeva, R.A. Tokatova, Mohamed Rifky
COLLECTIVE PROTECTION MEASURES IN THE OCCUPATIONAL RISK MANAGEMENT SYSTEM: A COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES IN KAZAKHSTAN, THE EU, GERMANY AND THE USA . **34**

А.С. Кусенова, А.К. Салькеева, Н.У. Нургалиев, Г.М. Нургазина
КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГЛЕЙ **53**

И. Леонтьева, С. Масакбаева, Р. Несмеянова, М. Елубай, С. Ковтарева, О. Мукашев
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ-СТАБИЛИЗАТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНА И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕГО **64**

M.K. Kazankapova, B.T. Yermagambet, A.B. Malgazhdarova, Zh.M. Kassenova, U.M. Kozhamuratova, A.S. Akshekina, A.B. Bekbosynov
COMPARATIVE STUDY OF THE PURIFICATION OF FULVIC ACID OBTAINED FROM AMMONIUM HUMATE USING CARBON SORBENTS **77**

А.Т. Джасакбаев, З.Б. Сұлтамұратова, Ж.К. Карешова, А.К. Жумабекова
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА ИЗ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА КАК КОМПОНЕНТА ТОПЛИВА **89**

M.K. Kazankapova, B.T. Yermagambet, U.M. Kozhamuratova, A.B. Malgazhdarova, Zh.M. Kassenova, A.S. Akshekina, A.B. Bekbosynov
STUDY OF CO_2 ABSORPTION BY AN AQUEOUS SOLUTION OF POTASSIUM HUMATE WITH MICROSILICA **113**

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ

Н.У. Нургалиев[1]✉, Н.Т. Смайлова[1], Ж.Т. Нұртай[1], Г.М. Нургазина[2]✉, А.Ж. Хамит[1]

[1] *Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан*
[2] *Международный университет Астана, Астана, Казахстан*
✉ *Корреспондент-автор: nurgaliev_nao@mail.ru, ast.gulnar@mail.ru*

Received: 19 July 2026
Accepted: 03 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: N.U. Nurgaliyev, et al. « МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-6
License CC BY 4.0

В работе представлено математическое моделирование процесса слоевой газификации углей различных месторождений Казахстана для установления закономерностей влияния основных технологических факторов на формирование состава генераторного газа и показатели эффективности газификации. Исследование выполнено для углей Шубаркульского и Сарыадырского месторождений (пласты «Пятиметровый», «Надежный»), а также Майкубенского угольного бассейна. Разработанная математическая модель процесса позволяет рассчитывать состав генераторного газа, его теплотворную способность, выход сухого газа, коэффициент полезного действия газификации и определять влияние расходов воздуха, кислорода и водяного пара при паровоздушном и паро-кислородном дутье. Установлено, что увеличение расхода водяного пара обеспечивает рост объемного отношения H_2/CO до требуемых значений, однако сопровождается снижением концентрации CO, теплотворной способности генераторного газа и коэффициента полезного действия процесса. Показано, что паро-кислородное дутье способствует получению газа с более высокой теплотворной способностью, тогда как паро-воздушное дутье обеспечивает больший выход сухого генераторного газа. Среди исследованных образцов наиболее высокие технологические показатели получены для Шубаркульского угля, а наименьшая эффективность газификации установлена для угля Сарыадырского месторождения (пласт «Надежный»). Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными подтвердило адекватность разработанной модели и возможность ее использования для прогнозирования характеристик процесса и выбора рациональных режимов газификации.

Ключевые слова: уголь, математическое моделирование, слоевая газификация, генераторный газ, паро-воздушное дутье, паро-кислородное дутье, выход газа.

КӨМІРДІ ҚАБАТТЫ ГАЗДАНДЫРУ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Н.У. Нургалиев[1]✉, Н.Т. Смайлова[1], Ж.Т. Нұртай[1], Г.М. Нұрғазина[2]✉, А.Ж. Хамит[1]

[1] *Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан*
[2] *Астана Халықаралық Университеті, Астана, Казахстан*
✉ *e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru, ast.gulnar@mail.ru*

Жұмыста генераторлық газдың құрамын қалыптастыруға негізгі технологиялық факторлардың әсер ету заңдылықтарын және газдандыру тиімділігінің көрсеткіштерін анықтау үшін Қазақстанның әртүрлі кен орындарындағы көмірді қабатты газдандыру процесін математикалық модельдеу ұсынылған. Зерттеу Шұбаркөл және Сарыадыр кен орындарының («Пятиметровый», «Надежный» қабаттары), сондай-ақ Майкубен көмір бассейнінің көмірі үшін

жүргізілді. Процестің математикалық моделі генераторлық газдың құрамын, оның калориялық құндылығын, құрғақ газдың шығуын, газдандырудың пайдалы әсер ету коэффициентін есептеуге және бу-ауа және бу-оттегі үрлеуіндегі ауа, оттегі және су буы шығындарының әсерін анықтауға мүмкіндік береді. Су буының шығынын ұлғайту H_2/CO көлемдік қатынасының қажетті мәндерге дейін өсуін қамтамасыз ететіні анықталды, бірақ CO концентрациясының, генератор газының калориялық құндылығы мен процестің пайдалы әсер ету коэффициентінің төмендеуімен бірге жүреді. Бу-оттегі үрлеуі жоғары калориялы газды шығаруға ықпал ететіні көрсетілген, ал бу-ауа үрлеуі құрғақ генератор газының көбірек шығуын қамтамасыз етеді. Зерттелген үлгілердің ішінде Шұбаркөл көмірі үшін ең жоғары технологиялық көрсеткіштер алынды, ал газдандырудың ең төмен тиімділігі Сарыадыр кен орнындағы көмір үшін белгіленді («Надежный» қабаты). Модельдеу нәтижелерін эксперименттік деректермен салыстыру әзірленген модельдің сәйкестігін және оны процестің сипаттамаларын болжау, газдандырудың ұтымды режимдерін таңдау және өнеркәсіптік газдандыру қондырғыларын оңтайландыру үшін пайдалану мүмкіндігін растады.

Түйін сөздер: көмір, математикалық модельдеу, қабатты газдандыру, генераторлық газ, бу-ауа үрлеуі, бу-оттегі үрлеуі, газ шығымы.

MODELING OF THE FIXED-BED GASIFICATION PROCESS OF COALS

N.U. Nurgaliyev[1]✉, N.T. Smailova[1], Zh.T. Nurtai[1], G.M. Nurgazina[2]✉, A. Zh. Khamit[1]

[1] *Kazakh University of Technology and Business named after K.Kulazhanov, Astana, Kazakhstan*
[2] *Astana International University, Astana, Kazakhstan*
✉ *e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru, ast.gulnar@mail.ru*

This paper presents a mathematical modeling study of the fixed-bed gasification process for coals from various deposits in Kazakhstan, with the aim of identifying patterns in how key technological factors influence the composition of the synthesis gas and gasification efficiency indicators. The study was conducted for coals from the Shubarkul and Saryadyr deposits (the “Pyatimetrovy” and “Nadezhny” seams), as well as the Maikuben coal basin. A mathematical model of the process has been developed that allows for the calculation of the composition of the generator gas, its calorific value, dry gas yield, and gasification efficiency, as well as the determination of the influence of air, oxygen, and steam flow rates during steam-air and steam-oxygen blowing. It has been established that increasing the steam flow rate raises the H_2/CO volume ratio to the required values; however, this is accompanied by a decrease in CO concentration, the calorific value of the generator gas, and the process efficiency. It has been shown that steam-oxygen blowing contributes to the production of gas with a higher calorific value, whereas steam-air blowing yields a greater amount of dry generator gas. Among the samples studied, the highest process performance indicators were obtained for Shubarkul coal, while the lowest gasification efficiency was observed for coal from the Saryadyr deposit (the “Nadezhny” seam). A comparison of the simulation results with experimental data confirmed the adequacy of the developed model and its applicability for predicting process characteristics and selecting rational gasification operating conditions.

Keywords: coal, mathematical modeling, fixed-bed gasification, producer gas, steam-air gasification, steam-oxygen gasification, gas yield.

Введение. Казахстан располагает значительными запасами угля, который продолжает играть важную роль в энергетическом балансе страны. Однако традиционное сжигание угля сопровождается высокими выбросами CO_2, оксидов серы и азота, а также твердых частиц, что приводит к ухудшению экологической обстановки и стимулирует поиск более эффективных и экологически безопасных технологий переработки твердых топлив.

Одним из наиболее перспективных решений является газификация угля, позволяющая преобразовывать органическую массу топлива в горючий газ, состоящий преимущественно из CO, H_2 и CH_4. Полученный газ может использоваться как энергетическое топливо или как синтез-газ для производства химической продукции. По сравнению с прямым сжиганием газификация обеспечивает более эффективное использование энергии топлива, снижение выбросов загрязняющих веществ и возможность интеграции с технологиями улавливания углерода.

Несмотря на значительный объем исследований, экспериментальное изучение процессов газификации требует сложного оборудования и значительных материальных затрат. В связи с этим особую актуальность приобретают методы математического моделирования, позволяющие исследовать влияние

состава угля, режима дутья и технологических параметров на температурное поле, кинетику процесса и состав генераторного газа без проведения большого числа дорогостоящих экспериментов.

Особый интерес представляет моделирование слоевой газификации углей, свойства которых существенно различаются в зависимости от месторождения и оказывают значительное влияние на эффективность процесса. Разработка адекватных математических моделей позволяет оптимизировать режимы газификации, повысить энергетическую эффективность процесса и обеспечить рациональное использование угольных ресурсов. Современные модели позволяют описывать сложные физико-химические процессы, протекающие в реакторе, а также прогнозировать состав генераторного газа и основные технологические параметры процесса. Математические модели газификации основываются на системе уравнений сохранения массы, энергии и импульса для газовой и твердой фаз. При этом учитываются процессы теплопередачи, диффузии компонентов газовой смеси, а также химические реакции, протекающие между газообразными реагентами и твердым углеродом топлива. В общем случае такие модели включают уравнения теплопроводности, уравнения массообмена для отдельных компонентов газовой смеси и кинетические уравнения химических реакций [1].

В зависимости от уровня детализации математического описания выделяют несколько основных типов моделей газификации твердых топлив [2]. Одним из наиболее распространенных подходов являются термодинамические равновесные модели, основанные на предположении, что химические реакции в реакторе протекают достаточно быстро и система стремится к термодинамическому равновесию. Такие модели широко применяются для оценки состава генераторного газа и энергетической эффективности процесса, поскольку они относительно просты и требуют ограниченного числа исходных параметров [3]. Другим распространенным типом являются кинетические модели, в которых учитываются реальные скорости химических реакций между углеродом и газифицирующими агентами (водяным паром, кислородом, диоксидом углерода). Эти модели позволяют более точно описывать процессы газификации, особенно в условиях, когда реакции протекают с конечной скоростью и система не достигает полного термодинамического равновесия [4].

Для инженерных расчетов и анализа работы промышленных газификаторов часто применяются одномерные стационарные модели, в которых слой топлива рассматривается как система зон с различными температурами и химическими реакциями. Такие модели представляют собой систему уравнений тепломассопереноса между неподвижным слоем топлива и движущимся потоком газа, с учетом выхода летучих веществ, испарения влаги и реакций газификации углерода [5]. В более сложных исследованиях применяются нестационарные модели, позволяющие анализировать динамику процессов в газификаторе при изменении технологических режимов [6]. Эти модели используются для изучения переходных процессов, движения фронта горения и распространения температурных волн в слое топлива [7].

Современное развитие цифровых технологий привело к широкому применению методов численного моделирования на основе вычислительной гидродинамики. Такие модели позволяют учитывать пространственное распределение температуры, скорости газового потока и концентраций компонентов, а также моделировать сложные процессы взаимодействия газовой и твердой фаз в газификационных реакторах различной конструкции [8]. В ряде исследований газификатор рассматривается как система последовательно соединенных реакционных зон или как совокупность реакторов идеального смешения, что позволяет упростить математическое описание процесса и использовать такие модели для инженерных расчетов и оптимизации технологических параметров [9].

Таким образом, существующие математические модели газификации позволяют описывать основные физико-химические процессы, протекающие в газификаторе, и прогнозировать влияние различных технологических факторов на характеристики процесса. Однако, несмотря на значительный прогресс в области математического моделирования, вопросы, связанные с учетом реальных свойств углей различных месторождений, оптимизацией режимов газификации и повышением энергоэффективности процесса, остаются актуальными.

Целью настоящей работы является математическое моделирование слоевой газификации (в неподвижном слое) углей различных месторождений Казахстана с анализом влияния основных технологических параметров на состав генераторного газа и эффективность процесса.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были выбраны угли Шубаркульского

и Сарыадырского месторождений (пласты «Пятиметровый», «Надежный»), а также Майкубенского угольного бассейна (далее- угли Шубаркуль, Сарыадыр и Майкубен соответственно).

В ходе исследования среди различных методов расчета был выбран метод Доброхотова Н.Н., который используется при расчетах слоевой газификации каменных и бурых углей, и впоследствии усовершенствовался [10]. Основным результатом расчета является определение состава и выхода генераторного газа при различных технологических режимах газификации, отличающихся расходами воздуха, кислорода и водяного пара, а также соотношением H_2/CO (от 1 до 2).

В данном методе расчет ведется отдельно по обеим стадиям: а) стадии сухого разложения без доступа воздуха (в верхней части газификатора) и
б) собственно процесса газификации (в нижней части генератора). При этом, исходя из практических данных (полученных ранее экспериментальным путем исследователями), задаются распределением содержащихся в топливе углерода, кислорода и водорода между компонентами газа (*CO, H_2, CH_4, CO_2, H_2O* и др.). Затем подсчитывают количество *CO, H_2, CO_2 и H_2O* в газе, полученном по основному генераторному процессу в нижней части газификатора. Для определения количества каждого из этих компонентов решают систему уравнений балансов для углерода, водорода, кислорода (для воздушного и кислородного дутья), а также уравнение константы равновесия [11]:

При данном расчете газификации угля использовали основные уравнения реакций:

$$C + O_2 \Leftrightarrow \mathrm{CO_2}$$
$$\Delta H = -406.4 \text{ кДж/моль} \quad (1)$$

$$\mathrm{CO_2} + C \Leftrightarrow 2\ \mathrm{CO}$$
$$\Delta H = 160.1 \text{ кДж/моль} \quad (2)$$

$$H_2O + C \Leftrightarrow H_2 + \mathrm{CO}$$
$$\Delta H = 118.6 \text{ кДж/моль} \quad (3)$$

$$\mathrm{CO} + H_2O \Leftrightarrow \mathrm{CO_2} + H_2$$
$$\Delta H = -41.0 \text{ кДж/моль} \quad (4)$$

$$C + 2H_2 \Leftrightarrow \mathrm{CH_4}$$
$$\Delta H = -83.8 \text{ кДж/моль} \quad (5)$$

$$2H_2 + O_2 \Leftrightarrow 2H_2O$$
$$\Delta H = -482.2 \text{ кДж/моль} \quad (6)$$

$$2C + O_2 \Leftrightarrow 2\ \mathrm{CO}$$
$$\Delta H = -246.4 \text{ кДж/моль} \quad (7)$$

Уравнение константы равновесия

$$\frac{\mathrm{CO} \cdot H_2O}{\mathrm{CO_2} \cdot H_2} = K_\mathrm{p} \quad (8)$$

Константу равновесия K_p из уравнения (5) определяли по формуле:

$$\lg K_\mathrm{p} = -\frac{2203.24}{T} - 5.1588 \cdot 10^{-}5T - 2.5426 \cdot 10^{-}7T^2 + 7.461 \cdot 10^{-}11T^3 + 2.3 \quad (9)$$

Теплотворную способность газа $Q_г$ и коэффициент полезного действия газификации (КПД) $H_г$ рассчитывали по известным формулам [11]:

$$Q_\mathrm{г} = 0.01 \cdot \left(n_C Q_C + n_{\mathrm{H_2}} Q_{\mathrm{H_2}} + n_{\mathrm{CH_4}} Q_{\mathrm{CH_4}} + n_{\mathrm{H_2S}}\ Q_{\mathrm{H_2S}}\right) \quad (10)$$

$$\eta_\mathrm{г} = \frac{V_\mathrm{г} Q_\mathrm{г}}{V_\mathrm{y} Q_\mathrm{y}} \cdot 100\% \quad (11)$$

где n_C, n_{H2}, n_{CH4}, n_{H2S} – концентрации компонентов CO, H_2, CH_4, H_2S (об. %) в газе; Q_C, Q_{H2}, Q_{CH4}, Q_{H2S} – соответственно теплотворные способности компонентов CO, H_2, CH_4, H_2S (кДж/м^3); $V_г$ – общее количество газа (м^3); $Q_г$ и Q_y – теплотворные способности газа (кДж/м^3) и угля (кДж/кг); V_y – количество газифицируемого угля (кг).

Реализация расчета по данной методике с учетом уравнений (1)-(11) осуществляли с помощью программного обеспечения MATLAB, предназначенной для численного моделирования и решения инженерных задач. Компьютерный расчет в данной модели проводился в двух режимах, в которых в качестве дутья использованы следующие газовые реагенты: 1) водяной пар и воздух (паро-воздушное дутье); 2) водяной пар и кислород (паро-кислородное дутье).

Расход водяного пара при моделировании варьировали таким образом, чтобы объемное соотношение H_2/CO в генераторном газе находилось в диапазоне от 1 до 2. Это обусловлено тем, что указанный

диапазон соотношений широко используется при получении синтез-газа, предназначенного для последующего синтеза метанола, альдегидов, алифатических углеводородов и других химических продуктов. Полученные результаты моделирования позволяют определить рациональные технологические параметры процесса газификации, обеспечивающие получение генераторного газа, пригодного как для использования в качестве энергетического топлива, так и в качестве сырья для последующего химического синтеза.

Результаты и их обсуждение. Для проведения моделирования использованы характеристики процесса слоевой газификации углей Шубаркуль, Майкубен и Сарыадыр, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики газифицируемых видов топлив

Топливо (месторождение)	Состав угля (на рабочую массу), %								Теплота сгорания, (ккал/кг)	
									высшая	низшая
	W^r_t	A^r	V^{daf}	C^r	O^r	H^r	N^r	S^r	$Q^r_в$	$Q^r_н$
Шубаркуль	11,42	2,76	57,48	66,78	12,75	4,63	1,37	0,29	6435	6127
Майкубен	9,50	13,00	49,99	57,2	15,1	3,87	0,78	0,55	5416	5150
Сарыадыр («Пятиметровый»)	2,56	19,71	50,54	64,73	7,55	4,29	0,77	0,39	6104	5831
Сарыадыр «Надежный»	2,94	46,47	27,68	40,71	6,56	2,66	0,39	0,27	3932	3771

Примечание: W^r_t и A^r – влажность и зольность угля (на рабочую массу); V^{daf} – содержание летучих веществ в угле; C^r, O^r, H^r, N, S^r – концентрации углерода, кислорода, водорода, азота, серы соответственно (на рабочую массу).

На рисунках 1-4 приведены зависимости концентрации основных компонентов газа (сухого) от расхода водяного пара (на 1 кг угля). Обозначения на рисунках: CO (п-в), H_2 (п-в), CH_4 (п-в), CO_2 (п-в) – компоненты газа при паро-воздушном дутье (п-в-дутье) (отмечены синим цветом); CO (п-к), H_2 (п-к), CH_4 (п-к), CO_2 (п-к) – компоненты газа при паро-кислородном дутье (п-к-дутье) (отмечены красным цветом).

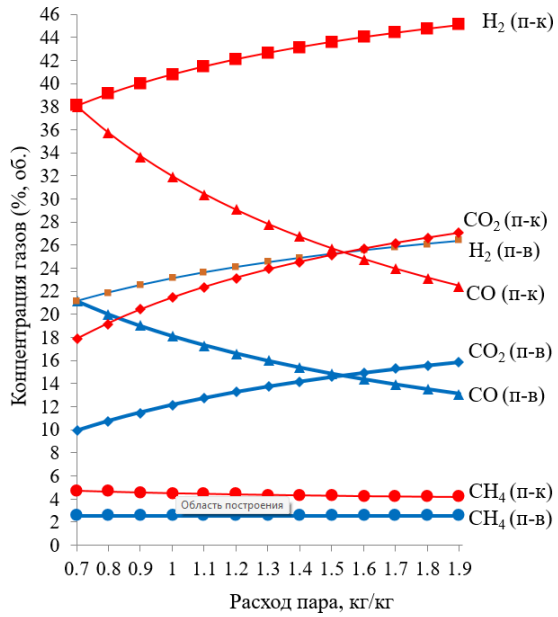


Рис. 1 - Зависимость концентрации компонентов газа из Шубаркульского угля от расхода водяного пара

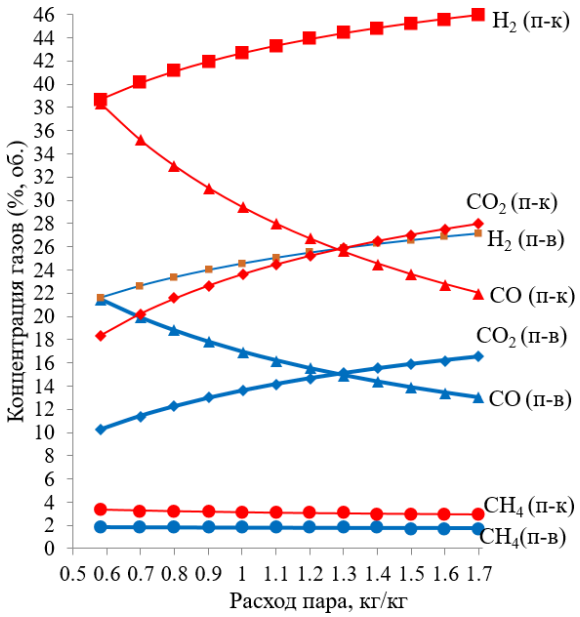


Рис. 2 - Зависимость концентрации компонентов газа из Майкубенского угля от расхода водяного пара

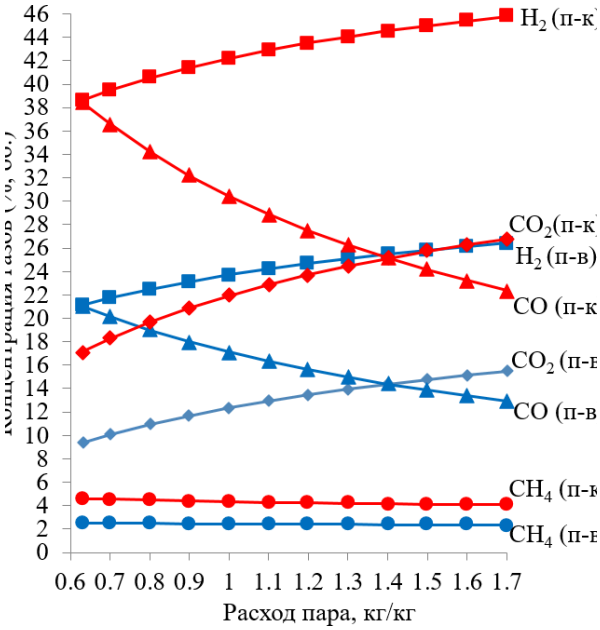


Рис. 3 - Зависимость концентрации компонентов газа из Сарыадырского угля (пласт «Пятиметровый») от расхода водяного пара

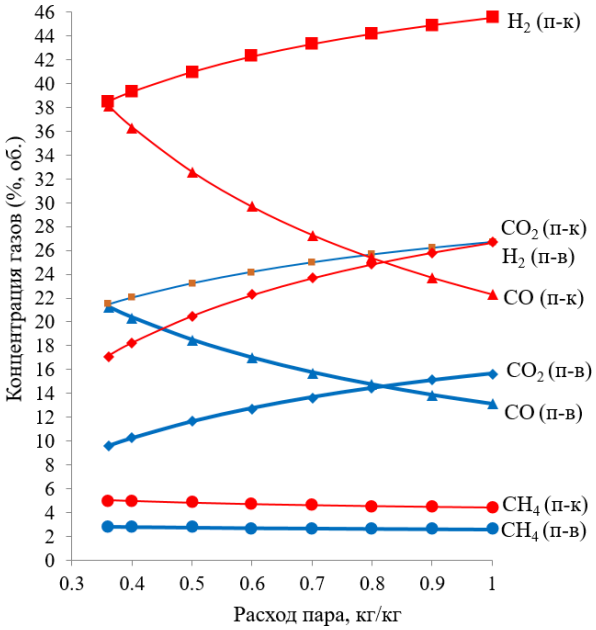


Рис. 4 - Зависимость концентрации компонентов газа из Сарыадырского угля (пласт «Надежный») от расхода водяного пара

Как видно, закономерности влияния расхода водяного пара (на 1 кг угля) на выход компонентов газа при обоих видах дутья носят идентичный характер для всех исследуемых углей различных месторождений. Основное отличие состоит лишь в интервале значений расхода водяного пара и расхода воздуха (или кислорода).

Анализ полученных данных показывает, что при одинаковых расходах водяного пара при повышении расхода воздуха (или кислорода) соотношение H_2/CO почти не изменяется, по-видимому из-за малого интервала изменения расхода. Согласно работам [11, 12], увеличение подачи водяного пара способствует смещению равновесия реакции водяного газа в сторону образования водорода и диоксида углерода, что приводит к росту отношения H_2/CO в синтез-газе. При этом наблюдается снижение концентрации оксида углерода и некоторое уменьшение общей теплотворной способности получаемого газа. Современные математические модели и экспериментальные исследования также подтверждают, что увеличение парового коэффициента сопровождается ростом общего выхода газа и изменением его компонентного состава, что важно учитывать при оптимизации режимов работы слоевых газификаторов и получении синтез-газа с заданными характеристиками. Однако, максимальный выход основных компонентов газа H_2, CO, CH_4 ($V_{г.}$, м³/кг) наблюдается при наименьшем расходе воздуха. Аналогичная зависимость наблюдается и при паро-кислородном дутье. С учетом этого, указанные параметры по синтез-газу характеризуют рациональные условия ведения процесса газификации (таблица 2).

Результаты проведенного расчета показывают, что увеличение расхода водяного пара при п-в-дутье и п-к-дутье в достаточно широких диапазонах (от 0,36-0,7 до 1,0-1,9 кг/кг) приводит (для сухого газа) к существенному уменьшению концентрации CO (об. %), некоторому повышению объемного содержания H_2 и CO_2 в газе и соотношения H_2/CO (от 1 до 2). Такое влияние H2O происходит в соответствии с реакцией водяного газа (4), что непосредственно отражается на некотором уменьшении общей концентрации горючих компонентов газа (CO,H_2,CH_4), и соответственно на снижении калорийности газа и КПД газификации. Это обусловлено тем, что снижение концентрации CO существенно превышает увеличение содержания H_2. Кроме того, теплотворная способность CO выше, чем H_2. Вместе с тем, незначительно уменьшается доля компонентов CH_4, N_2, C_2H_4. В связи с этим, как при паро-кислородном, так и при паро-воздушном дутьях увеличение расхода водяного пара приводит к: 1) повышению целевого соотношения H_2:CO (от 1 до 2) (в соответствии с реакцией водяного газа: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$); 2) снижению общей концентрации горючих компонентов газа, и как следствие этого уменьшается калорийность газа и КПД газификации; 3) увеличению общего выхода газа.

Сравнение данных по двум режимам ведения процесса газификации показывает, что при паро-

кислородном дутье (по сравнению с паро-паровоздушным), общая концентрация горючих компонентов (CO,H_2,CH_4) и соответственно калорийность газа при п-к-дутье существенно выше (примерно в 1,7-1,8 раз на всем интервале изменения соотношения H_2/CO), что обусловлено отсутствием балластного газа N_2 и окисляющим действием кислорода. Отсутствие N_2 облегчает условия дальнейшего использования полученного газа. Однако при п-к-дутье концентрация CO_2 в сухом газе выше по сравнению с п-в-дутьем, ввиду протекания реакции (1). При этом, общие концентрации горючих компонентов газа для всех углей варьируется в пределах от 61-67 до 37-42 % (при паро-кислородном дутье) и от 38-40 до 27-29 % (при паро-паровоздушном дутье) на всем интервале изменения соотношения H_2 и CO (от 1 до 2). Выход сухого газа при паро-воздушном дутье существенно выше, чем при паро-кислородном дутье (≈1,7-1,8 раз), из-за большого содержания N_2. Вместе с тем, КПД для обоих видов дутья составляют одинаковые значения, так как более низкий выход сухого газа при п-к-дутье компенсирует его более высокая калорийность, в соответствии с формулой (10).

Таблица 2 - Основные параметры процесса газификации углей

Топливо	Расход воздуха ($м^3$/кг), п-в-дутье/ п-к-дутье	Расход водяного пара (кг/кг),	Калорийность газа (ккал/$м^3$), п-в-дутье/ п-к-дутье	КПД газификации (%) п-в-дутье/ п-к-дутье
Шубаркуль	1,944 / 0,583	0,7-1,9	1288,1-1410,0 / 2200-2536	77,88-79,63 / 77,88-79,63
Майкубен	1,625 / 0,487	0,58-1,7	1244,1-1370,7 / 2107,9-2450,4	75,66-77,53 / 75,66-77,53
Сарыадыр («Пятиметровый»)	1,912 / 0,574	0,63-1,7	1275,7-1399,1 / 2208,9-2557,3	78,22-80,03 / 78,22-80,03
Сарыадыр «Надежный»	1,046 / 0,314	0,36-1,0	1311,4-1437,8 / 2233,7-2579,9	69,60-71,17 69,60-71,17

Примечание: интервалы расходов водяного пара для двух222-х видов дутья одинаковы, поэтому даны по одному диапазону (для каждого месторождения)

Несмотря на то, что концентрации горючих компонентов газа (%) для всех образцов углей незначительно отличаются друг от друга, их абсолютные величины (в $м^3$/кг) заметно различаются, что показано на рисунках 5,6. Наибольший общий выход сухого газа наблюдается у Шубаркульского угля, наименьший – у Сарыадырского угля (пласт «Надежный»), значения $V_{сух.}$ которых отличаются друг от друга почти в 2 раза. Исследованные образцы углей можно расположить в порядке убывания выхода сухого газа при паро-воздушном дутье следующим образом: Шубаркуль → Сарыадыр («Пятиметровый») → Майкубен → Сарыадыр («Надежный»). Такое ранжирование обусловлено различиями в физико-химических свойствах углей, прежде всего содержанием углерода, водорода, кислорода, влаги и золы, определяющими степень газифицируемости топлива и эффективность образования генераторного газа. Характерные особенности каждого исследованного угля представить следующим образом:

1) Шубаркуль ($V_{сух.}$ = 3,46-3,70 $м^3$/кг) (наименьшее содержание зольности (A^r = 2,76 %); наибольшее содержание элементов C и H_2, высокое содержание O_2);

2) Сарыадыр («Пятиметровый») ($V_{сух.}$ = 3,33-3,57 $м^3$/кг) (относительно высокое содержание элементов C и H_2, наименьшее содержание влаги (W^r_t = 2,56 %);

3) Майкубен ($V_{сух.}$ = 2,91-3,13 $м^3$/кг) (относительно невысокое содержание углерода C, относительно низкое содержание зольности (A^r = 13,0 %), наибольшее содержание кислорода O_2);

4) Сарыадыр («Надежный») ($V_{сух.}$ = 1,87-2,00 $м^3$/кг) (наибольшее содержание зольности (A^r = 46,47 %), наименьшее содержание элементов C, H_2, O_2).

Выход сухого газа является одним из ключевых показателей эффективности процесса газификации, поскольку непосредственно определяет потенциальную производительность установки и экономическую целесообразность технологии. Повышенные концентрации N_2, CO_2, H_2O в газе увеличивают нагрузку на газоочистку для дальнейшей переработки в целевые продукты. Указанные недостатки при получении газа в газификаторах частично устраняют

повышением температуры водяного пара (свыше 300°C), что способствует более благоприятному протеканию деструктивных процессов разложения угля.

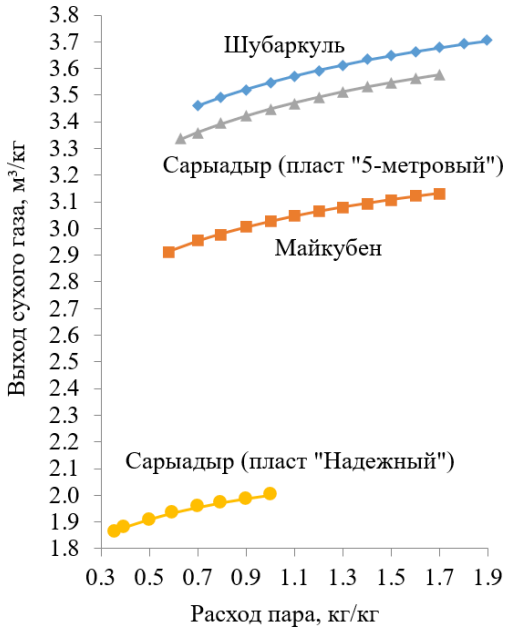


Рис. 5 - Влияние расхода водяного пара (на 1 кг угля) на выход сухого газа при паро-воздушном дутье

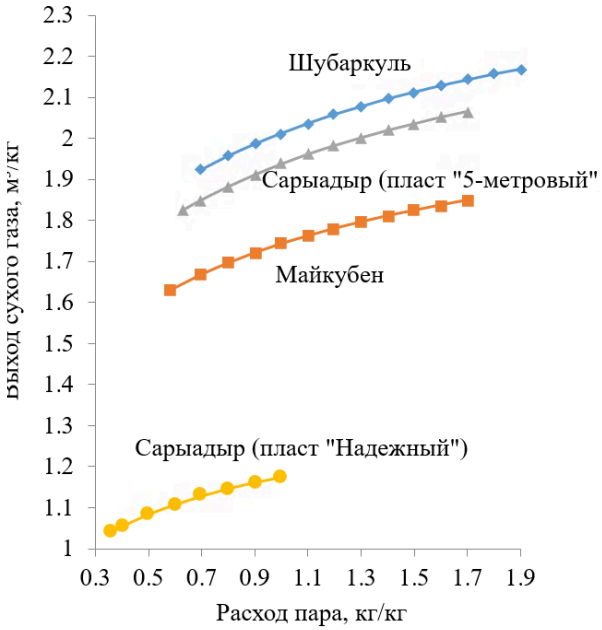


Рис. 6 - Влияние расхода водяного пара (на 1 кг угля) на выход сухого газа при паро-кислородном дутье

Для оценки адекватности разработанной математической модели результаты моделирования процесса слоевой газификации были сопоставлены с ранее полученными экспериментальными данными [11-13] для исследуемых углей при идентичных условиях проведения экспериментов. Сравнение выполнялось по основным технологическим показателям процесса, включая состав генераторного газа, расходы дутьевых реагентов, температурный режим газификации и выход газообразных продуктов. Полученные результаты показали хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных: отклонения по содержанию основных компонентов генераторного газа находились в допустимых пределах, а рассчитанные значения адекватно воспроизводили наблюдаемые экспериментальные зависимости. Это свидетельствует о корректности принятых модельных допущений и возможности использования разработанной модели для прогнозирования характеристик слоевой газификации углей, а также для оптимизации технологических режимов процесса.

Выводы. В результате проведенного исследования разработана и реализована математическая модель процесса слоевой газификации углей различных месторождений Казахстана с использованием программного комплекса MATLAB. Выполнено моделирование газификации при паро-воздушном и паро-кислородном дутье с анализом влияния расходов водяного пара, воздуха и кислорода на состав генераторного газа, его теплотворную способность, выход сухого газа и коэффициент полезного действия процесса. Установлено, что увеличение расхода водяного пара обеспечивает повышение объемного отношения H_2/CO в диапазоне от 1 до 2, что благополучно для получения синтез-газа. Однако это сопровождается уменьшением концентрации CO, снижением теплотворной способности генераторного газа и КПД газификации. Максимальная теплотворная способность газа достигается при минимально допустимых расходах дутьевых реагентов, обеспечивающих устойчивое протекание процесса газификации. Показано, что при паро-кислородном дутье формируется генераторный газ с более высокой концентрацией горючих компонентов и повышенной теплотворной способностью по сравнению с паро-воздушным режимом, что делает его более предпочтительным для получения энергетического газа. Вместе с тем, при паро-воздушном дутье достигается более высокий выход сухого газа вследствие присутствия балластного азота в составе газовой смеси. Среди исследованных углей наиболее эффективным для процесса слоевой газификации оказался Шубаркульский уголь, обеспечивающий наиболее высокий выход генераторного газа и наиболее благоприятные

технологические показатели процесса, тогда как наименее эффективным является Сарыадырский уголь (пласт «Надежный»), что обусловлено его высокой зольностью и низким содержанием органической массы. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений основных технологических параметров, что подтверждает адекватность разработанной математической модели. Полученная модель может быть использована для прогнозирования характеристик процесса, выбора оптимальных режимов слоевой газификации различных видов твердых топлив, а также при проектировании и оптимизации промышленных газификационных установок.

Литература

1. Zheng M., Pan Y., Wang Z., Li X.X., Guo L. Capturing the dynamic profiles of products in Hailaer brown coal pyrolysis with reactive molecular simulations and experiments // Fuel. - 2020. - Vol. 268(5):117290. DOI 10.1016/j.fuel.2020.117290.
2. Gao M.J., Li X.X., Guo L. Pyrolysis simulations of Fugu coal by large-scale ReaxFF molecular dynamics// Fuel Processing Technology.-2018.-Vol.178.-P.197-205. DOI 10.1016/j.fuproc.2018.05.023.
3. Wang J., Hou Q.L., Zeng F.G., Guo G.J. Gas generation mechanisms of bituminous coal under shear stress based on ReaxFF molecular dynamics simulation // Fuel.- 2021. - Vol. 298. - P.120240. DOI 10.1016/j.fuel.2021.120240.
4. Huang Z.B., Zhou W.J., Wei J.J. Study on the molecular structure model of tar-rich coal and its pyrolysis process // Journal of Molecular Structure.-2023.-Vol.1286: 135613. DOI 10.1016/j.molstruc.2023.135613.
5. Cui R.T., Xu W.L., Zhang Y.P., Wang J.X., Qiao Y.Y., Tian Y.Y. In-depth understanding of the rapid pyrolysis free radical reaction regulation mechanism of C–S bonds in coal at the molecular level // Fuel. - 2025. - Vol. 389:134630. DOI 10.1016/j.fuel.2025.134630.
6. Zhou J.J., Wang J., Tang S.Z., Li Z.C., Xu Y.Y., Niu X. Simulations on coal water slurry gasification by molecular dynamics method with ReaxFF // Journal of Molecular Modeling. – 2024. - Vol. 30(7). - 213. DOI 10.1007/s00894-024-06017-9.
7. O'Rourke P.J., Snider D.M. A new blended acceleration model for the particle contact forces induced by an interstitial fluid in dense particle/fluid flows // Powder Technology. −2014. - Vol. 256. - P. 39-51. DOI 10.1016/j.powtec.2014.01.084.
8. Carlo, Borello D., Bocci E. Process simulation of a hybrid SOFC/mGT and enriched air/steam fluidized bed gasifier power plant // International Journal of Hydrogen Energy. - 2013. - Vol. 38. - P. 5857-5874. DOI 10.1016/j.ijhydene.2013.03.005.
9. Solnordal C.B., Kenche V., Hadley T.D., Feng Y., Witt P.J., Lim K.S. Simulation of an internally circulating fluidized bed using a multiphase particle-in-cell method // Powder Technology. - 2015. - Vol. 274. - P. 123-134. DOI 10.1016/j.powtec.2014.12.045.
10. Зубилин И.Г., Рудыка В.И. Получение синтез-газов для производства экологически чистых моторных топлив: теория и технология.- Харьков: Издат. центр Харьков. нац. университета, 2002.– 313 с. ISBN 966-623-108-5.
11. Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Набиев М.А., Касенова Ж.М., Реминный Р.А., Букетаев А.С. Исследование процесса паро-воздушной газификации углей различных месторождений Казахстана // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. 2014. - Ч. 2. - № 6(103). - С. 355-359.
12. Набиев М.А., Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М, Реминный Р.А. Получение синтетического газа из угля // Промышленность Казахстана. 2014. - № 6(87). - С. 68-71.
13. Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М., Зикирина А.М., Холод А.В. Получение горючего газа из Сарыадырского угля // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. 2016. - Ч. 2. - №4(113). - С. 312-315.

References

1. Zheng M., Pan Y., Wang Z., Li X.X., Guo L. Capturing the dynamic profiles of products in Hailaer brown coal pyrolysis with reactive molecular simulations and experiments // Fuel. - 2020. - Vol. 268(5):117290. DOI 10.1016/j.fuel.2020.117290.
2. Gao M.J., Li X.X., Guo L. Pyrolysis simulations of Fugu coal by large-scale ReaxFF molecular dynamics// Fuel Processing Technology.-2018.-Vol.178.-P.197-205. DOI 10.1016/j.fuproc.2018.05.023.

3. Wang J., Hou Q.L., Zeng F.G., Guo G.J. Gas generation mechanisms of bituminous coal under shear stress based on ReaxFF molecular dynamics simulation // Fuel.- 2021. - Vol. 298. - P.120240. DOI 10.1016/j.fuel.2021.120240.
4. Huang Z.B., Zhou W.J., Wei J.J. Study on the molecular structure model of tar-rich coal and its pyrolysis process // Journal of Molecular Structure.-2023.-Vol.1286: 135613. DOI 10.1016/j.molstruc.2023.135613.
5. Cui R.T., Xu W.L., Zhang Y.P., Wang J.X., Qiao Y.Y., Tian Y.Y. In-depth understanding of the rapid pyrolysis free radical reaction regulation mechanism of C–S bonds in coal at the molecular level // Fuel. - 2025. - Vol. 389:134630. DOI 10.1016/j.fuel.2025.134630.
6. Zhou J.J., Wang J., Tang S.Z., Li Z.C., Xu Y.Y., Niu X. Simulations on coal water slurry gasification by molecular dynamics method with ReaxFF // Journal of Molecular Modeling. – 2024. - Vol. 30(7). - 213. DOI 10.1007/s00894-024-06017-9.
7. O'Rourke P.J., Snider D.M. A new blended acceleration model for the particle contact forces induced by an interstitial fluid in dense particle/fluid flows // Powder Technology. −2014. - Vol. 256. - P. 39-51. DOI 10.1016/j.powtec.2014.01.084.
8. Carlo, Borello D., Bocci E. Process simulation of a hybrid SOFC/mGT and enriched air/steam fluidized bed gasifier power plant // International Journal of Hydrogen Energy. - 2013. - Vol. 38. - P. 5857-5874. DOI 10.1016/j.ijhydene.2013.03.005.
9. Solnordal C.B., Kenche V., Hadley T.D., Feng Y., Witt P.J., Lim K.S. Simulation of an internally circulating fluidized bed using a multiphase particle-in-cell method // Powder Technology. - 2015. - Vol. 274. - P. 123-134. DOI 10.1016/j.powtec.2014.12.045.
10. Zubilin I.G., Rudyka V.I. Poluchenie sintez-gazov dlja proizvodstva jekologicheski chistyh motornyh topliv: teorija i tehnologija.- Har'kov: Izdat. centr Har'kov. nac. universiteta, 2002.– 313 s. ISBN 966-623-108-5. [in Russian]
11. Ermagambet B.T., Nurgaliev N.U., Nabiev M.A., Kasenova Zh.M., Reminnyj R.A., Buketaev A.S. Issledovanie processa paro-vozdushnoj gazifikacii uglej razlichnyh mestorozhdenij Kazahstana // Vestnik ENU im. L.N. Gumileva. 2014. - Ch. 2. - № 6(103). - S. 355-359. [in Russian]
12. Nabiev M.A., Ermagambet B.T., Nurgaliev N.U., Kasenova Zh.M, Reminnyj R.A. Poluchenie sinteticheskogo gaza iz uglja // Promyshlennost' Kazahstana. 2014. - № 6(87). - S. 68-71. [in Russian]
13. Ermagambet B.T., Nurgaliev N.U., Kasenova Zh.M., Zikirina A.M., Holod A.V. Poluchenie gorjuchego gaza iz Saryadyrskogo uglja // Vestnik ENU im. L.N. Gumileva. 2016. - Ch. 2. - №4(113). - S. 312-315. [in Russian]

Информация об авторах

Нургалиев Н.У.- кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru;

Смайлова Н.Т.- доктор технических наук, профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: ganibek2006@mail.ru

Нұртай Ж.Т.- доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: zhadira_nurtai@mail.ru;

Нургазина Г.М.- доктор PhD, и.о. асс.профессора, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: ast.gulnar@mail.ru;

Хамит А.Ж.- магистр, старший преподаватель, Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: aytolkyn.khamit-76@mail.ru.

Information about the authors

Nurgaliyev N.U.-Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru;

Smailova N.T.- Doctor of Technical Sciences, Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: ganibek2006@mail.ru

Nurtai Zhadira - PhD, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhadira_nurtai@mail.ru;

Nurgazina G.M.- PhD, Acting Associate Professor, PhD, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: ast.gulnar@mail.ru;

Khamit A.- Master's degree, senior lecturer, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: aytolkyn.khamit-76@mail.ru.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-4

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING LIQUID GLASS BASED ON OPOKA FROM THE TASKALA DEPOSIT

A.F. Urazova[1], S.S. Satayeva[1]✉, D.S. Nazarova[1], A.I. Khatsrinov[2], G.A. Otegenova[1]

[1] *Zhangir khan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan*
[2] *Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*
✉ *Corresponding author: sataeva_safura@mail.ru*

Received: 26 June 2026
Accepted: 10 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: S.S. Satayeva, et al. « INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING LIQUID GLASS BASED ON OPOKA FROM THE TASKALA DEPOSIT ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-4
License CC BY 4.0

This paper examines the feasibility of producing liquid glass using a natural siliceous raw material - flake from the Taskala deposit, located in the West Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan. Physicochemical analyses of the source material were performed, determining its chemical and mineralogical composition, silica content, and clay content. Chemical composition revealed a SiO_2 content of 70-78%, which meets the raw material requirements for liquid glass production. The process of alkaline treatment of opoka using 20% solutions of sodium and potassium hydroxide has been studied. The temperature and time parameters affecting the completeness of silica dissolution have been studied. It has been established that at a temperature of 95-98 °C and a duration of 2-3 hours, the best result is achieved in terms of the yield of liquid glass with a silicate module within the regulatory limits when the raw material: alkali ratio is 1:2. Alkaline treatment of flasks using 20% sodium and potassium hydroxide solutions was studied. Temperature and time parameters influencing the completeness of silica dissolution were examined. It was found that a temperature of 95-98°C and a duration of 2-3 hours with a raw material: alkali ratio of 1:2 yielded the best liquid glass with a silicate modulus within the specified limits. Thus, the opoka from the Taskalinsky deposit can be effectively used as a raw material for the production of liquid glass, which has been confirmed by laboratory tests and a feasibility study of the process.

Keywords: liquid glass, opoka, siliceous raw materials, Taskalinskoye deposit, silicon dioxide, silicate module, sodium hydroxide, potassium hydroxide, chemical processing.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО СТЕКЛА НА ОСНОВЕ ОПОКИ ТАСКАЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.Ф. Уразова[1], С.С. Сатаева[1]✉, Д.С. Назарова[1], А.И. Хацринов[2], Г.Э. Отегенова[1]

[1] *Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана Уральск, Қазахстан*
[2] *Казанский национальний исследовательский технологический университет, Казань, Россия*
✉ *e-mail: sataeva_safura@mail.ru*

В работе рассмотрена возможность получения жидкого стекла на основе природного кремнистого сырья - опоки Таскалинского месторождения, расположенного в Западно-Казахстанской области Республики Казахстан. Исследованы физико-химические анализы исходного материала: определены химический и минералогический состав, содержание кремнезёма и глинистых компонентов. Химический состав показал содержание SiO_2 на уровне 70-78%, что соответствует требованиям к сырью для получения жидкого стекла.

Изучен процесс щелочной обработки опоки с применением 20%-ных растворов гидроксида натрия и калия. Изучены температурно-временные параметры, влияющие на полноту растворения кремнезёма. Установлено, что при температуре 95-98 °С и продолжительности 2-3 часа в соотношении сырьё:щёлочь = 1:2 достигается наилучший результат по выходу жидкого стекла с силикатным модулем в пределах нормативных значений. Таким образом, опока Таскалинского месторождения может использоваться в качестве сырья для производства жидкого стекла, что подтверждено лабораторными испытаниями и технико-экономическим обоснованием процесса.

Ключевые слова: жидкое стекло, опока, кремнистое сырьё, Таскалинское месторождение, диоксид кремния, силикатный модуль, гидроксид натрия, гидроксид калия, химическая переработка.

ТАСҚАЛА КЕН ОРНЫ ОПОКАСЫ НЕГІЗІНДЕ СҰЙЫҚ ШЫНЫ АЛУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ

А.Ф. Уразова[1], С.С. Сатаева[1]✉, Д.С. Назарова[1], А.И. Хацринов[2], Г.Ә. Өтегенова[1]

[1] *Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан*
[2] *Қазан ұлттық зерттеу технологиялық университеті, Қазан, Ресей*
✉ *e-mail: sataeva_safura@mail.ru*

Жұмыста Қазақстан Республикасының Батыс Қазақстан облысында орналасқан Тасқала кен орнының опокасы - табиғи кремний шикізаты негізінде сұйық шыны алу мүмкіндігі қаралды. Бастапқы материалдың физика-химиялық талдаулары жүргізіліп, оның химиялық және минералогиялық құрамы, кремний диоксиді және саз құрамы анықталды. Химиялық құрамы сұйық шыны өндірісіне қойылатын шикізат талаптарына сай келетін SiO_2 мөлшерінің 70-78% екенін көрсетті. Натрий мен калий гидроксидінің 20% ерітінділерін қолдана отырып, опоканы сілтілі өңдеу процесі зерттелді. Кремний диоксидінің еруінің толықтығына әсер ететін температура-уақыт параметрлері зерттелді. 95-98 °С температурада және 2-3 сағат ішінде шикізат:сілті = 1:2 қатынасында нормативтік мәндер шегінде силикатты модулі бар сұйық әйнектің шығуы бойынша ең жақсы нәтижеге қол жеткізілетіні анықталды. Осылайша, Тасқала кен орнының опокасын сұйық шыны өндіру үшін шикізат ретінде пайдалануға болады, зертханалық сынақтармен және процестің техникалық-экономикалық негіздемесімен расталады.

Түйін сөздер: сұйық шыны, опока, кремний шикізаты, Тасқала кен орны, кремний диоксиді, силикатты модуль, натрий гидроксиді, калий гидроксиді, химиялық өңдеу.

Introduction. Liquid glass is widely used in various industries due to its unique properties, including: mechanical engineering (as a binder for making molds and cores); pulp and paper industry (for impregnating paper pulp and as an adhesive for containerboard and corrugated boxes); chemical and petrochemical industry (for the production of catalysts, white soot, zeolites, silica sol, silica gel, synthetic detergents, and oil cracking, etc.); construction materials industry (for the production of concrete structures and products, for the reinforcement of soils in the construction of roads, airfield coatings, foundations, etc.); paint and varnish industry (as a film-forming agent in the composition of silicate paints and anti-corrosion primers).

Traditionally, quartz sand is used for its production, but alternative sources of silica, such as opoka, are of interest from a resource-saving perspective. One of the main criteria for determining the suitability of this raw material is its maximum content of amorphous SiO_2 and its minimum content of impurities, which can contaminate alkaline silicate solutions and lead to the formation of insoluble residues [1-4].

The opoka of the Taskalinsky deposit is characterized by a high content of amorphous silica, which makes it a promising raw material for the production of liquid glass.

The aim of this work is to obtain liquid glass from the opoka of the Taskalinsky deposit in the West Kazakhstan region and to determine the optimal conditions for its production, as well as to analyze the compliance of the resulting product with the requirements of GOST 13078-81.

The object of the study is the siliceous rock, the opoka of the Taskalinsky deposit in the West Kazakhstan region.

Materials and methods. At the initial stage of the work, comprehensive studies were conducted to assess the physical and mechanical properties and chemical and mineralogical composition of the selected raw material. The results obtained are presented below. The

X-ray phase analysis was performed using a Clever C-31 X-ray fluorescence spectrometer, and the elemental composition was determined using a CHNS-O ECS 80 elemental analyzer using the Dumas method.

Figure 1 shows an X-ray diffraction pattern of a siliceous rock (opoka) sample obtained by X-ray phase analysis. The measurements were performed in the 2θ range from 3° to 30° using an X-ray diffractometer at a voltage of 45 kV and a current of 30 mA, using CuKα radiation (λ = 1.5406 Å).

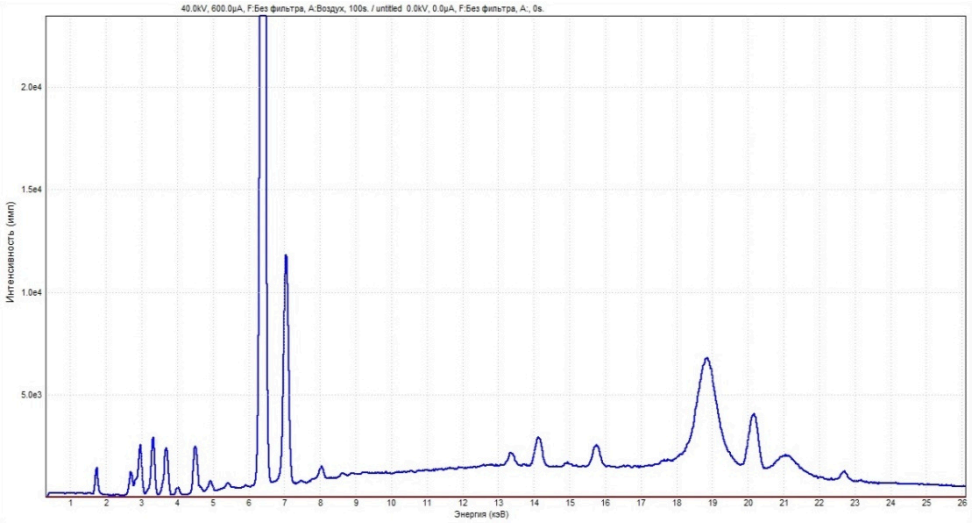


Fig. 1 – X-ray diffraction pattern

Diffraction pattern shows intense diffraction peaks in the 2θ range of 5-9°, which corresponds to the presence of amorphous and weakly crystalline silica, primarily in the form of opal. Additionally, there are less intense peaks in the 2θ range of 19-23°, which are characteristic of impurities such as quartz, clay minerals, and possibly glauconite. The broad and faint peaks indicate the presence of an amorphous phase, which is typical for siltstones rich in amorphous silica. The opoka of the Taskalinsky deposit was analyzed for its chemical composition (Table).

Table 1 - Chemical composition of the Taskalinsky opoka deposit

Oxide content, wt %								
SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O	K_2O
66,98-83,5	5,76-12,95	0,1-0,62	0,24-17,9	0,43-1,39	1,39-4,80	0,03-0,97	0,15-0,78	1,13-2,85



Fig. 2 – Photo of the Taskalinsky deposit's opoka

According to the chemical analysis data (Table 1), the sample meets the requirements for the following indicators: silicon dioxide content is not less than 80%, aluminum oxide is not more than 7%, and the iron oxide content is within the permissible concentration limits.

Mineralogical composition of the Taskalinsky deposit of the West Kazakhstan region is represented by opal 54-78%, clay minerals 15-22%, calcite up to 6%, quartz 4-7%, mica 2-4%, glauconite 2-3%, and organogenic residues up to 12%.

Textural and structural properties were studied for the rock. The texture is layered. The structure is fine-grained and pelitomorphic. The color is light yellow, and the layers are orange. The red-orange layers are composed of iron-containing compounds.

Results and discussion. The opoka was studied using synchronous thermal analysis (TG). Study was conducted using a synchronous thermal analyzer STA 6000. The shooting modes were as follows: temperature range of 30-830°C, heating rate of 10°C/min, and the medium was air. The thermal curve with the maximum peaks (TG) is shown in Figure 3. In the temperature range of 25-1500C, an endothermic effect with a mass loss of 9.19% is observed due to the release of hygroscopic water. Further, in the range of 150-350°C, a mass loss of 0.64% is observed. This effect indicates the gradual oxidation and combustion of the organic component of the sample. The total mass change in the range of 30-830°C is 11.83% mass.

Calcination temperature for the opoka was chosen to be 3500C based on the thermogram (Figure 3).

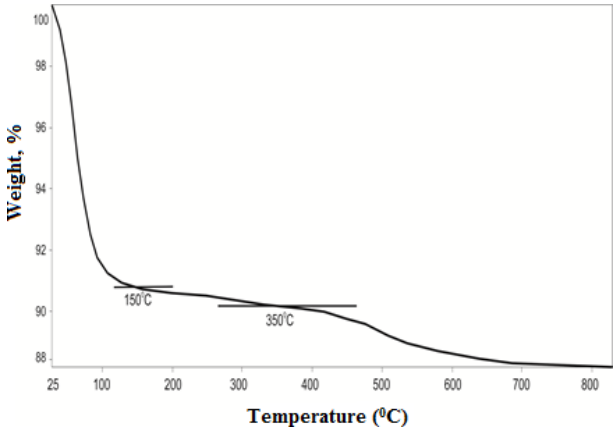


Fig. 3 – Thermogram of the opoka

Results of the mineralogical composition of the opoka indicate its siliceous nature with a predominance of opal. The presence of clay minerals, organogenic residues, and minor impurities (calcite, quartz, glauconite, and mica) indicates its sedimentary origin and confirms its suitability for producing composite materials.

As part of the study, electrostatic separation was used to enrich natural siliceous raw materials, such as the Taskalinsky deposit of opoka. The material fraction with a particle size of 0.63 mm was separated using the ELKOR-1 electrostatic drum separator manufactured by Mehanobr-Technika JSC.

Electrostatic separation is based on the different ability of minerals to become electrically charged under the influence of an external electric field. The method allows for the effective separation of mixtures based on their electrophysical properties. Conductive and weakly conductive components (such as clay minerals, organic matter, and weakly oxidized impurities) are deflected in one direction, while dielectric materials like opal and quartz exhibit a different trajectory and are collected in a separate fraction.

Obtained data indicate the predominantly siliceous composition of the studied material and confirm its suitability as a raw material for producing liquid glass.

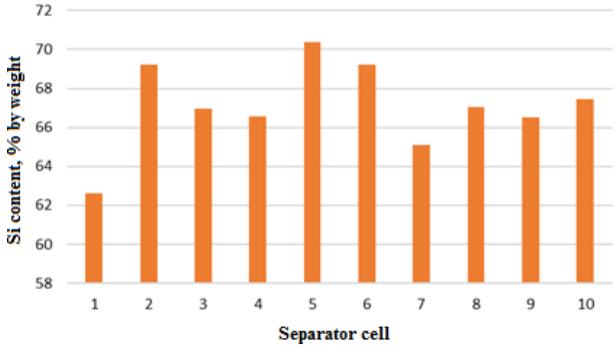


Fig. 4 – Results of electrostatic separation

Results (Figure 4) show that the silicon content in all separator cells is more than 50%, which makes it impossible to separate the impurity compounds from the silicon oxide.

Key physical and chemical characteristics of mineral raw materials that determine their quality and technological suitability are: specific surface area (at least $115 \cdot 10^3$ m²/kg), nitrogen porosity (at least $0.200 \cdot 10^{-3}$ m³/kg), and average pore diameter (in the range of 7-10.5 nm), among other parameters.

Results of the analysis of the structural characteristics of the studied opoka indicate that, according to the classification of siliceous rocks, the opoka of the Taskalinsky deposit belongs to the category of relatively mesoporous materials. This is confirmed by the effective pore diameter value of over 8 nm and the specific surface area exceeding $118 \cdot 10^3$ m²/kg. Additionally, the benzene pore volume ($0.251 \cdot 10^{-3}$ m³/kg) meets the established technical requirements for this type of raw material.

As can be seen from the results of the component, chemical composition, and adsorption-structural properties of the Taskalinsky deposit opoka, the latter meets all the requirements for glass raw materials.

To obtain liquid glass in laboratory conditions, the Taskalinsky deposit opoka was used as a silicon-containing raw material. The raw material was first crushed to a fraction of 0.1-0.7 mm and then calcined at a temperature of 350 °C for 2 hours to remove moisture and organic impurities.

Based on the conducted patent research [5-10] and the analysis of published materials [11-16], the authors developed an approach to technological research of opoka.

Experiment on the synthesis of liquid glass was carried out using the alkaline decomposition method of the Taskalinsky deposit. A 20% aqueous solution of NaOH was used as a reagent, taken in a 1:1 mass ratio to the raw material. The reaction mixture was heated at 90°C for 2-3 hours with constant stirring. After the dissolution process was completed, the product was cooled and filtered to separate the insoluble residue. The resulting silicate solution was concentrated to a density of 1.31.4 g/cm³ if necessary. The final product was characterized by its silicon dioxide content, pH, density, and silicate module (SiO_2/Na_2O).

Resulting product is a homogeneous transparent solution with a silicate module of 3.1, suitable for use in construction, foundry production, and other industries.

Chemical analysis showed that the ospock contains 75% amorphous silica, which meets the requirements for the production of liquid glass. Pre-treatment with heat increased the yield of the product. Optimal processing parameters resulted in a liquid glass with a module of 3.1, which meets the requirements of GOST 13078-81.

Conclusion. The opoka of the Taskalinsky deposit in the West Kazakhstan region is a promising natural raw material for the production of liquid glass due to its high content of amorphous silicon dioxide, porosity, adsorption capacity, and availability in the region. The conducted studies of the chemical and mineralogical composition have shown that this material meets the requirements for siliceous raw materials used in the production of silicate compositions.

The proposed processing technology includes alkaline treatment of opoka with a 20% solution of sodium hydroxide at a temperature of 95-98 °C for 2-3 hours in a ratio of raw material to alkali of 1:2. As a result, a high yield of a product with the required physical and chemical properties is achieved. The resulting liquid glass meets the requirements of GOST 13078-81 in terms of SiO_2, Na_2O content, and silicate module of 3.1.

Thus, the implementation of this technology allows for the efficient use of local natural resources for the production of liquid glass, reducing dependence on imported raw materials and increasing the economic profitability of production. Additionally, it contributes to the development of the regional mineral resource base and can be beneficial for enterprises in the construction, chemical, and glass industries.

Литература

1. Wang J. Thermodynamic equilibrium and kinetic fundamentals of oxide dissolution in aqueous solution // Journal of Materials Research. 2020.-Vol.35(8)-P. 898-921. DOI 10.1557/jmr.2020.81.
2. Tamburini A., Cipollina A., Micale G. Modelling particle dissolution in stirred vessels // Chemical Engineering Research and Design. −2023. Vol. 195. -P. 662-672. DOI 10.1016/j.cherd.2023.06.026.

3. Мешалкин В.П., Гусева Т.В., Малявин А.С. и др. Принципы химической технологии как основа развития международной концепции наилучших доступных технологий// Теоретические основы химической технологии. - 2024. - Т.58(1). - С. 8-16. DOI 10.31857/S0040357124010029.
4. Bessarabov A.M., Trokhin V.E., Kazakov A.A. Study of the rectification purification process of inorganic acids // Russian Journal of General Chemistry. 2024.-Vol.94(4). -P.872-877 DOI 10.1134/S1070363224040145.
5. Ananikov V.P. Nickel: The “Spirited Horse” of Transition Metal Catalysis // ACS Catalysis. - 2015. -Vol. 5(3) - P. 1964–1971. DOI 10.1021/acscatal.5b00072.
6. Testova N.V., Shalygin A.S., Kaichev V.V. et al. Oxidative Dehydrogenation of Propane by Molecular Chlorine // Applied Catalysis A: General. - 2015.- Vol. 505.- P. 441-446. DOI 10.1016/j.apcata.2015.05.018.
7. А.Г.Окунев, Е.В. Пархомчук, А.И. Лысиков, П.Д.Парунин, В.С.Семейкина, В. Н.Пармон. Каталитическая гидропереработка тяжелого нефтяного сырья//Успехи химии. −2015. -Т.84(9). -С 981-999. DOI 10.1070/RCR4486.
8. Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Сомин В.А. Совершенствование технологии реагентной очистки сточных вод от красителей // Ползуновский вестник. - 2025. -№ 1. - С. 220-224. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.027.
9. Саламатин А.А., Халиуллина А.С., Калинина М.В. Вязкостное пальцеобразование в условиях сверхкритической флюидной экстракции // Теоретические основы химической технологии. −2024. - Т. 58(2). - С. 247-259. DOI 10.31857/S0040357124020135.
10. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Термолизная переработка отходов гидролизного производства//Известия вузов. прикладная химия и биотехнология.-2020.-Т.10(1).-С.124-132. DOI 10.21285/2227-2925-2020-10-1-124-132.
11. Sycheva G.A. Homogeneous and Heterogeneous Crystal Nucleation in Glass of the $Li_2O–SiO_2$ System // Glass Physics and Chemistry. - 2018.- Vol. 44(3)- P. 183-191. DOI 10.1134/S1087659618030161.
12. Partschefeld S., Wiegand T., Bellmann F., Osburg A. Formation of Geopolymers Using Sodium Silicate Solution and Aluminum Orthophosphate // Materials. - 2020. -Vol. 13(18): 4202. DOI 10.3390/ma13184202.
13. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. −2014.- Vol. 56. -P. 113-127. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
14. Пягай И.Н., Сизяков В.М., Свахина Я.А., Титова М.Е., Мирошниченко В.В. Исследование процесса получения жидкого стекла из кремнегеля для использования в металлургии // Ipolytech Journal. −2023. -Т.3. - С. 598-610. DOI 10.21285/1814-3520-2023-3-598-610.
15. Shi C., Krivenko P.V., Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes // Taylor & Francis, 2006.- 392 p. ISBN 9780429180712, DOI 10.1201/9781482266900.
16. Provis J.L., Palomo A., Shi C. Advances in understanding alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. - 2015. - Vol. 78.- P. 110-125. DOI 10.1016/j.cemconres.2015.04.013.

References

1. Wang J. Thermodynamic equilibrium and kinetic fundamentals of oxide dissolution in aqueous solution // Journal of Materials Research. 2020.-Vol.35(8)-P. 898-921. DOI 10.1557/jmr.2020.81.
2. Tamburini A., Cipollina A., Micale G. Modelling particle dissolution in stirred vessels // Chemical Engineering Research and Design. −2023. Vol. 195. -P. 662-672. DOI 10.1016/j.cherd.2023.06.026.
3. Meshalkin V.P., Guseva T.V., Maljavin A.S. i dr. Principy himicheskoj tehnologii kak osnova razvitija mezhdunarodnoj koncepcii nailuchshih dostupnyh tehnologij// Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. - 2024. - T.58(1). - S. 8-16. DOI 10.31857/S0040357124010029. [in Russian]
4. Bessarabov A.M., Trokhin V.E., Kazakov A.A. Study of the rectification purification process of inorganic acids // Russian Journal of General Chemistry. 2024.-Vol.94(4). -P.872-877 DOI 10.1134/S1070363224040145.
5. Ananikov V.P. Nickel: The “Spirited Horse” of Transition Metal Catalysis // ACS Catalysis. - 2015. -Vol. 5(3) - P. 1964–1971. DOI 10.1021/acscatal.5b00072.
6. Testova N.V., Shalygin A.S., Kaichev V.V. et al. Oxidative Dehydrogenation of Propane by Molecular Chlorine // Applied Catalysis A: General. - 2015.- Vol. 505.- P. 441-446. DOI 10.1016/j.apcata.2015.05.018.

7. A.G. Okunev, E.V. Parhomchuk, A.I. Lysikov, P.D. Parunin, V.S. Semejkina, V. N. Parmon. Kataliticheskaja gidropererabotka tjazhelogo neftjanogo syr'ja//Uspehi himii. −2015.-T.84(9). -S 981-999. DOI 10.1070/RCR4486. [in Russian]
8. Stepanova S.V., Shajhiev I.G., Somin V.A. Sovershenstvovanie tehnologii reagentnoj ochistki stochnyh vod ot krasitelej // Polzunovskij vestnik. - 2025. -№ 1. - S. 220-224. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.027. [in Russian]
9. Salamatin A.A., Haliullina A.S., Kalinina M.V. Vjazkostnoe pal'ceobrazovanie v uslovijah sverhkriticheskoj fljuidnoj jekstrakcii \// Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. −2024. - T. 58(2). - S. 247-259. DOI 10.31857/S0040357124020135. [in Russian]
10. Gunich S.V., Janchukovskaja E.V. Termoliznaja pererabotka othodov gidroliznogo proizvodstva// Izvestija vuzov. prikladnaja himija i biotehnologija. −2020.-T.10(1). -S.124-132. DOI 10.21285/2227-2925-2020-10-1-124-132. [in Russian]
11. Sycheva G.A. Homogeneous and Heterogeneous Crystal Nucleation in Glass of the $Li_2O–SiO_2$ System // Glass Physics and Chemistry. - 2018.- Vol. 44(3)- P. 183-191. DOI 10.1134/S1087659618030161.
12. Partschefeld S., Wiegand T., Bellmann F., Osburg A. Formation of Geopolymers Using Sodium Silicate Solution and Aluminum Orthophosphate // Materials. - 2020. -Vol. 13(18): 4202. DOI 10.3390/ma13184202.
13. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. −2014.- Vol. 56. -P. 113-127. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
14. Pjagaj I.N., Sizjakov V.M., Svahina Ja.A., Titova M.E., Miroshnichenko V.V. Issledovanie processa poluchenija zhidkogo stekla iz kremnegelja dlja ispol'zovanija v metallurgii // Ipolytech Journal. 2023. -T.3. - S. 598-610. DOI 10.21285/1814-3520-2023-3-598-610. [in Russian]
15. Shi C., Krivenko P.V., Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes // Taylor & Francis, 2006.- 392 p. ISBN 9780429180712, DOI 10.1201/9781482266900.
16. Provis J.L., Palomo A., Shi C. Advances in understanding alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. - 2015. - Vol. 78.- P. 110-125. DOI 10.1016/j.cemconres.2015.04.013.

Information about the authors

Urazova A.F. - Master of Technical Sciences, senior lecturer of Zhangir khan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: urazova_17@list.ru;

Satayeva S.S. - Candidate of Chemical Sciences, ass. professor, Zhangir khan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk,Kazakhstan, e-mail: sataeva_safura@mail.ru;

Nazarova D.S. - Master of Technical Sciences, senior lecturer of Zhangir khan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: nazarova.ria@mail.ru;

Khatsrinov A.I. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, e-mail: tahmina.66@mail.ru;

Otegenova G.A. - Master's student, Zhangirkhan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: otegenovag933@gmail.com.

Информация об авторах

Уразова А.Ф. - магистр технических наук, старший преподаватель, Западно-Казахстанский аграрно-технический университеа им. Жангир-хана, Уральск, Казахстан, e-mail: urazova_17@list.ru;

Сатаева С.С. - кандидат химических наук, доцент, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир-хана, Уральск, Казахстан, e-mail: sataeva_safura@mail.ru;

Назарова Д.С. - магистр технических наук, старший преподаватель, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангира-хана, Уральск, Казахстан, e-mail: nazarova.ria@mail.ru;

Хацринов А.И. - доктор технических наук, профессор, Казанский национальний исследовательский технологический университет, Казан, Россия, e-mail: tahmina.66@mail.ru;

Отегенова Г.А. - магистрантка, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир-хана, Уральск, Казахстан, e-mail: otegenovag933@gmail.com.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-2

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ POLYGONUM ТУЫСЫ ТҮРЛЕРІНІҢ ЭКСТРАКТТАРЫНЫҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ: АНТИМИКРОБТЫҚ, ЦИТОТОКСИКАЛЫҚ ЖӘНЕ АНТИРАДИКАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Г.К. Мамытбекова, **Ж.Е. Нұрлыханова**, **А.Қ. Кенжеболат**, **Е.М. Сүлеймен**✉

Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан
✉ *Корреспондент-автор: syerlan75@yandex.kz*

Received: 29 June 2026
Accepted: 10 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: Ye.M. Suleimen, et al. « ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ POLYGONUM ТУЫСЫ ТҮРЛЕРІНІҢ ЭКСТРАКТТАРЫНЫҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ: АНТИМИКРОБТЫҚ, ЦИТОТОКСИКАЛЫҚ ЖӘНЕ АНТИРАДИКАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-2
License CC BY 4.0

Бұл жұмыста Қазақстанда кеңінен таралған *Polygonum aviculare*, *Polygonum argyrocoleon*, *Polygonum acerosum* және *Polygonum arenastrum* түрлерінің антимикробтық және цитотоксикалық белсенділіктері зерттелді. Аталған төрт түрдің Қазақстан территориясындағы биологиялық белсенділігі бойынша алғаш рет деректер алынды. Атап айтқанда, *P. argyrocoleon* мен *P. acerosum* осы биологиялық қасиеттер бойынша жалпы алғаш рет зерттелді. $CHCl_3$: EtOH (1:1) жүйесімен алынған экстракттардың антимикробтық белсенділігі *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* және *Candida albicans* штаммдарына қарсы агар диффузиясы әдісімен бағаланды. Цитотоксикалылық *Artemia salina* науплі биотестімен зерттелді. *P. arenastrum* экстракты 20 мг/мл концентрацияда 40%, ал 30 мг/мл-де 60% өлім-жітім туғызып, ең жоғары цитотоксикалылық көрсетті.

P. acerosum Candida albicans-ке қарсы ерекше күшті антифунгалдық белсенділік танытты (27–28 мм тежеу аймағы). Экстракттар сонымен қатар жоғары DPPH радикалды жою белсенділігін көрсетті, тежеу мәндері әдетте 77%-дан асады. Алынған нәтижелер бұл түрлердің әрі қарай фармакологиялық және фитохимиялық зерттеулер жүргізу әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: *Polygonum aviculare*, *Polygonum argyrocoleon*, *Polygonum acerosum*, *Polygonum arenastrum*, антимикробтық белсенділік, цитотоксикалық белсенділік, агар диффузиясы, *Artemia salina*, бриньялық асшаян өлтіргіштік сынамасы (BSLA), антирадикалдық белсенділік, DPPH.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЭКСТРАКТОВ ВИДОВ РОДА POLYGONUM ИЗ КАЗАХСТАНА: АНТИМИКРОБНЫЕ, ЦИТОТОКСИЧЕСКИЕ И АНТИРАДИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Г.К. Мамытбекова, **Ж.Е. Нұрлыханова**, **А.Қ. Кенжеболат**, **Е.М. Сүлеймен**
✉

Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан
✉ *e-mail: syerlan75@yandex.kz*

В данной работе исследованы антимикробная и цитотоксическая активность четырёх широко распространённых в Казахстане видов рода *Polygonum*: *P. aviculare, P. argyrocoleon, P. acerosum* и *P. arenastrum*. Впервые получены данные о биологической активности указанных видов, произрастающих на территории Казахстана. В частности, *P. argyrocoleon* и *P. acerosum* изучены по данным биологическим свойствам впервые в мире. Антимикробная активность экстрактов, полученных системой растворителей $CHCl_3$: EtOH (1:1), оценивалась методом диффузии в агар против штаммов *Escherichia* coli, *Staphylococcus aureus* и *Candida albicans*. Цитотоксичность

изучалась с помощью биотеста на науплиях *Artemia salina*. Экстракт *P. arenastrum* проявил наибольшую цитотоксичность: при концентрации 20 мг/мл гибель составила 40%, а при 30 мг/мл - 60%. *P. acerosum* продемонстрировал выраженную антифунгальную активность против *Candida albicans* (зона ингибирования 27–28 мм). Экстракты также продемонстрировали высокую активность по нейтрализации свободных радикалов DPPH, при этом значения ингибирования, как правило, превышали 77%. Полученные результаты указывают на потенциал этих видов для дальнейших фармакологических и фитохимических исследований.

Ключевые слова: *Polygonum aviculare, Polygonum argyrocoleon, Polygonum acerosum, Polygonum arenastrum*, антимикробная активность, цитотоксическая активность, диффузия в агаре, *Artemia salina*, биотест на токсичность (BSLA), антирадикальная активность, DPPH.

BIOLOGICAL ACTIVITY OF EXTRACTS OF POLYGONUM SPECIES FROM KAZAKHSTAN: ANTIMICROBIAL, CYTOTOXIC AND ANTIRADICAL PROPERTIES

G.K. Mamytbekova, **Zh.E. Nurlykhanova**, **A.K. Kenzhebolat**, **Ye.M. Suleimen**✉

K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan
✉ *e-mail: syerlan75@yandex.kz*

This study investigated the antimicrobial and cytotoxic activities of four species of the genus *Polygonum* widely distributed in Kazakhstan: *P. aviculare, P. argyrocoleon, P. acerosum,* and *P. arenastrum*. For the first time, data on the biological activity of these species growing in Kazakhstan were obtained. Notably, *P. argyrocoleon* and *P. acerosum* were investigated for these biological properties for the first time worldwide. The antimicrobial activity of extracts obtained with $CHCl_3$: EtOH (1:1) solvent system was evaluated using the agar diffusion method against *Escherichia coli, Staphylococcus aureus,* and *Candida albicans* strains. Cytotoxicity was assessed using the *Artemia salina* nauplii bioassay (BSLA). The *P. arenastrum* extract showed the highest cytotoxicity, with 40% mortality at 20 mg/mL and 60% at 30 mg/mL. *P. acerosum* demonstrated exceptional antifungal activity against *Candida albicans* (inhibition zone 27–28 mm). The extracts also demonstrated high DPPH radical-scavenging activity, with inhibition values generally exceeding 77%. The results indicate the potential of these species for further pharmacological and phytochemical investigation.

Keywords: *Polygonum aviculare, Polygonum argyrocoleon, Polygonum acerosum, Polygonum arenastrum*, antimicrobial activity, cytotoxic activity, agar diffusion, *Artemia salina*, brine shrimp lethality assay (BSLA), antiradical activity, DPPH.

Кіріспе. Өсімдік текті шикізат негізінде жасалған дәрілер мен препараттар заманауи медицинада маңызды орынды иеленеді. Флавоноидтар, фенолдық қышқылдар, таниндер, антрахинондар, стильбендер сияқты табиғи биологиялық белсенді қосылыстар (БАЗ) осы саладағы зерттеулердің басты нысаны болып келеді. ДДҰ статистикасына жүгінсек, планетамыздың халқының 85%-ға жуығы өз денсаулығын сақтауда фитопрепараттарды пайдаланады. Осы жағдай белсенділігі жеткілікті зерттелмеген жаңа өсімдік түрлерін табуды заманауи фармакология мен дәрілік химияның өзекті міндеттерінің бірі ете түседі [1].

Тұқымдасы *Polygonaceae*-ге жататын *Polygonum* L. туысы барлық континенттерде, Арктика тундрасынан бастап тұзды шөлдерге дейін өсетін 300-ден астам бір- және көпжылдық шөптесін өсімдіктер мен жартылай бұталарды қамтиды. Бұл туыстың өкілдері флавоноидтар (рутин, кверцетин, кемпферол, авикулярин), стильбендер (ресвератрол, полидатин), таниндер мен фенолдық қышқылдарға өте бай болуымен фармакогнозия ғылымында ерекше назар аударады [1, 2]. Аталған заттар топтамасы антиоксиданттық, антимикробтық, қабынуға қарсы, онкопротекторлық белсенділіктерді қамтамасыз ете отырып, туыс өкілдерін дәрілік өсімдіктер ретінде зерттеуге жеткілікті негіз береді [3]. Қазақстан флорасы *Polygonum* туысының 22-ден астам түрін қамтиды [4]. Солардың арасында *P. argyrocoleon*, *P. acerosum* және *P. arenastrum* түрлері биологиялық белсенділік тұрғысынан жеткілікті зерттелмеген. Осы олқылықты толтыру мақсатында ұсынылып отырған жұмыста аталған үш түрдің, сондайақ салыстырмалы нысан ретінде кеңінен танымал *P. aviculare*-дің $CHCl_3$:EtOH экстракттарының антимикробтық және цитотоксикалық белсенділіктері алғаш рет кешенді түрде бағаланды.

Әдебиетке шолу. *Polygonum* туысы биологиялық белсенді қосылыстардың шоғырланған мысалы ретінде бірнеше ондаған жыл бойы фармакогнозия мен фитохимия ғылымдарының назарында. Туыс өкілдерінен флавоноидтар, стильбендер (ресвера-

трол мен полидатин), антрахинондар, фенол қышқылдары, таниндер, сапониндер мен алкалоидтар бөлінген [1, 2, 5]. Осы қосылыстардың жиынтығы антиоксиданттық, антимикробтық, қабынуға қарсы, цитотоксикалық және нейропротекторлық белсенділіктер кешенін қамтамасыз етеді.

Polygonum aviculare - рутин мен кверцетиннің фармакопеялық нысаны; ЖЭСХ деректері бойынша рутин мазмұны 0,70%, кверцетиндікі - 0,04% жетеді [6]. Осы түрдің гидроэтанолдық экстракты RAW 264.7 макрофагтарында гемоксигеназа-1 (HO-1) индукциясы мен индуцибельді NO-синтаза (iNOS) тежелуі арқылы қабынуды басатыны дәлелденген [7]. *P. cuspidatum* тамырсабағы ресвератрол мен полидатиннің өнеркәсіптік дәстүрлі дереккөзі; антиоксиданттық, қабынуға қарсы (NF-κB тежелуі), антиканцерогендік механизмдері молекулалық деңгейде нақтыланған [5, 8].

Polygonum argyrocoleon Steud. ex Kunze - биіктігі 15-80 см-ге жететін, күміс реңді охреясымен ерекшеленетін біржылдық шөптесін өсімдік. Нативті ареалы Сібір, Батыс Қытай, Орталық Азия және Таяу Шығысты қамтиды. Тұздалған топырақтарда, жол шеттерінде, тыңайған жерлерде өседі; Қазақстанда дала мен шөлейт белдеулерде кеңінен таралған [4]. Аридтік жағдайлар өсімдікте флавоноидтардың жинақталуына ықпал ететіні белгілі [2].

Сүлеймен Е.М. және авт. [9] жүргізген ЖЭСХ-профилдеу нәтижелері бойынша *P. argyrocoleon*-да рутиннің мазмұны 0,97%, кверцетиніндікі - 0,03% деңгейінде тіркелген. Бағаналы хроматография мен MPLC арқылы β-ситостерин алғаш рет осы түрден бөлінген; оның простатаға қарсы, қабынуға қарсы және иммунмодуляциялық қасиеттері дәлелденген. *P. acerosum* ЖЭСХ деректері бойынша кверцетиннің мазмұны 0,93% жетеді.

Антимикробтық белсенділік бойынша Türkiye жерінде жиналған *P. arenastrum* экстракттары ерекше антифунгалдық белсенділікпен (15–250 мкг/мл) сипатталған [10]. Хлороформдық экстракттардың *P. aviculare* үшін *E. coli*, *Salmonella typhi*, *Pseudomonas aeruginosa*, *S. aureus*, *Aspergillus flavus* мен *A. niger*-ге қарсы антимикробтық белсенділік танытатыны дәлелденген [11]. Туыс өкілдерінің антимикробтық тиімділігі флавоноидтар, таниндер мен сесквитерпендердің мазмұнымен тікелей байланысты.

Цитотоксикалылықты бағалауда *Artemia salina* наупли биотесті (BSLA) кеңінен қолданылатын скрининг тесті болып табылады. Полярлы этанол/метанол экстракттары полярлы емес экстракттармен салыстырғанда жалпы төменірек цитотоксикалылық таныту тән [12].

Оттегінің белсенді түрлерінің шамадан тыс жинақталуы антиоксиданттық қорғаныс жүйелерінің қалыпты жұмысының бұзылуын тудырады, бұл тотығу зақымдануының жоғарылауына және биомолекулалардың химиялық модификациясына ықпал етеді және дене жасушалары мен тіндерінің дисфункциясының дамуына әкеледі. Тірі организмдегі бос радикалдардың тотығу процестерінің белсенділігінің артуы липидті мембраналардың құрылымы мен қасиеттерінің бұзылуына әкелетіні белгілі. Сондықтан биологиялық белсенділігі жоғары өсімдік тектес дәрілік формалардың антирадикалдық белсенділігін анықтау маңызды. Өйткені мұндай препараттардың жақсы антирадикалдық қасиеттері болса, олар аурудың патогенезіне әсер етеді де жақсы емдік әсер береді.

Материалдар мен әдістер. *Polygonum aviculare*, *P. argyrocoleon*, *P. acerosum* және *P. arenastrum* өсімдіктерінің жерүсті бөліктері 2025 жылы күзде Ақмола облысының Бурабай ауданынан жиналды. Шикізат GACP қағидаларына сәйкес дайындалды: ауа-көлеңкелі кептіру (14 тәулік), стандартталған ұсақтау.

Кептірілген шикізат $CHCl_3$:EtOH (1:1) еріткіш жүйесімен 40 °C-та үш рет экстракцияланды. Еріткіш ротациялық буландырғышта (rotary evaporator BIOBASE RE-201D (BIOBASE, China)) 40 °C-та, төмендетілген қысымда буландырылды. Жалпы 290 г (6,44%) қоңыр-қара түсті шикі экстракт алынды.

Агар диффузиясы (лунка) әдісімен *E. coli* ATCC 25922 (грамтеріс), *S. aureus* ATCC 6538 (грамоң) және *C. albicans* ATCC 10231 (саңырауқұлақ) тест-штаммдарына қарсы 20 және 30 мг/мл концентрацияларда бағаланды. Микроорганизмдер Республикалық микроорганизмдер коллекциясынан (РМК) алынды. Бактериялар ет-пептонды агарда 37 °C-та 24 сағат, ашытқы Czapek-Dox агарда 30 °C-та 48 сағат инкубацияланды. Гентамицин (бактерияларға, 10 мкг/диск) және нитрофурантоин (ашытқыға, 100 мкг/диск) бақылау ретінде пайдаланылды. Тежеу аймақтарын интерпретациялау: < 15 мм - әлсіз белсенділік; 15–20 мм - орташа; ≥ 20 мм - айқын белсенділік.

Artemia salina жұмыртқаларын 2 тәулік бойы жасанды теңіз суында аэрациямен өсіріп, наупли алынды. 24 ұяшықты планшеттің әрбір ұяшығына 10 наупли + 990 мкл теңіз суы орналастырылды.

Экстракттар 10 мкл мөлшерде 20 және 30 мг/мл концентрацияларда қосылды. 25 °С-та 24 сағат инкубациядан кейін өлген наупли саны 10 еселік үлкейту астында есептелді. Өлім-жітім пайызы формула бойынша есептелді: P = (A – N – B) / Z × 100%, мұнда A - 24 сағаттан кейінгі өлген наупли саны; N - сынамаға дейін өлген наупли саны; B - теріс бақылауда өлген наупли санының орташа мәні; Z - жалпы наупли саны.

Polygonum aviculare, P. argyrocoleon, P. acerosum және *P. arenastrum* өсімдіктерінің жерүсті бөліктерінің хлороформ-этанолды экстрактының антирадикалды белсенділігі (АРБ) 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 және 1,0 мг/мл концентрацияларда зерттелді. Зерттелетін ерітінділерге 0,75 және 1,0 мг/мл концентрацияларда 2,2-дифенил-1-пикрилгидразильді радикал (DPPH) қосу ингибирлеу әдісімен жүзеге асырылды. Осыдан кейін ерітінділердің оптикалық тығыздығы өлшеніп, DPPH радикалының тежелу пайызы анықталды. Зерттелген объектілердің белсенділігі препараттар соңғы рет енгізілгеннен кейін бір тәулік өткен соң формула (1) бойынша есептелді.

$$\text{АРА } (\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \cdot 100 \qquad (1)$$

A_o - бақылау үлгісінің оптикалық тығыздығы;

A_t - жұмыс үлгісінің оптикалық тығыздығы.

Нәтижелер M ± SEM түрінде берілді. Деректер бір жақты ANOVA тестімен, одан кейін Tukey постхок тестімен талданды. Айырмашылықтар $p < 0,05$ деңгейінде статистикалық мәнді деп қабылданды. Тежеу аймақтарының диаметрлері ImageJ бағдарламалық қамтамасызбен өлшенді.

Барлық тәжірибелер үш данада жүргізілді, ал нәтижелер орташа ± SEM (n = 3) ретінде көрсетілген.

Нәтижелер және талқылау. *Polygonum* туысы түрлерінің биологиялық белсенділіктері туралы жарияланған деректер 1-кестеде жинақталған.

1 - кесте. Polygonum туысының кейбір түрлерінің биологиялық белсенділігі (жарияланған деректер бойынша)

Түр	Антимикробтық	Антирадикалдық белсенділік (DPPH)	Қабынуға қарсы	Цитотоксикалық	Дерек-көз
P. aviculare	+	+	++	±	[1, 6]
P. argyrocoleon	++	+	+	+	[2, 3]
P. acerosum	++	±	±	+	[2, 3]
P. arenastrum	++	+	+	++	[2, 3]
P. cuspidatum	+	++	++	+	[1]
P. hydropiper	++	+	+	±	[1]

Ескерту: «++» - айқын; «+» - орташа; «±» - әлсіз; «–» - деректер жоқ. Белгілеулер тиісті дереккөздерден алынған деректерді түсіндіруге негізделген және тікелей сандық салыстыруға арналмаған.

Антимикробтық белсенділік нәтижелері. Агар диффузиясы тестінің нәтижелері 2-кестеде берілген. Барлық төрт түрдің экстракттары кемінде бір зерттелген тест-микроорганизмге қатысты антимикробтық белсенділік танытты.

2 - кесте. Polygonum түрлерінің антимикробтық белсенділігі, тежеу аймақтарының диаметрі (мм)

Түр	Концентрация, мг/мл	*E. coli*, мм	*S. aureus*, мм	*C. albicans*, мм
P. aviculare	20	13±0,18	15±0,18	14±0,18
P. aviculare	30	13±0,55	16	21±0,37
P. argyrocoleon	20	16±0,32	17±0,48	14±0,48
P. argyrocoleon	30	17±0,48	23±0,66	14±0,37
P. arenastrum	20	19±0,48	19±0,37	12±0,66
P. arenastrum	30	22±0,37	23±0,84	15
P. acerosum	20	0	18±0,48	27±1,28

Түр	Концентрация, мг/мл	*E. coli*, мм	*S. aureus*, мм	*C. albicans*, мм
P. acerosum	30	0	23±0,48	28±0,48

P. arenastrum 20 мг/мл концентрацияда *E. coli*-ге 19±0,48 мм, *S. aureus*-қа 19±0,37 мм тежеу аймағын туғызып, кең спектрлі антимикробтық белсенділік танытты. 30 мг/мл концентрацияда бұл мәндер 22±0,37 мм мен 23±0,84 мм-ге дейін өсті (айқын белсенділік). Нәтижелер Türkiye-де жиналған *P. arenastrum* бойынша жарияланған деректермен сәйкес келмейді [11], онда антифунгалдық белсенділік антибактериялықтан едәуір жоғары болатыны көрсетілген. Мұндай айырмашылықтар биологиялық белсенді қосылыстардың концентрациясы мен профиліне байланысты болуы ықтимал.

P. acerosum экстракты *E. coli*-ге қарсы белсенділік танытпаса да (0 мм), *S. aureus*-қа 18–23 мм, *C. albicans*-қа қарсы ерекше күшті антифунгалдық белсенділік - 27±1,28 мм (20 мг/мл) және 28±0,48 мм (30 мг/мл) - танытты. Бұл зерттелген барлық түрлер ішіндегі ең жоғары антифунгалдық нәтиже болып табылады.

P. argyrocoleon 30 мг/мл концентрацияда *S. aureus*-қа 23±0,66 мм тежеу аймағын туғызды; 20 мг/мл-де де *E. coli*-ге 16±0,32 мм орташа белсенділік байқалды. *P. aviculare* ең төмен антибактериялық белсенділік танытты (*E. coli*-ге 13 мм), алайда 30 мг/мл-де *C. albicans*-қа қарсы 21±0,37 мм айқын антифунгалдық белсенділікке жетті; бұл жарияланған деректермен [12] үйлеседі.

Цитотоксикалық белсенділік нәтижелері. BSLA нәтижелері 3-кестеде берілген.

3 - кесте. Polygonum түрлерінің Artemia salina науплиге тигізетін цитотоксикалық белсенділігі

Түр	Концентрация, мг/мл	Өлім-жітім, %
P. aviculare	20 / 30	10 / 10
P. argyrocoleon	20 / 30	0 / 40
P. arenastrum	20 / 30	40 / 60
P. acerosum	20 / 30	30 / 30

P. arenastrum ең жоғары цитотоксикалылық деңгейін көрсетті: 20 мг/мл концентрацияда наупли өлімі 40%-ды, ал 30 мг/мл-де 60%-ды құрады. LC_{50} мәні 20 мг/мл-ден төмен деп бағаланады, бұл зерттелген *Polygonum* түрлері ішінде орташадан жоғары цитотоксикалылықты білдіреді. Бұл нәтиже флавоноидтар мен таниндердің бірлескен цитотоксикалық әсерімен түсіндірілуі мүмкін.

P. argyrocoleon экстракты 20 мг/мл-де ешқандай цитотоксикалылық танытпады (наупли тіршілік ету 100%), алайда 30 мг/мл-де наупли өлімі 40%-ға секірді. Бұл деректер 30 мг/мл тек шекті концентрацияда айқын цитотоксикалылықтың пайда болатынын көрсетеді. *P. acerosum* 20 және 30 мг/мл-де бірдей - 30% өлім-жітім деңгейін берді, бұл дозатәуелсіз платодық жауапқа (LC_{50} > 30 мг/мл) сәйкес келеді. *P. aviculare* екі концентрацияда да 10% өлім-жітімді туғызды - жалпы қауіпсіз профиль, бұл жарияланған мәліметтермен [2] үйлеседі.

4 - кесте. Хлороформ-этанол экстрактының әртүрлі концентрациясындағы Polygonum aviculare;, P. argyrocoleon;, P. acerosum және P. arenastrum радикалға қарсы белсенділігі (%)

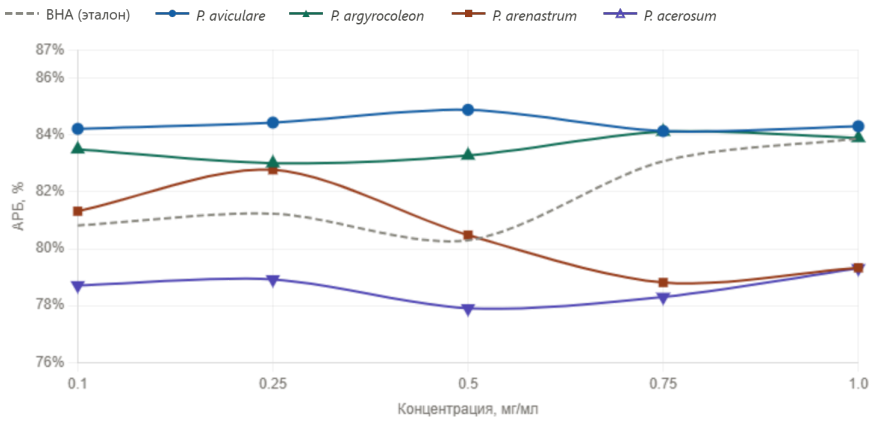
№;	Зерттелетін субстанциясы	Экстрактың концентрациясы (мг/мл)				
		0,1	0,25	0,5	0,75	1,0
1	Бутилгидроксианизол (BHA)	80,82	81,23	80,30	83,08	83,88
2	*P. aviculare*	84,22	84,44	84,89	84,14	84,31
3	*P. argyrocoleon*	83,50	83,01	83,28	84,12	83,90
4	*P. arenastrum*	81,32	82,78	80,48	78,81	79,33
5	*P. acerosum*	78,71	78,92	77,9	78,30	79,31

Полярлы экстракттардың жалпы төмен-орташа цитотоксикалылығы кеңірек BSLA зерттеулерімен

сәйкес: полярлы этанолдық/метанолдық экстрактардың LC_{50} мәндері ондаған мг/мл-ден жүздеген мкг/мл-ге дейін ауытқиды [12]. Туыс өкілдерінің антрахинон мен стильбен мазмұны цитотоксикалылықтың деңгейін айқындайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады.

Polygonum aviculare, P. argyrocoleon, P. acerosum және *P. arenastrum* экстракттарының антирадикалдық белсенділік (DPPH) белсенділігін анықтау кезінде біз бутилгидроксианизол (ВНА) белсенділігімен салыстырдық. Зерттелетін ерітінділердің концентрацияға тәуелді оптикалық тығыздығы спектрофотометрде 520 нм толқын ұзындығында өлшенді (4-кесте).

Радикалға қарсы белсенділікті зерттеу нәтижелері зерттелген *Polygonum* түрлері экстрактілерінің жоғары антирадикалдық белсенділікке ие екенін көрсетті. *P. aviculare* және *P. argyrocoleon* экстрактілері көптеген зерттелген концентрацияларда ВНА стандартымен салыстырғанда жоғары мәндер көрсетті, ал *P. arenastrum* және *P. acerosum* экстрактілерінің белсенділігі кейбір концентрацияларда ВНА-дан төмен болды.



1 - сурет. Polygonum aviculare;, P. argyrocoleon;, P. acerosum және P. arenastrum хлороформ-этанол экстрактының антирадикалдық белсенділігінің концентрацияға тәуелділігі (%, DPPH әдісі)

Алдын ала эксперименттерде зерттеу концентрациялары таңдалды (0,1; 0,25; 0,5; 0,75 және 1 мг/мл). Осы концентрацияларда *Polygonum aviculare, P. argyrocoleon, P. acerosum* және *P. arenastrum* зерттелген үлгілердің DPPH тежелу көрсеткіштері шамамен

78–85% аралығында болды, бірақ ең жоғары тежелу 500-1000 мкг/мл концентрациясында байқалды. Осылайша, бутилгидроксианизол препараты стандартымен экстрактілерін салыстырғанда тежеу пайызы 81%-дан астам болды, яғни экстрактілердің жоғары DPPH радикалын тежеу қабілетін көрсетті.

Қорытынды. Зерттеу нәтижелері *Polygonum* туысының Қазақстандағы төрт түрі бойынша мынадай тұжырымдарды негіздейді:

1. *P. arenastrum* көрсетті ең жоғары цитотоксикалық белсенділікті: 20 мг/мл концентрацияда өлімжітім 40%, ал 30 мг/мл-де 60% болды, бұл LC_{50} мәнінің 20–30 мг/мл аралығында екенін көрсетеді.

2. *P. acerosum Candida albicans*-ке қатысты айқын антифунгалдық белсенділік танытты (28 мм тежеу аймағы), ал антибактериялық белсенділігі шектелген болды. Бұл оны антифунгалдық фитопрепараттар жасаудың перспективті нысаны ретінде сипаттайды.

3. *P. argyrocoleon* орташа антибактериялық белсенділікпен қатар, 30 мг/мл концентрацияда байқалатын цитотоксикалылықпен ерекшеленді; алайда төмен концентрациялардағы қауіпсіз профилі оны одан әрі фракциялау арқылы белсенді қосылыстарды анықтауды орынды ете алады.

4. *P. aviculare* ең төмен жалпы белсенділік танытты, алайда *C. albicans*-қа қарсы антифунгалдық белсенділік жоғары концентрацияда байқалды; бұл дәстүрлі медицинадағы қауіпсіз қолданымымен сәйкес.

5. Біздің білуімізше, бұл *P. argyrocoleon* және *P. acerosum* түрлерінің антимикробтық және цитотоксикалық белсенділігін зерттеуге арналған алғашқы жұмыс. Осы түрлердің фитохимиялық профилдерін ЖЭСХ-МС, биоактивті бағытталған фракциялау және *in vivo* зерттеулермен тереңдете зерттеу ұсынылады.

6. Радикалға қарсы белсенділікті зерттеу нәтижелері зерттелген *Polygonum* түрлері экстрактілерінің жоғары антирадикалдық белсенділікке ие екенін

көрсетті. *P. aviculare* және *P. argyrocoleon* экстрактілері көптеген зерттелген концентрацияларда ВНА стандартымен салыстырғанда жоғары мәндер көрсетті, ал *P. arenastrum* және *P. acerosum* экстрактілерінің белсенділігі кейбір концентрацияларда ВНА-дан төмен болды.

Қаржыландыру. Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің (Грант № BR 24992761) қолдауымен жүргізілді.

Әдебиеттер

1. Narasimhulu G., Reddy K.K., Mohamed J. The genus *Polygonum* (*Polygonaceae*): an Ethnopharmacological and phytochemical perspectives-review // International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. - 2014. - Vol. 6(2). - P. 21-45.
2. Idoudi S., Tourrette A., Bouajila J., Romdhane M., Elfalleh W. The genus *Polygonum*: An updated comprehensive review of its ethnomedicinal, phytochemical, pharmacological activities, toxicology, and phytopharmaceutical formulation // Heliyon. - 2024. - Vol. 10 (8). e28947. DOI 10.1016/j.heliyon. 2024.e28947.
3. Shen B.-B., Yang Y.-P., Yasamin S., Liang N., Su W., Chen S.-H., Wang X.-J., Wang W. Analysis of the Phytochemistry and Bioactivity of the Genus *Polygonum* // Digital Chinese Medicine. – 2018.- Vol.1(1). - P. 19–36. DOI 10.1016/S2589-3777(19)30005-9.
4. Байтенов М.С. Флора Казахстана. Т. 2. - Алматы: Ғылым, 2001. - 280 б. ISBN 9965-07-036-9.
5. Meng T., Xiao D., Muhammed A. Anti-Inflammatory Action and Mechanisms of Resveratrol // Molecules. - 2021.- Vol. 26(1). – P«. D»OI 10.3390/molecules26010229.
6. Chen J., Shi Y. Determination of quercetin and kaempferol in *Polygonum aviculare* by HPLC // Zhongguo Zhong Yao Za Zhi. - 2009. - Vol. 34. - P. 423-427.
7. Jang C.H., Chung Y.Ch., Lee A., Hwang Y.-H. Hydroethanolic Extract of *Polygonum aviculare* L. Mediates Anti- Inflammatory Activity in RAW 264.7 Murine Macrophages Through Induction of Heme Oxygenase-1 and Inhibition of Inducible Nitric Oxide Synthase // Plants. - 2024. - Vol. 13(23). – P. 3314. DOI 10.3390/ plants13233314.
8. Chen B.-Y., Kuo Ch.-H., Liu Yu. -Ch., Ye L.-Y., Chen J.-H., Shieh Ch.-J. Ultrasonic-Assisted Extraction of the Botanical Dietary Supplement Resveratrol from *Polygonum cuspidatum* // Journal of Natural Products. – 2012. - 75(10): 1810-1813. DOI 10.1021/np300392n.
9. Сүлеймен Е.М., Кожанова К.К., Кадырбаева Г.М., Каюпова Ф.Е., Нұрымов Ж.Ж., Махатова Б.Г., Джалгасбаева А.Б., Қыдырбай Б.Т., Датхаев У.М., Устенова Г.О. *Polygonum* және *Achillea* туыстарының өсімдік шикізаттарының фармацевтикалық-технологиялық параметрлері мен сандық көрсеткіштерін зерттеу // Вестник КазНМУ. - 2026. - № 1 (76). – 62-79 б. DOI 10.53065/kaznmu.2026.76.1.005.
10. Ceylan S., Camadan Y., Saral O., Ozsen O., Tutus A. Antibacterial and antioxidant activities of traditional medicinal plants from Erzurum region of Turkey // Irish Journal of Medical Science. - 2019. - Vol. 188(4). - P. 1303–1309. DOI 10.1007/s11845-019-01993-x.
11. Salama H.M.H., Marraiki N. Antimicrobial activity and phytochemical analyses of *Polygonum aviculare* L. (Polygonaceae), naturally growing in Egypt // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2010. – Vol. 17, No. 1. – P. 57–63. DOI: 10.1016/j.sjbs.2009.12.009.
12. Hussain F., Hameed I., Dastagir G., Khan I., Ahmad B. Cytotoxicity and phytotoxicity of some selected medicinal plants of the family *Polygonaceae* // African Journal of Biotechnology. - 2010. - Vol. 9(5). - P.770-774. DOI: 10.5897/ajb09.232.

References

1. Narasimhulu G., Reddy K.K., Mohamed J. The genus *Polygonum* (*Polygonaceae*): an Ethnopharmacological and phytochemical perspectives-review // International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. - 2014. - Vol. 6(2). - P. 21-45.
2. Idoudi S., Tourrette A., Bouajila J., Romdhane M., Elfalleh W. The genus *Polygonum*: An updated comprehensive review of its ethnomedicinal, phytochemical, pharmacological activities, toxicology, and phytopharmaceutical formulation // Heliyon. - 2024. - Vol. 10 (8). e28947. DOI 10.1016/j.heliyon. 2024.e28947.

3. Shen B.-B., Yang Y.-P., Yasamin S., Liang N., Su W., Chen S.-H., Wang X.-J., Wang W. Analysis of the Phytochemistry and Bioactivity of the Genus *Polygonum* // Digital Chinese Medicine. – 2018.- Vol.1(1). - P. 19–36. DOI 10.1016/S2589-3777(19)30005-9.
4. Bajtenov M.S. Flora Kazahstana. T. 2. - Almaty: Ғylym, 2001 −280 b. ISBN 9965-07-036-9. [in Russian]
5. Meng T., Xiao D., Muhammed A. Anti-Inflammatory Action and Mechanisms of Resveratrol // Molecules. - 2021.- Vol. 26(1). – P«. D»OI 10.3390/molecules26010229.
6. Chen J., Shi Y. Determination of quercetin and kaempferol in *Polygonum aviculare* by HPLC // Zhongguo Zhong Yao Za Zhi. - 2009. - Vol. 34. - P. 423-427.
7. Jang C.H., Chung Y.Ch., Lee A., Hwang Y.-H. Hydroethanolic Extract of *Polygonum aviculare* L. Mediates Anti- Inflammatory Activity in RAW 264.7 Murine Macrophages Through Induction of Heme Oxygenase-1 and Inhibition of Inducible Nitric Oxide Synthase // Plants. - 2024. - Vol. 13(23). – P. 3314. DOI 10.3390/plants13233314.
8. Chen B.-Y., Kuo Ch.-H., Liu Yu. -Ch., Ye L.-Y., Chen J.-H., Shieh Ch.-J. Ultrasonic-Assisted Extraction of the Botanical Dietary Supplement Resveratrol from *Polygonum cuspidatum* // Journal of Natural Products. – 2012. - 75(10): 1810-1813. DOI 10.1021/np300392n.
9. Sylejmen E.M., Kozhanova K.K., Kadyrbaeva G.M., Kajupova F.E., Nұrymov Zh.Zh., Mahatova B.G., Dzhalgasbaeva A.B., Қydyrbaj B.T., Dathaev U.M., Ustenova G.O. Polygonum zhəne Achillea tuystarynұn өsimdik shikizattarynұn farmacevtikalyқ-tehnologijalyқ parametrleri men sandyқ kөrsetkishterin zertteu // Vestnik KazNMU. - 2026. - № 1 (76). - 62-79 b. DOI 10.53065/kaznmu.2026.76.1.005. [in Kazakh]
10. Ceylan S., Camadan Y., Saral O., Ozsen O., Tutus A. Antibacterial and antioxidant activities of traditional medicinal plants from Erzurum region of Turkey // Irish Journal of Medical Science. - 2019. - Vol. 188(4). - P. 1303–1309. DOI 10.1007/s11845-019-01993-x.
11. Salama H.M.H., Marraiki N. Antimicrobial activity and phytochemical analyses of *Polygonum aviculare* L. (Polygonaceae), naturally growing in Egypt // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2010. – Vol. 17, No. 1. – P. 57–63. DOI: 10.1016/j.sjbs.2009.12.009.
12. Hussain F., Hameed I., Dastagir G., Khan I., Ahmad B. Cytotoxicity and phytotoxicity of some selected medicinal plants of the family *Polygonaceae* // African Journal of Biotechnology. - 2010. - Vol. 9(5). - P.770-774. DOI: 10.5897/ajb09.232.

Авторлар туралы мәлімет

Мамытбекова Г.К.- PhD «Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: Gulnur1416@mail.ru;

Нұрлыханова Ж. - магистрант;; «Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: znurlykhanova@mail.ru;

Кенжеболат А. - инженер;; «Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан. e-mail: aydana.kenzhe.03@mail.ru;

Сүлеймен Е.М. - химия ғылымдарының кандидаты, профессор, «Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: syerlan75@yandex.kz.

Information about authors

Mamytbekova G.K. – PhD, JSC "K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business", Astana, Kazakhstan, e-mail: Gulnur1416@mail.ru;

Nurlykhanova Zh. - Master's student, JSC "K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business", Astana, Kazakhstan, e-mail: znurlykhanova@mail.ru;

Kenzhebolat Aidana - Engineer;; JSC "K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business", Astana, Kazakhstan, e-mail: aydana.kenzhe.03@mail.ru;

Suleimen Ye. M. - Candidate of Chemical Sciences, PhD, Professor;; JSC "K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business", Astana, Kazakhstan (corresponding author), e-mail: syerlan75@yandex.kz.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-15

COLLECTIVE PROTECTION MEASURES IN THE OCCUPATIONAL RISK MANAGEMENT SYSTEM: A COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES IN KAZAKHSTAN, THE EU, GERMANY AND THE USA

A.B. Bekmagambetov[1], A.M. Rakhmetova[1], E.A. Kulmagambetova[1]✉, G.A. Alshynbekova[1], I.E. Sarybaeva[1], R.A. Tokatova[1], Mohamed Rifky[2]

Received: 3 August 2026
Accepted: 13 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: E.A.Kulmagambetova, et al. « COLLECTIVE PROTECTION MEASURES IN THE OCCUPATIONAL RISK MANAGEMENT SYSTEM: A COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES IN KAZAKHSTAN, THE EU, GERMANY AND THE USA ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-15
License CC BY 4.0

[1] *Republican State Enterprise on the Right of Economic Management (RSE on the REM) "Republican Research Institute for Occupational Safety of the Ministry of Labour and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan" Astana, Kazakhstan*
[2] *Eastern University, Chenkalady, Sri Lanka*
✉ *Corresponding author: tabi.ecos200208@gmail.com*

The article presents a comparative legal and regulatory analysis of the framework governing the use of collective protective equipment (CPE) for workers of the chemical industry exposed to chemical factors in the Republic of Kazakhstan, the European Union, the Federal Republic of Germany, and the United States. The relevance of the study stems from the elevated occupational risks associated with chemical production, which are conditioned by the toxicity, fire and explosion hazards of the substances involved, as well as by the substantial social and economic losses caused by occupational injuries and diseases.

The purpose of the present research is to conduct a comparative regulatory and legal analysis of the role of collective protective equipment in preventing occupational risks arising from exposure to chemical factors, drawing on the approaches adopted in the European Union, the Federal Republic of Germany, the United States, and the Republic of Kazakhstan.

The findings demonstrate that all of the systems examined are oriented toward preventing exposure to hazardous substances through risk management, yet the extent to which CPE is integrated into design and operation differs considerably. In the EU and Germany, protective measures are embedded at the design stage on the basis of a mandatory risk assessment carried out prior to the commencement of activity, with priority given to engineering and collective solutions. In the United States, the standards prescribe detailed requirements for specific technological processes, mandating hazard analysis and the deployment of engineering barriers. Kazakhstan is currently transitioning from a compensation-based model to a risk-oriented one, although the linkage between risk assessment, engineering design, and digital monitoring remains insufficiently developed.

The discussion highlights the need to reinforce the priority of CPE within the hierarchy of protective measures, to expand the use of automated control and intelligent monitoring systems, and to elaborate criteria for selecting CPE according to the type of chemical factor, the technological process, and the level of exposure.

The conclusions provide the grounds for recommendations to improve Kazakhstan's legislation: the technical regulations should be supplemented with requirements concerning containment, ventilation, gas analysis, automation, and emergency systems, and the results of risk assessment should be integrated into the design and modernization of production facilities. It is proposed to shift from the formal availability of protective equipment to the assessment of its actual effectiveness against specific chemical risks, in line with modern international

standards ISO 45001 and ISO 31000.

Keywords: chemical factors, chemical production, collective protective equipment, occupational risk, risk-oriented approach, harmful and hazardous production factors, occupational safety and health.

КӘСІБИ ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНДЕГІ ҰЖЫМДЫҚ ҚОРҒАНЫС ҚҰРАЛДАРЫ: ҚАЗАҚСТАН, ЕО, ГЕРМАНИЯ ЖӘНЕ АҚШ ТӘСІЛДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

А.Б. Бекмагамбетов[1], А.М.Рахметова[1], Э.А. Кульмагамбетова[1]✉, Г.К. Алшынбекова[1], Е.И. Сарыбаева[1], Р.А.Токатова[1], Mohamed Rifky[2]

[1] Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің «Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты» ШЖҚ РМК, Астана, Қазақстан
[2] Шығыс Университеті, Ченкалади, Шри-Ланка
✉ e-mail: tabi.ecos200208@gmail.com

Мақала Қазақстан Республикасында, Еуропалық одақта, Германияда және АҚШ-та химия өнеркәсібі жұмысшыларын химиялық факторлардың әсерінен қорғаудың ұжымдық қорғау құралдарын (ҰҚҚ) қолдануды нормативтік-құқықтық реттеуді салыстырмалы талдауға арналған. Зерттеудің өзектілігі химиялық өндірістегі заттардың улылығы, өрт және жарылыс қауіптілігімен байланысты жоғары кәсіби тәуекелдермен, сондай-ақ өндірістік жарақаттану мен кәсіптік аурулардан болатын елеулі әлеуметтік және экономикалық шығындармен айқындалады.

Осы зерттеудің мақсаты – Еуропалық одақтың, Германия Федеративтік Республикасының, АҚШ-тың және Қазақстан Республикасының тәсілдерін ескере отырып, химиялық факторлардың әсерінен болатын кәсіби тәуекелдердің алдын алудағы ұжымдық қорғау құралдарының рөліне салыстырмалы нормативтік-құқықтық талдау жүргізу болып табылады.

Нәтижелер барлық қарастырылып отырған жүйелердің қауіпті заттардың әсерін тәуекелдерді басқару арқылы алдын алуға бағытталғанын көрсетеді, алайда ҰҚҚ-ның жобалау мен пайдалануға кіріктірілу дәрежесі әртүрлі. ЕО-да және Германияда қорғаныш шаралары жобалау сатысында іс-әрекет басталғанға дейін міндетті тәуекелдерді бағалау негізінде қаланады, инженерлік және ұжымдық шешімдерге басымдық беріледі. АҚШ-та стандарттар нақты технологиялық процестерге қойылатын талаптарды егжей-тегжейлі белгілеп, қауіптерді талдауды және инженерлік тосқауылдарды қолдануды талап етеді. Қазақстан өтемдік модельден тәуекел-бағдарланған модельге көшу сатысында, бірақ тәуекелдерді бағалаудың жобалаумен және цифрлық мониторингпен байланысы әлі жеткілікті дамымаған.

Талқылау қорғаныш шаралары иерархиясында ҰҚҚ-ның басымдығын күшейту, автоматтандырылған бақылау жүйелері мен интеллектуалды мониторингті қолдануды кеңейту, сондай-ақ химиялық фактордың түріне, технологиялық процеске және әсер ету деңгейіне байланысты ҰҚҚ таңдау критерийлерін әзірлеу қажеттілігін анықтайды.

Қорытындылар қазақстандық заңнаманы жетілдіру бойынша ұсынымдарды негіздейді: герметизацияға, желдетуге, газды талдауға, автоматтандыруға және авариялық жүйелерге қойылатын талаптармен нормативтерді толықтыру, сондай-ақ тәуекелдерді бағалау нәтижелерін өндірістерді жобалауға және жаңғыртуға кіріктіру. Қорғаныш құралдарының формальды түрде болуынан нақты химиялық тәуекелдер кезінде олардың

нақты тиімділігін бағалауға көшуді ұсынылады, бұл ISO 45001 және ISO 31000 халықаралық стандарттарына сәйкес келеді.

Түйін сөздер: химиялық факторлар, химиялық өндіріс, ұжымдық қорғау құралдары, кәсіби тәуекел, тәуекелге бағдарланған тәсіл, зиянды және қауіпті өндірістік факторлар, еңбекті қорғау.

СРЕДСТВА КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ КАЗАХСТАНА, ЕС, ГЕРМАНИИ И США

А.Б. Бекмагамбетов[1], А.М. Рахметова[1], Э.А. Кульмагамбетова[1]✉, Г.К.Алшынбекова[1], Е.И. Сарыбаева[1], Р.А. Токатова[1], Mohamed Rifky[2]

[1] РГП на ПХВ «Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защиты населения Республики Казахстан»
[2] Восточный университет, Ченкалади, Шри-Ланка
✉ *e-mail: tabi.ecos200208@gmail.com*

Статья посвящена сравнительному анализу нормативно-правового регулирования применения средств коллективной защиты (СКЗ) работников химической промышленности от воздействия химических факторов в Республике Казахстан, Европейском союзе, Германии и США. Актуальность исследования обусловлена высокими профессиональными рисками в химическом производстве, связанными с токсичностью, пожаро- и взрывоопасностью веществ, а также значительными социальными и экономическими потерями от производственного травматизма и профзаболеваний.

Целью настоящего исследования является проведение сравнительного нормативно-правового анализа роли средств коллективной защиты в предупреждении профессиональных рисков, обусловленных воздействием химических факторов, с учетом подходов Европейского союза, Федеративной Республики Германии, США и Республики Казахстан.

Результаты показывают, что все рассматриваемые системы ориентированы на предупреждение воздействия опасных веществ через управление рисками, однако степень интеграции СКЗ в проектирование и эксплуатацию различается. В ЕС и Германии защитные меры закладываются на этапе проектирования на основе обязательной оценки рисков до начала деятельности, приоритет отдаётся инженерным и коллективным решениям. В США стандарты детализируют требования к конкретным технологическим процессам, требуя анализа опасностей и применения инженерных барьеров. Казахстан находится на этапе перехода от компенсационной к риск-ориентированной модели, но связь оценки рисков с проектированием и цифровым мониторингом ещё недостаточно развита.

Обсуждение выявляет необходимость усиления приоритета СКЗ в иерархии защитных мер, расширения применения автоматизированных систем контроля и интеллектуального мониторинга, а также разработки критериев выбора СКЗ в зависимости от вида химического фактора, технологического процесса и уровня экспозиции.

Выводы обосновывают рекомендации по совершенствованию казахстанского законодательства: дополнить нормативы требованиями к герметизации, вентиляции, газоаналитике, автоматизации и аварийным системам, а также интегрировать результаты оценки рисков в проектирование и модернизацию производств. Предлагается перейти от формального наличия средств защиты к оценке их фактической эффективности при конкретных химических рисках, что соответствует современным международным стандартам ISO 45001 и ISO
31000.

Ключевые слова: химические факторы, химическое производство, средства коллективной защиты, профессиональный риск, риск-ориентированный подход, вредные и опасные производственные факторы, охрана труда.

Introduction. Under the current conditions of chemical-industry development, ensuring safe working conditions has become one of the central directions of occupational safety and industrial safety. Chemical production is characterized by the use of toxic, flammable, explosive, corrosive, and other substances capable of exerting both acute and chronic effects on workers' health [1, 2]. Particular danger is posed by emergency releases of toxic substances, leaks of gases and vapours, the formation of hazardous concentrations of chemical agents, and the dispersion of toxic clouds. Exposure to chemical factors may occur both under normal operating conditions and as a consequence of loss of equipment tightness, malfunctions of technological systems, or emergencies.

For this reason, the protection of chemical-industry workers must rest not only on the use of personal protective equipment (PPE), but above all on preventing and containing the hazard directly at its source through engineering and collective protective measures. Such measures include sealing of process equipment, automation of processes, local and emergency ventilation systems, monitoring of gas

contamination, automatic shut-off of reagent supply, and systems for containing and neutralizing emissions [3, 4]. Their use simultaneously reduces the exposure of a group of workers to chemical factors and lessens the dependence of the level of protection on individual behaviour and on the correct use of PPE.

CPE and PPE thereby function as mutually complementary elements of the protection system. PPE is used to protect workers against residual risk, in particular during repair, technological, and emergency work. Nevertheless, where technical capability exists to eliminate or contain the hazard, the question arises of the legal priority of collective protective measures. In international practice, this principle is implemented through the hierarchy of occupational risk controls, which prescribes the preferential use of measures aimed at eliminating the hazard or reducing its impact at the source [5-7].

In this connection, particular importance attaches to the legal and regulatory framework governing the selection and use of CPE, the definition of employer obligations, and the establishment of requirements for monitoring their effectiveness. Comparing the corresponding approaches allows the common principles and divergences in the regulation of collective protection of chemical-industry workers to be identified.

The purpose of the present study is to carry out a comparative regulatory and legal analysis of the role of collective protective equipment in preventing occupational risks arising from exposure to chemical factors, with reference to the approaches of the European Union, the Federal Republic of Germany, the United States, and the Republic of Kazakhstan.

Materials and methods. The materials of the study comprised scientific publications, regulatory legal acts, international standards, technical regulations, and methodological documents governing the management of occupational risks and the use of collective protective equipment for workers exposed to chemical factors. The scientific literature was analysed on the basis of publications indexed in the electronic libraries eLibrary and CyberLeninka, as well as in the international databases PubMed, Scopus, Web of Science, MEDLINE, and RSCI.

The regulatory and legal analysis covered the legislative and normative instruments of the Republic of Kazakhstan, the European Union, the Federal Republic of Germany, and the United States that govern the requirements for preventing and reducing occupational risks associated with exposure to chemical factors.

The study employed methods of comparative legal, systemic, and structural-functional analysis, together with the classification of collective protective equipment, occupational risk assessment, and the review of technological regulations and design standards for chemical facilities.

Results and discussion. The analysis of the regulatory-legal and methodological approaches to the protection of chemical-industry workers from exposure to chemical factors indicates that contemporary occupational safety systems are oriented primarily toward preventing and reducing occupational risks at the level of the technological process itself. Under chemical-production conditions, collective protective equipment acquires particular importance, since it acts directly upon the source of hazardous substance release, prevents such substances from entering the working area, and simultaneously provides protection for a group of workers.

The principal measures include sealing of process equipment, the use of local and general-exchange ventilation, automatic monitoring of harmful-substance concentrations in the air, emergency shut-off systems, and remote control of technological processes.

The results of the comparative analysis of the legal approaches of the Federal Republic of Germany and the Republic of Kazakhstan reveal a set of common directions in ensuring the safety of chemical-industry workers. Among these are the priority accorded to preventing exposure to chemical factors, the use of technical and collective protective measures, the assessment of occupational risks, the monitoring of working conditions, and the deployment of automated monitoring systems. Emphasis is placed on reducing risk directly at the point where the hazardous factor arises, which allows collective protective equipment to be regarded as the principal technical tier for preventing occupational exposure to chemical substances. Personal protective equipment supplements this system and is employed where exposure to a chemical factor cannot be entirely eliminated by engineering and technical means [8-10].

The practice of foreign states shows that in the chemical industry priority is accorded to technical and collective protective measures aimed at containing the hazardous factor at the point of its origin. The most widely used solutions are local exhaust ventilation, sealing and isolation of technological processes,

mechanization and automation of operations, and the treatment of exhausted air.

Experience of the United States. An illustrative example is provided by Gold Coast Ingredients, Inc. of California, which specializes in the production of food flavourings. The U.S. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) conducted an evaluation of engineering controls used during the weighing and pouring of chemical substances and during the mixing of large product batches. A local exhaust ventilation (LEV) system had been installed at the enterprise to reduce chemical exposure directly at the points of release. Ventilated workstations were employed for operations involving small batches, whereas fume enclosures were used for large-batch mixing. The NIOSH study demonstrated a high effectiveness of these engineering solutions: the capture efficiency for contaminants amounted to 89–100 per cent for the ventilated workstations and 96-100 per cent for the fume enclosures. The American experience thus demonstrates the feasibility of substantially reducing occupational exposure to chemical substances through engineering collective protective equipment before such substances disperse into the working area [11].

Experience of Germany. In Germany, the experience of protecting workers engaged in the production and processing of styrene-based materials, widely used in the manufacture of polymer and plastic articles, is particularly instructive. Studies by the Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance (IFA/DGUV) have shown that during the production of polymer articles considerable quantities of styrene vapour may enter the working-zone air. Under certain production conditions, evaporation losses could reach several kilograms per shift per workplace, and the established exposure limit of 86 mg/m³ could be exceeded. As a priority measure, the capture of unavoidable emissions directly at the point of their formation is envisaged, using local exhaust ventilation systems and subsequent treatment of the exhausted air. Particular attention is paid to reducing the volume of exhausted air while maintaining adequate capture effectiveness, since an increase in air flow rate substantially raises the operating costs of purification systems. The German experience demonstrates a comprehensive approach in which collective protection combines source containment, ventilation, and emission treatment [12].

Experience of the European Union (France). A larger-scale assessment of the use of collective protective measures was presented by researchers in France on the basis of the national survey of working conditions SUMER 2017. The analysis covered 4,196 exposure situations of workers involving 25 carcinogenic chemical substances. It was established that in 35.5 per cent of cases collective protection was absent altogether. General-exchange ventilation was used in 25.5 per cent of situations, local exhaust ventilation in 14.5 per cent, and the most effective source-containment measure-enclosure of the process-in only 2.3 per cent. Furthermore, the indicators differed considerably for individual substances. For example, in exposure to formaldehyde local exhaust ventilation was applied in 31.8 per cent of situations, whereas for trichloroethylene the figure was only 3.5 per cent. For wood dust the indicator amounted to 31.5 per cent, for crystalline silica to 12.5 per cent, and for diesel exhaust to 7.0 per cent [13].

The results obtained in France are of fundamental importance for evaluating the effectiveness of the occupational risk management system. Notwithstanding the statutory priority of collective protection, its actual implementation remains insufficient: only about 35 per cent of the examined carcinogen-exposure situations were accompanied by any collective protective measures at all, whereas in a considerable share of cases predominantly general-exchange ventilation was employed, the effectiveness of which for preventing exposure at the source is limited. The researchers also established that situations involving substances with binding occupational exposure limit values (BOELV) were more often accompanied by source-control measures: 18 per cent as against 12 per cent for situations without such a normative value [13-15].

Thus, international experience demonstrates that the most effective forms of collective protection in the chemical industry are the isolation and sealing of the source, local exhaust ventilation, mechanization and automation of technological operations, and the treatment of exhausted air. At the same time, the French data show that the mere existence of a regulatory requirement establishing the priority of collective protection does not in itself guarantee its actual implementation. Accordingly, improvement of the occupational risk management system must be oriented not only toward providing workers with PPE, but above all toward eliminating or containing the hazard at its source.

At the present stage, the development of collective protective equipment is driven by the introduction of digital technologies, automation, and artificial intelligence. Enterprises make extensive use of

intelligent monitoring systems for the production environment, automated complexes for monitoring the concentration of harmful substances, digital ventilation control systems, robotic complexes that remove the human being from the hazardous zone, digital twins of production processes, and machine-learning-based systems for predicting emergency situations. Modern collective protective equipment is becoming part of a unified digital system for managing occupational risks, ensuring continuous monitoring of production-environment parameters and the timely prevention of hazardous events [16, 17].

The contemporary understanding of collective protective equipment has taken shape through decades of development of the international occupational safety system, which rests on the principle of hazard prevention.

At present, a particular role in the system of protecting workers at production sites is played by collective protective equipment against exposure to chemical factors, since it should be regarded as the priority and foundational tier of protection [18, 19].

From a scientific standpoint, collective protective equipment against exposure to chemical factors may most appropriately be regarded as a set of engineering, technical, structural, automated, and organizational solutions intended to prevent or restrict the effect of hazardous and harmful production factors simultaneously on all workers located within the zone of potential hazard. Such a definition most fully reflects the contemporary concept of risk-based occupational safety management, which rests on the prevention of the emergence of occupational risks.

The diversity of production processes, hazardous factors, and technologies has led to the emergence of a variety of approaches to the classification of collective protective equipment. Neither the scholarly literature, nor international standards, nor regulatory documents contain a single universal system of classification; nevertheless, most researchers identify several principal classifying features enabling the existing types of collective protective equipment to be systematized [20, 21].

Within the existing classification of collective protective equipment by the character of the hazardous production factor being protected against, chemical factors-alongside physical, mechanical, and biological ones-are also included, whose principal purpose is to prevent or reduce exposure to harmful and hazardous chemical substances. Collective protective equipment includes: general-exchange and local ventilation systems, aspiration installations, gas-purification facilities, sealed production lines, automated systems for monitoring the concentration of harmful substances, equipment for containing emergency releases, systems for neutralizing toxic compounds, and air purification complexes (Table 1) [22, 23].

Table 1 - Types of collective protective equipment for chemical production

CPE group	Examples	Purpose
Structural and technological	Sealing of reactors, apparatus, pipelines, and fittings; leak-tight connections; seal-less pumps	Prevention of the escape of substances into the working area
Ventilation	Local exhausts; aspiration enclosures; fume hoods; general-exchange and emergency ventilation	Removal or containment of contaminated air
Gas-analytical and automated	Stationary gas detectors; continuous monitoring; automatic interlocks	Early detection of hazards and prevention of accident escalation
Containment and neutralization	Scrubbers, gas-treatment systems, spill collection, neutralization	Reduction and containment of the consequences of a release
Fire and explosion protection	Automatic fire suppression, emergency shut-off, explosion-protection systems	Prevention or limitation of secondary consequences
Remote control	Automated control, remote valves and fittings, offsite operator stations	Removal of the worker from the hazardous zone

For chemical production, the priority of CPE is determined by the necessity of preventing worker contact with a chemical agent directly at the point of its formation or dispersion. CPE makes it possible to monitor the source of the hazard, prevent the dispersal

of toxic substances, and simultaneously reduce the risk of exposure for a group of workers [24-27].

In recent years, the concept of integrated collective protective equipment has been actively developing. Such systems combine engineering installations, automated monitoring, digital platforms for analysing production risks, and intelligent algorithms for predicting emergencies. Solutions of this kind provide continuous real-time monitoring of the state of the production environment and enable timely measures to prevent hazardous events [28-30].

The international system of occupational safety and health rests on a set of fundamental principles enshrined in the international regulatory instruments of the ILO, the United Nations, and the International Organization for Standardization, as well as in the regulatory documents of the European Union and in the national legislation of the leading industrialized states. The principal purpose of these principles is to prevent occupational injuries and occupational diseases by creating safe working conditions, eliminating production hazards, and introducing modern systems of occupational risk management [31-33].

Table 2 - Comparative characterization of the requirements for collective protective equipment in the event of exposure to chemical factors

Criterion	Republic of Kazakhstan	European Union / Germany	United States
Regulatory framework	Labour Code of the RoK; Rules for the Management of Occupational Risks; sanitary rules and norms; technical regulations.	Directive 98/24/EC; REACH (Regulation (EC) No 1907/2006); in Germany - GefStoffV, TRGS/TRBS.	OSHA: 29 CFR 1910.119 (Process Safety Management), 29 CFR 1910.1200 (Hazard Communication).
Protection priority	Priority of eliminating or reducing risk; use of engineering and collective means of protection to isolate workers from the source of hazard.	Priority of eliminating or substituting the hazardous chemical agent and of collective protective measures ahead of PPE.	Priority of hazard elimination and engineering control; PPE is used against residual risk.
Requirements for CPE	The employer is obliged to provide workers with CPE. When assessing occupational risk, provision is made for isolating workers from the source of the harmful or hazardous factor by engineering and/or collective means of protection.	Sealing and isolation of processes, local exhaust ventilation, systems for removing contaminated air, automation, and technical means of preventing releases are provided for. In Germany, technical measures take priority over organizational measures and PPE.	For processes falling under 1910.119, information on the process equipment must include the ventilation system design, piping and instrumentation diagrams, pressure-relief systems, emergency shut-off systems, sensors, alarms, and interlocks. Equipment must comply with recognized engineering practices.
Enforcement mechanism	Assessment and management of occupational risks; internal production control; state control in the sphere of labour; verification of the conformity of CPE with regulatory requirements.	Risk assessment by the employer, documentation of protective measures, internal production control, and state supervision. In Germany, the effectiveness of technical measures is subject to regular verification.	OSHA inspections, analysis of compliance with the standards, verification of process safety management and hazardous chemicals documentation, and monitoring of working conditions.
Liability for violations	Administrative liability for violation of safety and occupational-health requirements; the employer bears responsibility for failure to ensure safe working conditions and the necessary means of protection.	In Germany - administrative measures, orders to eliminate violations, and the restriction or discontinuation of hazardous work; in defined cases, criminal liability is possible.	OSHA imposes monetary penalties for violations of occupational safety requirements; enhanced penalties are possible for wilful and repeated violations.

The comparison of the regulatory legal acts of the Republic of Kazakhstan, Germany, the European Union, and the United States indicates that modern occupational safety systems addressing exposure to chemical factors share a common orientation toward preventing the effect of hazardous substances by means of risk management and the deployment of necessary collective protective equipment.

In the European Union, the linkage between the assessment of chemical exposure risk and the choice of protective means is enshrined more consistently. The foundational instrument is Directive 98/24/EC, which prescribes elimination or reduction to the lowest possible level of the risk associated with chemical agents. Priority is given to the substitution of a hazardous substance by a less hazardous one. Where substitution is not feasible, the use of technical and collective protective means is provided for. Accordingly, the European approach is oriented toward preventing exposure to chemical substances directly at the source of hazard, whereas personal protective equipment is regarded as supplementary protection [34-36].

The German occupational safety system is founded on the requirements of the Occupational Safety and Health Act (Arbeitsschutzgesetz), the German Ordinance on Hazardous Substances (Gefahrstoffverordnung, GefStoffV), the Technical Rules for Operational Safety (Technische Regeln für Betriebssicherheit, TRBS), and the activities of the German Social Accident Insurance (DGUV). One of the key features of the German model is the mandatory assessment of occupational risks, which the employer is obliged to conduct for every workplace prior to the commencement of production activity. On the basis of the results of the occupational risk assessment (ORA), measures are adopted to eliminate the identified hazards, with priority given to engineering solutions and collective protective equipment. This approach has enabled a substantial reduction in the level of occupational injuries and occupational morbidity [37-40].

At the present time, Germany is one of the world leaders in the use of collective protective equipment. Automated ventilation systems, noise-protection screens, protective enclosures for equipment, local exhausts for harmful substances, interlocking systems for hazardous mechanisms, and the remote control of technological processes are widely employed in industry. Considerable attention is paid to the digital monitoring of the state of the production environment, which enables the timely detection of deviations in safety parameters and the prevention of emergencies [41].

The American OSHA model is distinguished by a high degree of specificity with regard to chemically hazardous technological processes. Standard 29 CFR 1910.119 is aimed at preventing or minimizing the consequences of catastrophic releases of toxic, highly reactive, flammable, or explosive chemical substances. The standard requires the performance of a hazard analysis intended to identify, evaluate, and control the hazard. The American model treats CPE as a set of interrelated engineering barriers directed at preventing the release of a chemical substance, its dispersion, and its effect on workers. Requirements pertaining to the mechanical integrity of equipment, inspections and tests, incident investigation, emergency planning, and periodic audits are likewise of no small importance [42-43].

Analysis of these approaches allows the conclusion that the principal distinction of the foreign models lies in the degree to which collective protective equipment is integrated into the occupational risk management system. In the European Union and Germany, protective measures are formulated on the basis of risk assessment and the application of preventive measures at the design stage, whereas the American model provides detailed requirements for a specific technological process and its engineering systems.

The development of the international system of occupational risk management exerts a substantial influence on the improvement of the legislation of the Republic of Kazakhstan in the field of safety and occupational health. In recent years, the principles of risk-based occupational safety management have been consistently introduced into the national regulatory framework, providing for the transition from a compensatory model of worker protection to a preventive system for anticipating occupational risks. This approach is aligned with contemporary international trends set out in the standards of the ISO 45001:2018 series, the directives of the European Union, the recommendations of the International Labour Organization, and OSHA documents [44].

The foundation of the national regulatory system on occupational safety issues comprises the Labour Code of the Republic of Kazakhstan, the Model Regulation on the Occupational Safety Management System, the Rules for the Management of Occupational Risks, and the Concept of Safe Labour of the Republic of Kazakhstan for 2024–2030. These documents envisage

the phased modernization of the occupational safety system on the basis of occupational risk assessment, the introduction of modern safety-management methods, and the harmonization of national legislation with international requirements [45-48].

One of the most significant directions in the reform of the national occupational safety system is the introduction of a risk-based approach into the procedures for evaluating working conditions. Unlike the traditional model, which was based predominantly on the classification of harmful production factors, the modern system envisages a comprehensive assessment of the probability of hazardous events, the severity of possible consequences, and the effectiveness of existing protective measures. This makes it possible to take managerial decisions on the basis of a quantitative assessment of occupational risks and to select the most effective technical means of worker protection [46].

In international practice, priority in the choice of measures for reducing occupational risks is accorded to the assessment of occupational risks and to collective protective equipment. An analogous principle is being progressively introduced into the legislation of the Republic of Kazakhstan. The national regulatory documents establish the employer's obligation to take measures to eliminate or minimize the effect of hazardous factors of the production environment, using above all engineering solutions, equipment modernization, automation of technological processes, ventilation systems, protective enclosures, and other collective means of protection. Personal protective equipment is regarded as a supplementary level of safety in cases where the use of collective means does not entirely eliminate the occupational risk [47].

It should be noted that, compared with the legislation of foreign countries, the occupational risk management system is at a stage of active development. In most developed countries, occupational risk assessment has long been an obligatory element of the production process and has been integrated into corporate safety management systems. In Kazakhstan, analogous mechanisms are being actively introduced through the implementation of the Concept of Safe Labour for 2024–2030, which envisages expanding the coverage of enterprises by the occupational risk assessment system, improving the methodology for their quantitative assessment, and developing digital tools for monitoring working conditions [46-48].

The digitalization of occupational safety management processes deserves separate consideration. In international practice, intelligent monitoring systems for the production environment, automated control of technological processes, digital platforms for occupational risk management, and artificial-intelligence technologies have gained wide currency. In the Republic of Kazakhstan, these directions have likewise been designated as priorities. The Concept of Safe Labour provides for the creation of a national monitoring system in the sphere of occupational safety, the digitalization of occupational risk assessment results, the improvement of state-control mechanisms, and the introduction of modern information technologies into the occupational safety management system [49-51].

Notwithstanding the considerable progress made in improving the legislation, individual elements of international practice have not yet been fully implemented. In particular, further development is required of the mechanisms for integrating the results of occupational risk assessment into the design of production facilities, the wider use of digital hazard-prediction technologies, the elaboration of unified requirements for selecting collective protective equipment with regard to the level of occupational risk, and the more extensive application of the international standards ISO 45001 and ISO 31000 in the organization of corporate occupational safety management systems [52-54].

Accordingly, the improvement of Kazakhstan's regulation should be directed not only toward expanding the range of collective protective equipment, but also toward establishing a mechanism for its mandatory selection in accordance with the type of chemical factor, the nature of the technological process, the level of exposure, and the degree of occupational risk. Such an approach will make it possible to move from the essentially formal presence of protective means to an assessment of their actual effectiveness and correspondence to the specific chemical risk. For Kazakhstan, it is expedient to strengthen the linkage between the results of the assessment of occupational risks arising from chemical factors and the mandatory selection of collective protective equipment. At the same time, regulatory oversight may be supplemented by criteria for the selection of equipment sealing, local exhaust ventilation, automation and remote control, gas-analytical monitoring, interlocks, alarms, and emergency systems.

Table 3 - Comparative analysis of approaches to the management of occupational risks and the use of CPE

Comparison criterion	European Union / Germany	United States	Kazakhstan
Assessment of occupational risks	Employer's duty to assess risks in relation to work processes and workplaces prior to the commencement of production activity.	Identification and evaluation of hazards.	Gradual introduction of the ORA is under way.
Priority of protective measures	Hierarchy of protective measures: elimination of the hazard; technical and organizational measures; PPE.	Hierarchy of control: elimination; substitution; engineering measures; administrative measures; PPE.	Risk-based approach combining preventive, technical, and organizational measures, CPE, and PPE.
Collective protective equipment	CPE constitutes an important part of technical protection. Protective enclosures, interlocks, isolation, ventilation, automation, and remote control are widely employed.	Engineering measures take priority over administrative ones. It is enshrined in law that engineering and work-practice measures must be the principal means of reducing exposure to chemical substances. Protective enclosures, interlocks, isolation, ventilation, automation, and remote control are used.	Provision is made for the use of engineering and collective protective measures, including ventilation, enclosures, automation, and other technical solutions.
Linkage of risk assessment with engineering design	On the basis of the ORA, the need to introduce engineering solutions is determined prior to the commencement of production activity.	OSHA recommends Prevention through Design (PtD), the design of workplaces, tools, and processes; and, where possible, the selection of equipment, machinery, and materials providing a high level of safety.	The linkage of occupational risk assessment with the design and modernization of production facilities is at a stage of further development.
Digital monitoring	Digital and automated systems are used to monitor the parameters of the production environment and technological processes.	Digital technologies may be used for monitoring, data analysis, and verification of effectiveness.	The digitalization of occupational risk assessment and of occupational safety monitoring is designated as a direction of development.
Overall character of the system	Predominantly preventive, risk-based model.	Preventive, risk-based, founded on the hierarchy of control and on engineering protection.	Transition from the traditional compensatory model to a risk-based system.

The comparative analysis of the approaches to occupational risk management and the use of collective protective equipment in Germany, Kazakhstan, and the United States indicates that all three systems place principal emphasis on the prevention and reduction of occupational risks. At the same time, in Germany and the United States the hierarchy of protective measures is more clearly enshrined, providing for the priority of eliminating and reducing the hazard directly at its source and the use of engineering and collective protective means, while personal protective equipment is regarded as a supplementary, lower tier of protection. In Germany, this principle is directly enshrined in occupational safety legislation, whereas in the United States it is implemented through the OSHA hierarchy of hazard controls. In Kazakhstan, the occupational risk management system likewise envisages the identification and assessment of risks, the elaboration of corrective measures, and monitoring and control, including accounting for the provision of workers with collective and personal means of protection. Nevertheless, for the further improvement of the Kazakhstani approach it is expedient to strengthen the priority of engineering and collective measures,

as well as the linkage of the results of occupational risk assessment with the design and modernization of technological processes and with digital monitoring of the effectiveness of CPE [55-59].

Conclusions. The comparative analysis carried out has shown that collective protective equipment is the priority tier of protection for workers in chemical production, since it makes it possible to act directly upon the source of chemical hazard, to prevent the dispersion of harmful substances, and simultaneously to provide protection for a group of workers.

It has been established that, against a common orientation toward preventing exposure to hazardous substances, the key distinction of the foreign models lies in the depth to which CPE is integrated into the risk management system. In the EU and Germany, protective measures are imperatively embedded at the design stage on the basis of risk assessment, whereas in the United States the regulation is of a more detailed, process-oriented character. The Kazakhstani system is formally close to the international hierarchy of control measures, but requires reinforcement of the priority of engineering solutions over administrative measures and personal protective equipment.

For the improvement of the Kazakhstani occupational risk management system, it is recommended: to reinforce the regulatory linkage of risk assessment procedures with the stages of the design and modernization of production facilities; to introduce a mechanism of mandatory, evidence-based selection of CPE in accordance with the type of chemical risk, the specifics of the process, and the level of exposure; and to supplement the technical regulations with specific effectiveness criteria for systems of sealing, ventilation, automation, gas-analytical monitoring, and emergency response.

Funding. *This article was prepared within the framework of the scientific and technical program "Development of a scientifically based strategy for optimizing regulatory and technical regulation of the selection and application of collective protection means for workers against harmful and hazardous working conditions" (IRN: BR35237968), funded from the program's targeted funds and implemented by the Republican Research Institute for Occupational Safety and Health under the Ministry of Labour and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan*

Литература

1. Рахметова А.М., Алшынбекова Г.К., Кульмагамбетова Э.А., Сагиндикова Н.Т., Шилменова А.Т. Өңдеу өнеркәсібі жұмыскерлерінің денсаулық жағдайына өндірістік ортадағы химиялық факторлардың әсері //Вестник Университета Шакарима.- 2026. - №1.-С. 636-646. DOI 10.53360/2788-7995-2026-1(21)-69.
2. Актаева Л.М., Рахметова А.М., Кульмагамбетова Э.А., Алшынбекова Г.К., Шилменова А.Т., Сагиндикова Н.Т., Ташенов А.Ш., Еркінбекова А.Е. Тау-кен саласындағы еңбек жағдайларының жұмыскерлердің денсаулық жағдайына әсерін талдау //Вестник КазУТБ.-2026.-№ 2.-С.560-573. DOI 10.58805/kazutb.v.2.31-1652.
3. Aktayeva, L., Bekmagambetov, A., Yedilbayeva, L., Rakhmetova, A., Daumova, G., Kulmagambetova, E., Sagindykova, N. Impact of green jobs on worker classification and categorization. International Journal of Safety and Security Engineering.-2025.- Vol. 15(9).P. 1861-1872. DOI 10.18280/ijsse.150910.
4. Bekmagambetov, A., Rakhmetova, A., Yedilbayeva, L., Daumova, G., Kulmagambetova, E., Abdrakhmanova, N., Sagindykova, N. (2025). A study on causal relationships between working conditions and occupational diseases: A case study of a phosphorus plant in Kazakhstan. International Journal of Safety and Security Engineering.-2025.-Vol.15(5).-P. 973-985. DOI 10.18280/ijsse.150511.
5. M.A. Yelubay, A.B. Bekmagambetov, E.A. Kulmagambetova, A.M. Rakhmetova, D.T. Tolegenov. Overview of mechanisms for ensuring safe work in chemical production //Vestnik KazUTB.-2025.-№1(26).- C.179-192. DOI 10.58805/kazutb.v.1.26-653.
6. International Labour Organization. Global Strategy on Occupational Safety and Health 2024-30 and plan of action for its implementation. - Geneva: ILO, 2023. URL: https://www.ilo.org/resource/conference-paper/gb/349/global-strategy-occupational-safety-and-health-2024%E2%80%9330-and-plan-action-its Date accessed: 19.05.2026.
7. International Labour Organization. Nearly 3 million people die of work-related accidents and diseases. - Geneva: ILO, 2023. - URL: https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases Date acessed: 19.05.2026.

8. Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue. Collective protective equipment (CPE). Brussels: Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue.- URL:https://employment.belgium.be/en/themes/international/posting/working-conditions-be-respected-case-posting-belgium/well-being-4 Date accessed: 19.05.2026.
9. Rosner D., Markowitz G. A Short History of Occupational Safety and Health in the United States //American Journal of Public Health.-2020.-Vol.110(5).-P.622-628. DOI 10.2105/AJPH.2020.305581.
10. European Agency for Safety and Health at Work. Digitalisation of work [Электронный ресурс].-Bilbao: EU-OSHA.URL: https://osha.europa.eu/en/themes/digitalisation-work- Date accessed: 19.05.2026.
11. Dunn K.H., Echt A., Garcia A. In-Depth Survey Report: Evaluation of Engineering Controls for the Mixing of Flavoring Chemicals at Gold Coast Ingredients, Inc., Commerce, California. - Cincinnati, OH : National Institute for Occupational Safety and Health.- 2008.- 34 p. DOI 10.26616/NIOSHEPHB32211a.
12. Hahn N. Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Styrol: Zusammenfassung der Vorträge anlässlich des BGIA-Seminars G3 - Technische Schutzmaßnahmen am 13./14. September 2005 in Dresden.-Sankt Augustin: BGIA, 2006.- 117p.-BGIA-Report4/2006. ISBN 3-88383-704-0.
13. Havet N., Penot A. Collective Protection Measures for Occupational Exposure to Carcinogenic Chemicals in France: The Links between Regulations on Chemicals and Effective Implementation ;// International Journal of Environmental Research and Public Health.- 2022.- Vol. 19(14). - Article 8553. DOI 10.3390/ijerph19148553.
14. Rosen P. H., Heinold E., Fries-Tersch E., Wischniewski S. Advanced robotics and automation: implications for occupational safety and health. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.- 45 p. DOI 10.2802/789276.
15. European Agency for Safety and Health at Work. Directive 89/391/EEC- OSH “Framework Directive”.- Bilbao: EU-OSHA.-2021.- URL: https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/the-osh-framework-directive/1 Date accessed: 19.05.2026.
16. National Institute for Occupational Safety and Health. Hierarchy of Controls - Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention, 2024.- URL: https://www.cdc.gov/niosh/hierarchy-of-controls/index.html.- Date accessed: 19.05.2026.
17. ГОСТ 12.4.011–89. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. - М: Издательство стандартов, 1989. URL: https://prg.kz/document/?doc_id=30039424&pos=2;268 Дата обращения: 21.05.2026.
18. ГОСТ 12.4.125-83. Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты работающих от воздействия механических факторов. Классификация. - М.: Издательство стандартов, 1983. URL: https://prg.kz/document/?doc_id=30052139-Дата обращения: 21.06.2026.
19. Ajslev J. Z. N., Møller J. L., Andersen M. F., Pirzadeh P., Lingard H. The Hierarchy of Controls as an Approach to Visualize the Impact of Occupational Safety and Health Coordination // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19(5): 2731. DOI 10.3390/ijerph19052731.
20. Dyreborg J., Lipscomb H. J., Nielsen K. et.all. Safety interventions for the prevention of accidents at work: A systematic review // Campbell Systematic Reviews. - 2022.- Vol. 18(2).- 187 p. DOI 10.1002/cl2.1234.
21. Amyotte P. R., MacDonald D. K., Khan F. I. An analysis of CSB investigation reports concerning the hierarchy of controls // Process Safety Progress. - 2011.- Vol. 30(3). - P.261-265. DOI 10.1002/prs.10461.
22. Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue. Collective protective equipment (CPE). Brussels: Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue. URL:https://employment.belgium.be/en/themes/international/posting/working-conditions-berespected-case-posting-belgium/well-being-4.- Date accessed: 21.05.2026.
23. European Agency for Safety and Health at Work. Smart digital systems for better safety and health at work. Bilbao: EU-OSHA, 2025.-Healthy Workplaces. URL: https://healthy-workplaces.osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-systems-better-safety-and-health-work Date accessed: 21.06.2026.
24. European Agency for Safety and Health at Work. Smart digital monitoring systems for occupational safety and health: uses and challenges. - Luxembourg: Publications Office of the European Union.-2022. DOI 10.2802/25469.
25. Edoardo Ales ILO Convention 155 Occupational Safety and Health Convention, 1981 (No. 155): Article-by-Article Commentary// In book: International and European Labour Law. (pp.1392-1413) DOI 10.5771/9783845266190-1408.

26. International Labour Organization. A safe and healthy working environment is a fundamental principle and right at work.- Geneva: ILO, 2022.- URL: https://www.ilo.org/topics-and-sectors/safety-and-health-work/safe-and-healthy-working-environment-fundamental-principle-and-right-work Date accessed: 21.06.2026.
27. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. - 41 p. -URL: https://www.iso.org/standard/63787.html - Date accessed: 19.06.2026.
28. Germany. Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG). §5 Beurteilung der Arbeitsbedingungen. Berlin: Bundesministerium der Justiz.- URL: https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/__5.html Date accessed: 19.08.2026.
29. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Risk assessment. - Berlin: DGUV. URL: https://www.dguv.de/en/prevention/topics-a-z/risk-assessment/index.jsp- Date accessed: 19.06.2026.
30. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Seven Steps for Risk Assessment.- Dortmund: BAuA. - URL: https://www.baua.de/EN/Topics/Work-design/Risk-assessment/Handbook/Basic-knowledge/Seven-steps-for-risk-assessment/Seven-steps-for-risk-assessment_dossier Date accessed: 21.06.2026.
31. International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights: adopted by General Assembly resolution 2200A (XXI) of 16 December 1966, entry into force 3 January 1976, in accordance with article 27. New York: United Nations.URL: https://www.ohchr.org/Documents/ProfessionalInterest/cescr.pdf- Date accessed: 19.06.2026.
32. Committee on Economic, Social and Cultural Rights. General Comment No. 23 (2016) on the right to just and favourable conditions of work (article 7 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights). - Geneva: United Nations, 2016. URL: https://docstore.ohchr.org/SelfServices/FilesHandler.ashx?enc=HI2WCrNprXdb93hp8EpBQSD6WO%2BYesFqEE0JfrJby0t9VYUTpZLRSlSaIpG%2BacqIvC9slPR3ZWPdNLwq0seqqg%3D%3D Date accessed: 22.05.2026.
33. International Labour Organization. Controlling the Risks.-Geneva: ILO. URL: https://www.ilo.org/topics-and-sectors/occupational-safety-and-health-guide-labour-inspectors-and-other/how-can-occupational-safety-and-health-be-managed/controlling-risks- Date accessed: 22.05.2026.
34. Germany. Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG). Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit.-Berlin: Bundesministerium der Justiz. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/ - Date accessed: 22.05.2026.
35. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS). - Dortmund: BAuA. URL: https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBS/TRBS Date accessed: 22.05.2026.
36. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Gefährdungsbeurteilung - Berlin: DGUV. URL: https://www.dguv.de/de/praevention/themen-a-z/gefaehrdungsbeurteilung/index.jsp Date accessed: 22.05.2026.
37. Об утверждении Правил управления профессиональными рисками: приказ Министра труда и социальной защиты населения Республики Казахстан от 11 сентября 2020 года №363, в редакции приказа Министра труда и социальной защиты населения Республики Казахстан от 28 мая 2026 года №211. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021197 -Дата обращения: 19.06.2026.
38. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/63787.html- Date accessed: 22.05.2026.
39. International Labour Organization. Guidelines on occupational safety and health management systems, ILO-OSH 2001. Geneva: ILO, 2001. URL: https://www.ilo.org/publications/guidelines-occupational-safety-and-health-management-systems-ilo-osh-2001 Date accessed: 22.05.2026.
40. Трудовой кодекс Республики Казахстан: Кодекс Республики Казахстан от 23 ноября 2015 года № 414-V ЗРК. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1500000414 -Дата обращения: 19.06.2026.
41. Об утверждении Типового положения о системе управления охраной труда: приказ Министра труда и социальной защиты населения Республики Казахстан от 27 августа 2020 года № 340. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021140 Дата обращения: 19.06.2026.
42. Об утверждении Концепции безопасного труда Республики Казахстан на 2024–2030 годы URL: постановление Правительства Республики Казахстан от 28 декабря 2023 года №1182. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001182 Дата обращения: 19.06.2026.

43. International Labour Organization. A 5 step guide for employers, workers and their representatives on conducting workplace risk assessments.-Geneva: ILO, 2013. URL: https://labordoc.ilo.org/discovery/fulldisplay/alma994843073402676/41ILO_INST:41ILO_V2 Date accessed: 22.05.2026.
44. Ellenbecker M. J. Engineering controls as an intervention to reduce worker exposure //American Journal of Industrial Medicine. −1996. Vol. 29(4). -P. 303–307. DOI 10.1002/(SICI)1097-0274(199604)29:43.0.CO;2-P.
45. Gangolells M., Casals M., Forcada N., Roca X., Fuertes A. Mitigating construction safety risks using prevention through design \//Journal of Safety Research. - 2010. - Vol. 41(2). - P. 107-122. DOI 10.1016/j.jsr.2009.10.007.
46. Schulte P. A., Rinehart R., Okun A., Geraci C. L., Heidel D. S. National Prevention through Design (PtD) Initiative //Journal of Safety Research. - 2008. - Vol.39(2). - P. 115-121. DOI 10.1016/j.jsr.2008.02.021.
47. Richter E. D., Kretzmer D. Prevention through pre-review in occupational health and safety //American Journal of Public Health.-1980.-Vol.70(2).-P.157-161. DOI 10.2105/AJPH.70.2.157.
48. Ledda A., Berardi S., Bemporad E. A review of collective protective measures for workers in contaminated sites //WIT Transactions on Information and Communication Technologies. - 2014. - Vol. 47. - P. 307-317. DOI 10.2495/RISK140261.
49. European Agency for Safety and Health at Work. Artificial intelligence for worker management: implications for occupational safety and health. Luxembourg: Publications Office of the European Union. URL: https://osha.europa.eu/en/publications/artificial-intelligence-worker-management-implications-occupational-safety-and-health Date accessed: 22.05.2026.
50. Mansi A., Boccuni F., Iavicoli S. Nanomaterials as a new opportunity for protecting workers from biological risk //Industrial Health.-2019.-Vol.57(6).-P.668-675. DOI 10.2486/indhealth.2018-0197.
51. Hardison D., Hallowell M. Construction hazard prevention through design: Review of perspectives, evidence, and future objective research agenda // Safety Science.- 2019.- Vol. 120. - P.517-526. DOI 10.1016/j.ssci.2019.08.001.
52. Jiang L., Zhang J., Wong Y. D. Digital technology in occupational health of manufacturing industries: a systematic literature review \//Discover Applied Sciences. - 2024. -Vol. 6:631. DOI 10.1007/s42452-024-06349-4
53. Martínez-Aires M. D., López-Alonso M., de la Hoz-Torres M. L., Aguilar-Aguilera A., Arezes P. Occupational risk prevention in the European Union construction sector: 30 Years since the publication of the Directive// Safety Science.-2024.-Vol.177:106593. DOI 10.1016/j.ssci.2024.106593.
54. International Organization for Standardization. ISO 31000:2018. Risk management - Guidelines.-Geneva:ISO, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/65694.html Date accessed: 19.06.2026.
55. Dewlaney K. S., Hallowell M. Prevention through design and construction safety management strategies for high performance sustainable building construction //Construction Management and Economics.-2012.-Vol.30(2). DOI 10.1080/01446193.2011.654232.
56. Weinstein M., Susi P., Goldberg M. The power of local action in occupational health: the adoption of local exhaust ventilation in the Chicago tuckpointing trade // International Journal of Occupational and Environmental Health.-2016.-Vol.22(2)-P.142-150. DOI 10.1080/10773525.2016.1187476.
57. Lee T., Soo J.-C., LeBouf R. F., Burns D., Schwegler-Berry D., Kashon M., Bowers J., Harper M. Surgical smoke control with local exhaust ventilation: Experimental study // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. −2018.- Vol. 15(4). -P.341-350. DOI 10.1080/15459624.2017.1422082.
58. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Chemical Hazards and Toxic Substances: Controlling Exposure. U.S. Department of Labor. URL: https://www.osha.gov/chemical-hazards/controlling-exposure Date accessed: 22.05.2026.
59. National Institute for Occupational Safety and Health. Current Strategies for Engineering Controls in Nanomaterial Production and Downstream Handling Processes [Электронный ресурс].-DHHS (NIOSH) Publication No.2014-102.-URL: https://www.cdc.gov/niosh/docs/2014-102/ - Date accessed: 22.05.2026.

References

1. Rahmetova A.M., Alshynbekova G.K., Kul'magambetova Je.A., Sagindikova N.T., Shilmenova A.T. Өңdeu өnerkəsibi zhұmyskerlerinің densaulyқ zharғdajyna өndiristik ortadarғy himijalyқ faktorlardyң əseri \//Vestnik Universiteta Shakarima.- 2026. - №1.-S. 636-646. DOI 10.53360/2788-7995-2026-1(21)-69. [in Kazakh]
2. Aktaeva L.M., Rahmetova A.M., Kul'magambetova Je.A., Alshynbekova G.K., Shilmenova A.T., Sagindikova N.T., Tashenov A.Sh., Erkinbekova A.E. Tau-ken salasyndarғy eңbek zharғdajlarynyң zhұmyskerlerdің densaulyқ zharғdajyna əserin taldau //Vestnik KazUTB.-2026.-№2.-S.560-573. DOI 10.58805/kazutb.v.2.31-1652. [in Kazakh]
3. Aktayeva, L., Bekmagambetov, A., Yedilbayeva, L., Rakhmetova, A., Daumova, G., Kulmagambetova, E., Sagindykova, N. Impact of green jobs on worker classification and categorization. International Journal of Safety and Security Engineering.-2025.- Vol. 15(9).P. 1861-1872. DOI 10.18280/ijsse.150910.
4. Bekmagambetov, A., Rakhmetova, A., Yedilbayeva, L., Daumova, G., Kulmagambetova, E., Abdrakhmanova, N., Sagindykova, N. (2025). A study on causal relationships between working conditions and occupational diseases: A case study of a phosphorus plant in Kazakhstan. International Journal of Safety and Security Engineering.-2025.-Vol.15(5).-P. 973-985. DOI 10.18280/ijsse.150511.
5. M.A. Yelubay, A.B. Bekmagambetov, E.A. Kulmagambetova, A.M. Rakhmetova, D.T. Tolegenov. Overview of mechanisms for ensuring safe work in chemical production //Vestnik KazUTB.-2025.-№1(26).- C.179-192. DOI 10.58805/kazutb.v.1.26-653
6. International Labour Organization. Global Strategy on Occupational Safety and Health 2024-30 and plan of action for its implementation. - Geneva: ILO, 2023. URL: https://www.ilo.org/resource/conference-paper/gb/349/global-strategy-occupational-safety-and-health-2024%E2%80%9330-and-plan-action-its Date accessed: 19.05.2026.
7. International Labour Organization. Nearly 3 million people die of work-related accidents and diseases. - Geneva: ILO, 2023. - URL: https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases Date acessed: 19.05.2026.
8. Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue. Collective protective equipment (CPE). Brussels: Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue.- URL:https://employment.belgium.be/en/themes/international/posting/working-conditions-be-respected-case-posting-belgium/well-being-4 Date accessed: 19.05.2026.
9. Rosner D., Markowitz G. A Short History of Occupational Safety and Health in the United States //American Journal of Public Health.-2020.-Vol.110(5). -P.622-628. DOI 10.2105/AJPH.2020.305581.
10. European Agency for Safety and Health at Work. Digitalisation of work [Электронный ресурс].-Bilbao: EU-OSHA.URL: https://osha.europa.eu/en/themes/digitalisation-work- Date accessed: 19.05.2026.
11. Dunn K.H., Echt A., Garcia A. In-Depth Survey Report: Evaluation of Engineering Controls for the Mixing of Flavoring Chemicals at Gold Coast Ingredients, Inc., Commerce, California. - Cincinnati, OH : National Institute for Occupational Safety and Health.- 2008.- 34 p. DOI 10.26616/NIOSHEPHB32211a.
12. H«ahn N. Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Styrol: Zusammenfassung der Vorträge anlässlich des BGIA-Seminars G3 - Technische Schutzmaßnahmen am 13./14. September 2005 in Dresden.-Sankt Augustin: BGIA, 2006.- 117p.-BGIA-Report4/2006. ISBN 3-88383-704-0.
13. Havet N., Penot A. Collective Protection Measures for Occupational Exposure to Carcinogenic Chemicals in France: The Links between Regulations on Chemicals and Effective Implementation ;// International Journal of Environmental Research and Public Health.- 2022.- Vol. 19(14):8553.- DOI 10.3390/ijerph19148553.
14. Rosen P. H., Heinold E., Fries-Tersch E., Wischniewski S. Advanced robotics and automation: implications for occupational safety and health. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.- 45 p. DOI 10.2802/789276.
15. European Agency for Safety and Health at Work. Directive 89/391/EEC- OSH “Framework Directive”.- Bilbao: EU-OSHA.-2021.- URL: https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/the-osh-framework-directive/1 Date accessed: 19.05.2026.
16. National Institute for Occupational Safety and Health. Hierarchy of Controls - Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention, 2024.- URL: https://www.cdc.gov/niosh/hierarchy-of-controls/index.html.- Date accessed: 19.05.2026.

17. GOST 12.4.011–89. Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva zashhity rabotajushhih. Obshhie trebovanija i klassifikacija. - M: Izdatel'stvo standartov, 1989. URL: https://prg.kz/document/?doc_id=30039424&pos=2;268 -Data obrashhenija: 21.05.2026.[in Russian]
18. GOST 12.4.125-83. Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva kollektivnoj zashhity rabotajushhih ot vozdejstvija mehanicheskih faktorov. Klassifikacija. - M.: Izdatel'stvo standartov, 1983. URL: https://prg.kz/document/?doc_id=30052139-Data obrashhenija: 21.06.2026. [in Russian]
19. Ajslev J. Z. N., Møller J. L., Andersen M. F., Pirzadeh P., Lingard H. The Hierarchy of Controls as an Approach to Visualize the Impact of Occupational Safety and Health Coordination // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19(5): 2731. DOI 10.3390/ijerph19052731.
20. Dyreborg J., Lipscomb H. J., Nielsen K. et.all. Safety interventions for the prevention of accidents at work: A systematic review // Campbell Systematic Reviews. - 2022.- Vol. 18(2).- 187 p. DOI 10.1002/cl2.1234.
21. Amyotte P. R., MacDonald D. K., Khan F. I. An analysis of CSB investigation reports concerning the hierarchy of controls // Process Safety Progress. - 2011.- Vol. 30(3). - P.261-265. DOI 10.1002/prs.10461.
22. Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue. Collective protective equipment (CPE). Brussels: Federal Public Service Employment, Labour and Social Dialogue. URL:https://employment.belgium.be/en/themes/international/posting/working-conditions-berespected-case-posting-belgium/well-being-4.- Date accessed: 21.05.2026.
23. European Agency for Safety and Health at Work. Smart digital systems for better safety and health at work. Bilbao: EU-OSHA, 2025.-Healthy Workplaces. URL: https://healthy-workplaces.osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-systems-better-safety-and-health-work Date accessed: 21.06.2026.
24. European Agency for Safety and Health at Work. Smart digital monitoring systems for occupational safety and health: uses and challenges. - Luxembourg: Publications Office of the European Union.-2022. DOI 10.2802/25469.
25. Edoardo Ales ILO Convention 155 Occupational Safety and Health Convention, 1981 (No. 155): Article-by-Article Commentary// In book: International and European Labour Law. (pp.1392-1413) DOI 10.5771/9783845266190-1408.
26. International Labour Organization. A safe and healthy working environment is a fundamental principle and right at work.- Geneva: ILO, 2022.- URL: https://www.ilo.org/topics-and-sectors/safety-and-health-work/safe-and-healthy-working-environment-fundamental-principle-and-right-work Date accessed: 21.06.2026.
27. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. - 41 p. -URL: https://www.iso.org/standard/63787.html - Date accessed: 19.06.2026.
28. Germany. Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG). §5 Beurteilung der Arbeitsbedingungen. Berlin: Bundesministerium der Justiz.- URL: https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/__5.html Date accessed: 19.08.2026.
29. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Risk assessment. - Berlin: DGUV. URL: https://www.dguv.de/en/prevention/topics-a-z/risk-assessment/index.jsp- Date accessed: 19.06.2026.
30. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Seven Steps for Risk Assessment.- Dortmund: BAuA. - URL: https://www.baua.de/EN/Topics/Work-design/Risk-assessment/Handbook/Basic-knowledge/Seven-steps-for-risk-assessment/Seven-steps-for-risk-assessment_dossier Date accessed: 21.06.2026.
31. International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights: adopted by General Assembly resolution 2200A (XXI) of 16 December 1966, entry into force 3 January 1976, in accordance with article 27. New York: United Nations.URL: https://www.ohchr.org/Documents/ProfessionalInterest/cescr.pdf- Date accessed: 19.06.2026.
32. Committee on Economic, Social and Cultural Rights. General Comment No. 23 (2016) on the right to just and favourable conditions of work (article 7 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights). - Geneva: United Nations, 2016. URL: https://docstore.ohchr.org/SelfServices/FilesHandler.ashx?enc=HI2WCrNprXdb93hp8EpBQSD6WO%2BYesFqEE0JfrJby0t9VYUTpZLRSlSaIpG%2BacqIvC9slPR3ZWPdNLwq0seqqg%3D%3D Date accessed: 22.05.2026.
33. International Labour Organization. Controlling the Risks.-Geneva: ILO. URL: https://www.ilo.org/topics-and-sectors/occupational-safety-and-health-guide-labour-inspectors-and-other/how-can-occupational-safety-and-health-be-managed/controlling-risks- Date accessed: 22.05.2026.

34. Germany. Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG). Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit.-Berlin: Bundesministerium der Justiz. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/ - Date accessed: 22.05.2026.
35. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS). - Dortmund: BAuA. URL: https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBS/TRBS Date accessed: 22.05.2026.
36. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Gefährdungsbeurteilung - Berlin: DGUV. URL: https://www.dguv.de/de/praevention/themen-a-z/gefaehrdungsbeurteilung/index.jsp Date accessed: 22.05.2026.
37. Ob utverzhdenii Pravil upravlenija professional'nymi riskami: prikaz Ministra truda i social'noj zashhity naselenija Respubliki Kazahstan ot 11 sentjabrja 2020 goda №363, v redakcii prikaza Ministra truda i social'noj zashhity naselenija Respubliki Kazahstan ot 28 maja 2026 goda №211. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021197 -Data obrashhenija: 19.06.2026. [in Russian]
38. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/63787.html- Date accessed: 22.05.2026.
39. International Labour Organization. Guidelines on occupational safety and health management systems, ILO-OSH 2001. Geneva: ILO, 2001. URL: https://www.ilo.org/publications/guidelines-occupational-safety-and-health-management-systems-ilo-osh-2001 Date accessed: 22.05.2026.
40. Trudovoj kodeks Respubliki Kazahstan: Kodeks Respubliki Kazahstan ot 23 nojabrja 2015 goda № 414-V ZRK. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1500000414 - -Data obrashhenija: 19.06.2026. [in Russian]
41. Ob utverzhdenii Tipovogo polozhenija o sisteme upravlenija ohranoj truda: prikaz Ministra truda i social'noj zashhity naselenija Respubliki Kazahstan ot 27 avgusta 2020 goda № 340. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021140 -Data obrashhenija: 19.06.2026. [in Russian]
42. Ob utverzhdenii Koncepcii bezopasnogo truda Respubliki Kazahstan na 2024–2030 gody URL: postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazahstan ot 28 dekabrja 2023 goda №1182. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001182 - Data obrashhenija: 19.06.2026. [in Russian]
43. International Labour Organization. A 5 step guide for employers, workers and their representatives on conducting workplace risk assessments.-Geneva: ILO, 2013. URL: https://labordoc.ilo.org/discovery/fulldisplay/alma994843073402676/41ILO_INST:41ILO_V2 Date accessed: 22.05.2026.
44. Ellenbecker M. J. Engineering controls as an intervention to reduce worker exposure //American Journal of Industrial Medicine. −1996. Vol. 29(4).-P.303–307. DOI 10.1002/(SICI)1097-0274(199604)29:43.0.CO;2-P..
45. Gangolells M., Casals M., Forcada N., Roca X., Fuertes A. Mitigating construction safety risks using prevention through design \//Journal of Safety Research. - 2010. - Vol. 41(2). - P. 107-122. DOI 10.1016/j.jsr.2009.10.007.
46. Schulte P. A., Rinehart R., Okun A., Geraci C. L., Heidel D. S. National Prevention through Design (PtD) Initiative //Journal of Safety Research. - 2008.- Vol.39(2)- P.115-121. DOI 10.1016/j.jsr.2008.02.021.
47. Richter E. D., Kretzmer D. Prevention through pre-review in occupational health and safety //American Journal of Public Health.-1980.-Vol.70(2).-P.157–161. DOI 10.2105/AJPH.70.2.157.
48. Ledda A., Berardi S., Bemporad E. A review of collective protective measures for workers in contaminated sites //WIT Transactions on Information and Communication Technologies. – 2014. -Vol. 47. - P. 307-317. DOI 10.2495/RISK140261.
49. European Agency for Safety and Health at Work. Artificial intelligence for worker management: implications for occupational safety and health. Luxembourg: Publications Office of the European Union. URL: https://osha.europa.eu/en/publications/artificial-intelligence-worker-management-implications-occupational-safety-and-health Date accessed: 22.05.2026.
50. Mansi A., Boccuni F., Iavicoli S. Nanomaterials as a new opportunity for protecting workers from biological risk//Industrial Health. −2019.-Vol.57(6).-P.668–675. DOI 10.2486/indhealth.2018-0197.
51. Hardison D., Hallowell M. Construction hazard prevention through design: Review of perspectives, evidence, and future objective research agenda // Safety Science.- 2019.- Vol. 120. - P.517-526.-DOI 10.1016/j.ssci.2019.08.001.

52. Jiang L., Zhang J., Wong Y. D. Digital technology in occupational health of manufacturing industries: a systematic literature review \//Discover Applied Sciences. - 2024. -Vol. 6:631. DOI 10.1007/s42452-024-06349-4
53. Martínez-Aires M. D., López-Alonso M., de la Hoz-Torres M. L., Aguilar-Aguilera A., Arezes P. Occupational risk prevention in the European Union construction sector: 30 Years since the publication of the Directive// Safety Science.-2024.-Vol.177:106593. DOI 10.1016/j.ssci.2024.106593
54. International Organization for Standardization. ISO 31000:2018. Risk management - Guidelines.-Geneva:ISO, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/65694.html Date accessed: 19.06.2026.
55. Dewlaney K. S., Hallowell M. Prevention through design and construction safety management strategies for high performance sustainable building construction //Construction Management and Economics.-2012.-Vol.30(2). DOI 10.1080/01446193.2011.654232.
56. Weinstein M., Susi P., Goldberg M. The power of local action in occupational health: the adoption of local exhaust ventilation in the Chicago tuckpointing trade // International Journal of Occupational and Environmental Health.-2016.-Vol.22(2)-P.142-150. DOI 10.1080/10773525.2016.1187476.
57. Lee T., Soo J.-C., LeBouf R. F., Burns D., Schwegler-Berry D., Kashon M., Bowers J., Harper M. Surgical smoke control with local exhaust ventilation: Experimental study // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. −2018.- Vol. 15(4). -P.341-350. DOI 10.1080/15459624.2017.1422082.
58. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Chemical Hazards and Toxic Substances: Controlling Exposure. U.S. Department of Labor. URL: https://www.osha.gov/chemical-hazards/controlling-exposure Date accessed: 22.05.2026.
59. National Institute for Occupational Safety and Health. Current Strategies for Engineering Controls in Nanomaterial Production and Downstream Handling Processes [Электронный ресурс].-DHHS (NIOSH) Publication No.2014–102.-URL: https://www.cdc.gov/niosh/docs/2014-102/ - Date accessed: 22.05.2026.

Information about the authors

Bekmagambetov A.B.-Candidate of Legal Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Center for Scientific Research, e-mail: adilet1979@mail.ru;

Rakhmetova A.M. - Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, head of the Center for scientific research, Astana, Kazakhstan, e-mail: ra_anar@mail.ru;

Kulmagambetova E.A. - Candidate of Chemical Sciences, leading researcher of the Center for scientific research, Astana, Kazakhstan, e-mail: tabi.ecos200208@gmail.com;

Alshynbekova G.K. - Candidate of Biological Sciences, leading researcher of the Center for scientific research, Astana, Kazakhstan, e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com;

Sarybaeva I.Ye.- Master of Economic Sciences, deputy head of the Center for scientific research, Astana, Kazakhstan, e-mail: inarasaribaeva@gmail.com;

Tokatova R.A.- Master of Social Work, senior researcher at the Center for scientific research, Astana, Kazakhstan, tokatovarabiga897@gmail.com;

Mohamed Rifky A.L. - Ph.D. in Technology and Biotechnology of Processing, Storage and Reprocessing of Agricultural and Food Products, Senior Lecturer Gr II in Biosystems Technology, Eastern University, Chenkalady, Sri Lanka, e-mail: rifkyalm@esn.ac.lk.

Информация об авторах

Бекмагамбетов А.Б. - кандидат юридических наук, ассоциированный профессор, заместитель генерального директора по научной работе «Республиканского научно-исследовательского института охраны труда Министерства труда и социальной защиты населения Республики Казахстан», e-mail: adilet1979@mail.ru;

Рахметова А.М. - кандидат медицинских наук, доцент, руководитель Центра научных исследований, Астана, Казахстан, e-mail: ra_anar@mail.ru;

Кульмагамбетова Э.А. - кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Центра научных исследований, Астана, Казахстан, e-mail: tabi.ecos200208@gmail.com;;

Алшынбекова Г.К. - кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Центра научных исследований, Астана, Казахстан, e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com;

Сарыбаева И.Е. - магистр экономических наук, заместитель руководителя Центра научных исследований, Астана, Казахстан, e-mail: inarasaribaeva@gmail.com;

Токатова Р.А. - магистр социальной работы, старший научный сотрудник Центра научных исследований, Астана, Казахстан, e-mail: tokatovarabiga897@gmail.com;

Мохамед Рифки А.Л. доктор Ph.D. в области технологий и биотехнологии сельского хозяйства и переработки, хранения и переработки пищевых продуктов, старший преподаватель II категории в области биосистемных технологий, Восточный университет, Ченкалади, Шри-Ланка, e-mail: rifkyalm@esn.ac.lk.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-9

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГЛЕЙ

А.С. Кусенова[1], А.К. Салькеева[1], Н.У. Нургалиев[2]✉, Г.М. Нургазина[3]✉

[1] Карагандинский технический университет им. А.Сагинова, Караганда, Казахстан
[2] Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан
[3] Международный университет Астана, Астана, Казахстан
✉ Корреспондент-автор: nurgaliev_nao@mail.ru, ast.gulnar@mail.ru

Received: 19 July 2026
Accepted: 04 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: N.U. Nurgaliyev, et al. « КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГЛЕЙ ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-9
License CC BY 4.0

В статье исследованы кинетические закономерности термической деструкции органической массы углей Казахстана методом термогравиметрического анализа. Эксперименты проводили при различных температурах и скоростях нагрева образцов. Кинетические параметры рассчитывали по уравнениям неизотермической формальной кинетики первого порядка с использованием зависимости Аррениуса, что позволило определить энергию активации, предэкспоненциальный множитель и константы скорости для отдельных стадий термического разложения. Установлено, что процесс термодеструкции исследованных углей имеет выраженный многостадийный характер и включает три последовательные стадии, соответствующие удалению влаги и слабосвязанных функциональных групп, интенсивному разложению органической массы и термораспаду наиболее термостабильных структур с образованием полукокса. Повышение скорости нагрева приводит к систематическому смещению температур максимальной скорости разложения (T_{max}) в область более высоких температур, увеличению максимальной скорости термодеструкции (v_{max}) и снижению энергии активации, отражая интенсификацию процесса термической деструкции угля. При этом энергия активации возрастает при переходе к последующей стадии разложения, что свидетельствует о последовательном вовлечении в процесс структурных фрагментов органической массы, характеризующихся различной прочностью химических связей. Для исследованных углей получены линейные зависимости между скоростью нагрева и величинами T_{max} и v_{max}, с высокой степенью аппроксимации. Полученные результаты позволяет использовать установленные закономерности при математическом моделировании процессов термического разложения угля.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ, уголь, термическое разложение, скорость нагрева, кинетические параметры, стадии разложения.

КӨМІРДІҢ ТЕРМИЯЛЫҚ ЫДЫРАУ ПРОЦЕСІНІҢ КИНЕТИКАСЫ

А.С. Кусенова[1], А.К. Салькеева[1], Н.У. Нургалиев[2]✉, Г.М. Нұрғазина[3]✉

[1] Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан
[2] Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан
[3] Астана Халықаралық Университеті, Астана, Казахстан
✉ e-mail:nurgaliev_nao@mail.ru, ast.gulnar@mail.ru

Мақалада термогравиметриялық талдау әдісімен Қазақстан көмірінің органикалық массасының термиялық жойылуының кинетикалық заңдылықтары зерттелді. Тәжірибелер әртүрлі температурада және үлгілерді қыздыру жылдамдығында жүргізілді. Кинетикалық параметрлер Аррениус тәуелділігін қолдана отырып, Бірінші ретті изотермиялық емес формальды кинетика теңдеулері бойынша есептелді, бұл активтендіру энергиясын, экспоненциалды факторды және термиялық ыдыраудың жеке кезеңдері үшін жылдамдық

тұрақтыларын анықтауға мүмкіндік берді. Зерттелген көмірдің термодеструкция процесі айқын көп сатылы сипатқа ие және ылғал мен әлсіз байланысқан функционалдық топтарды жоюға, органикалық массаның қарқынды ыдырауына және жартылай кокс түзу үшін ең термостабильді құрылымдардың термиялық ыдырауына сәйкес келетін үш дәйекті кезеңді қамтитыны анықталды. Қыздыру жылдамдығының жоғарылауы температураның максималды ыдырау жылдамдығының (T_{max}) жоғары температура аймағына жүйелі ығысуына, термодеструкцияның максималды жылдамдығының (v_{max}) жоғарылауына және көмірдің термиялық ыдырау процесінің қарқындылығын көрсететін активтендіру энергиясының төмендеуіне әкеледі. Бұл жағдайда активтендіру энергиясы келесі ыдырау кезеңіне өткенде артады, бұл процеске Химиялық байланыстардың әр түрлі беріктігімен сипатталатын органикалық массаның құрылымдық фрагменттерінің дәйекті қатысуын көрсетеді. Зерттелген көмірлер үшін қыздыру жылдамдығы мен жоғары аппроксимация дәрежесі бар T_{max} және v_{max} шамалары арасындағы сызықтық тәуелділіктер алынады. Алынған нәтижелер көмірдің термиялық ыдырау процестерін математикалық модельдеу кезінде белгіленген заңдылықтарды қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: термогравиметриялық талдау, көмір, термиялық ыдырау, қыздыру жылдамдығы, кинетикалық параметрлер, ыдырау кезеңдері.

KINETICS OF THE PROCESS OF THERMAL DECOMPOSITION OF COALS

A.S. Kussenova[1], A.K. Salkeyeva[1], N.U. Nurgaliyev[2]✉, G.M. Nurgazina[3,1]✉

[1] *A.Saginov Karaganda technical University, Karaganda, Kazakhstan*
[2] *K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan*
[3] *Astana International University, Astana, Kazakhstan*
✉ *e-mail:nurgaliev_nao@mail.ru, ast.gulnar@mail.ru*

This study elucidates the kinetic behavior of the thermal decomposition of the organic matter of Kazakhstan coals using thermogravimetric analysis. Experiments are performed at different temperatures and heating rates. The kinetic parameters were determined using first-order non-isothermal kinetic equations based on the Arrhenius relationship, allowing the activation energy, pre-exponential factor, and rate constants to be calculated for the individual stages of thermal decomposition. The results demonstrate that the thermal decomposition of the investigated coals is a distinctly multistage process comprising three consecutive stages corresponding to the removal of moisture and weakly bound functional groups, the intensive decomposition of the organic matter, and the degradation of the most thermally stable structures accompanied by semicoke formation. Increasing the heating rate systematically shifts the temperature of the maximum decomposition rate (T_{max}) to higher values, increases the maximum decomposition rate (v_{max}), and decreases the activation energy, indicating an intensification of the thermal decomposition process. Furthermore, the activation energy increases progressively from one decomposition stage to the next, reflecting the sequential involvement of structural fragments of the organic matter with different chemical bond strengths. Linear relationships were established between the heating rate and the values of T_{max} and v_{max} for all investigated coals, with a high degree of approximation. The established kinetic relationships provide a basis for the mathematical modeling of coal thermal decomposition processes.

Keywords: thermogravimetric analysis, coal, thermal decomposition, heating rate, kinetic parameters, decomposition stages.

Введение. Методы термического анализа позволяют получить ценную информацию о термическом поведении различных материалов.

К таким характеристикам относятся их температурная стабильность, процессы термической деструкции, фазовые превращения, а также взаимодействие с различными газами или анализируемыми веществами. При этом, одним из эффективных методов исследования термохимических превращений твёрдых отходов и ископаемого топлива является термогравиметрический анализ (ТГА), а кривые ТГА характеризуют изменение массы образца в зависимости от времени или температуры в процессе нагрева. Термогравиметрический анализ широко применяется для определения кинетических триплетов процессов термического разложения [1], таких как шламы нефтепереработки [2], осадки сточных вод [3], лигнит [4], уголь [5] и др.

К основным преимуществам ТГА относятся простота проведения эксперимента и высокая воспроизводимость результатов. Для определения кинетических параметров процессов, протекающих при

пиролизе угля, необходимо понимать и прогнозировать физико-химические изменения, происходящие в ходе термического разложения [6]. ТГА и связанные с ним методы широко применяются для определения характера потери массы, стадий реакции и термической реактивности. На основе этих анализов были разработаны различные кинетические методы для оценки кажущейся энергии активации и характеристик реакции материалов.

В литературе представлены различные методы определения кинетических параметров неизотермических процессов [7], которые подразделяются на модельно-зависимые (model-fitting) и модельно-независимые (model-free) или изоконверсионные методы [8, 9].

Использование модельно-зависимого подхода позволяет одновременно определить кинетический триплет, включающий кажущуюся энергию активации, предэкспоненциальный множитель и функцию механизма реакции. Эти кинетические параметры угля рассчитывают по данным термогравиметрических кривых, при этом полученная кажущаяся энергия активации представляет собой среднее значение для соответствующей стадии реакции, что существенно упрощает кинетический анализ [10, 11].

Модельно-независимый метод расчета кинетических параметров органических веществ основан на приближении, который требует построения кинетических кривых при различных скоростях нагрева. Несомненным преимуществом модельно-независимого метода является возможность определения кинетических параметров для каждого значения степени превращения α при термической деструкции вещества.

В связи с этим, проведение термогравиметрического анализа для нескольких скоростей нагрева при исследовании кинетики пиролиза твердофазных систем является одним из наиболее распространенных подходов. Использование данных, полученных при одинаковой степени превращения по термогравиметрическим кривым, зарегистрированным при различных скоростях нагрева, позволяет определить достаточно достоверное значение энергии активации без предварительного выбора кинетической модели [12].

Целью исследования является установление закономерностей термической деструкции органической массы углей (ОМУ) различных месторождений Казахстана на основе определения кинетических параметров процесса, оценки влияния скорости и температуры нагрева, стадии разложения на кинетику пиролиза, а также выявление наиболее перспективных углей для их последующей термохимической переработки.

Материалы и методы. В данном исследовании термогравиметрический анализ процесса термической деструкции органической массы углеводородного сырья проводили при различных условиях. В качестве образцов использовали угли месторождений «Шоптыколь» Майкубенского бассейна (далее - Майкубенский уголь), «Шубарколь» (далее - Шубаркольский уголь), «Сарыадыр» (пласт «Пятиметровый») (далее - Сарыадырский уголь).

Метод термогравиметрического анализа позволяет определить потерю массы образца угольного вещества как функцию температуры при постоянной скорости нагрева и тем самым установить значения параметров процесса термической деструкции. К основным кинетическим параметрам относятся константа скорости реакции, энергия активации и предэкспоненциальный множитель, характеризующие соответственно скорость реакции, энергетический барьер и частотный фактор, определяющий интенсивность термических превращений.

Для изучения поведения образцов во время термодеструкции проводили термический анализ TG-DTG/DSC с использованием термогравиметрического анализатора LABSYS^{TM}Evo TG-DTG/DSC (SETARAM, Франция), позволяющий проводить синхронный термический анализ. Термический анализ проводили с образцами массой 5 мг, в интервале температур 30-1000°C при скоростях нагрева 3-15°C/мин. В качестве газа-носителя использовали азот для обеспечения инертной атмосферы, а для Шубарскольского угля дополнительно проводили опыты в атмосфере кислорода для сравнительной оценки термического поведения образцов. Для характеристики процесса термической деструкции ОМУ выбраны следующие показатели: потери масс образцов в различных температурных интервалах; температура T_{max}, скорость v_{max}, константа скорости k_{max}, соответствующие наибольшей скорости потери массы, т.е. максимумам основного разложения на кривых DTG в точках перегиба; предэкспоненциальный множитель k_0 и энергия активации $E_{акт}$, относящиеся к стадиям основного термического разложения угля.

Методы расчета основываются на схеме деструкции:

А (исходный уголь) → Б (летучий компонент) + В (твердый остаток)

Наличие различных конкурирующих последовательно-параллельных процессов при термохимических превращениях углей (по молекулярному и радикально-цепному механизму) часто приводит к колебаниям суммарного порядка реакции в пределах 0,5-1,5. Описать весь процесс разложения угля одним уравнением 1-го порядка (мономолекулярного превращения) нельзя, поскольку в реальных условиях распад ОМУ происходит при взаимном влиянии веществ различной природы составляющих ОМУ. Но процесс основного термического разложения можно описать уравнением формальной кинетики 1-го порядка и рассчитать $E_{акт}$. В связи с этим, в силу многообразия и сложности физико-химических превращений данные кинетические параметры описывают не определенные реакции, а суммарные процессы термического термического разложения ОМУ, поэтому они рассматриваются как «эффективные параметры» формальной кинетики [13].

Математическую обработку термогравиметрических кривых проводили по следующему алгоритму. Кинетические параметры основного термического разложения ОМУ определяли на основе уравнений неизотермической формальной кинетики [14]. В качестве исходного уравнения использовали закон Аррениуса, описывающий зависимость константы скорости реакции (k) от температуры:

$$k = k_0 e^{-\frac{\searrow}{R}T} \quad (1)$$

где k – предэкспоненциальный множитель; E - энергия активации; T - абсолютная температура.

Уравнение (1) можно представить в дифференциальной форме:

$$v = \frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha) k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

где v - скорость процесса, α - степень превращения ОМУ, f (α) - функция степени превращения.

Степень превращения α находим как:

$$\alpha = \frac{\Delta m_i}{\Delta m}$$

Согласно экспериментальным данным [15], процессы основного термического разложения угля протекают по первому порядку, поэтому функция f (α) = 1 - α. Тогда при помощи логарифмирования уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\ln\left[\frac{1}{1-\alpha}\cdot\frac{d\alpha}{d\tau}\right] = \ln k_o - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой линейное уравнение y=b+a·x, в котором:

$$y = \ln\left[\frac{1}{1-\alpha}\cdot\frac{d\alpha}{d\tau}\right], b = \ln k_0, a = -E, x = \frac{1}{R}T \quad (4)$$

Это позволяет уложить экспериментальные точки на прямую, по тангенсу угла наклона которой к оси абсцисс можно вычислить энергию активации процесса, а по отрезку, отсекаемому по оси ординат - предэкспоненту.

Для получения надежных результатов экспериментальные данные рассчитывали по методу наименьших квадратов, согласно которому коэффициенты a и b равны:

$$a = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}, \qquad b = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (5)$$

Среднеквадратичные ошибки определения a и b (а значит и энергии активации и предэкспоненты) определяли как:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b)^2}{(n-2)\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_{\text{ср}}\right)^2}}$$

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b)^2 - x_i}{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x_{\text{ср}}^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_{\text{ср}}\right)^2}}$$

Исходя из (5) определяли энергию активации и предэкспоненциальный множитель:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\cdot\frac{d\alpha}{d\tau}\right)\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R}T - n\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\cdot\frac{d\alpha}{d\tau}\right)\cdot\frac{1}{R}T}{n\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{R}T\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R}T\right)^2}$$

$$k_0 = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\cdot\frac{d\alpha}{d\tau}\right) - a\sum_{i=1}^{n}\ln\frac{1}{R}T}{n}\right]$$

Результаты и обсуждение. При анализе термогравиметрических кривых выявлены три стадии основного разложения ОМУ на дифференциальных кривых DTG и DTA, где наблюдаются пики с максимумами скорости потери массы (точки перегиба).

На первой стадии фиксируется эндотермический эффект на кривой DTA с максимумом при температурах T_{max} в интервалах 146-238 °C (для Майкубенского угля), 131-230 °C (для Шубаркольского угля) и 134-226 °C (для Сарыадырского угля). Данный факт связан с испарением воды, выделением кислородсодержащих газов за счет разложения боковых групп макромолекул, (т.к. углерод-кислородные связи наименее стабильны в термическом отношении). На данной стадии происходят преимущественно разрыв связей между основными структурными звеньями, отщепление и частичный распад боковых цепей, частично удаляются O_2, N, S. Выход летучих веществ в этой области температур невелик. Во 2-й стадии наблюдается экзотермический пик с максимумом при 364-460 °C (для Майкубенского угля), 342-439 °C (для Шубаркольского угля) и 357-453 °C (для Сарыадырского угля). Данный пик отвечает за возрастание интенсивности группы реакций термосинтеза вследствие повышения реакционной способности веществ нагреваемой ОМУ. При этом могут происходить реакции распада оксиароматических и гетероциклических фрагментов, а также термохимические превращения гуминовых веществ и синтез на их основе новых более термоустойчивых соединений, увеличение числа непредельных связей, скорость образования летучих веществ при этом увеличивается. На третьей стадии наблюдается эндотермический пик с максимумом при 471-567 °C (для Майкубенского угля), 461-559 °C (для Шубаркольского угля) и 462-553 °C (для Сарыадырского угля). На данной стадии развиваются реакции термораспада наиболее термостабильных органоминеральных комплексов, к концу данной стадии наблюдается выделение основной массы смолы и газообразных углеводородов, процесс завершается с образованием полукокса. При дальнейшем повышении температуры реакции ароматизации и полициклизации интенсифицируются (с отщеплением газообразных продуктов, преимущественно H_2, и в меньшем количестве – CH_4, CO, N_2), происходит формирование более высокомолекулярных полициклических систем сетчатого строения. При скоростях нагрева β от 6 до 15 град/мин (кроме скорости 3 град/мин) на 3-й стадии основного разложения ОМУ пики с максимумом скорости потери массы слабо выражены, что сопряжено с наложением нескольких процессов и невозможностью их раздельной оценки для проведения расчета кинетических параметров. Незначительный пик при более медленной скорости нагрева 3 град/мин позволил рассчитать следующие кинетические параметры: $E_{акт}$ = 166 (±5,7) кДж/моль, $k_0 = 1{,}01 \cdot 10^9$ ($\pm 2{,}1 \cdot 10^7$) $с^{-1}$, $k_{max} = 1{,}41 \cdot 10^{-3}$ $с^{-1}$ (для Майкубенского угля); $E_{акт}$ = 126 (±4,9) кДж/моль, $k_0 = 1{,}24 \cdot 10^9$ ($\pm 3{,}6 \cdot 10^7$) $с^{-1}$, $k_{max} = 1{,}68 \cdot 10^{-3}$ $с^{-1}$ (для Шубаркольского угля); $E_{акт}$ = 147 (±5,1) кДж/моль, $k_0 = 1{,}13 \cdot 10^9$ ($\pm 3{,}6 \cdot 10^7$) $с^{-1}$, $k_{max} = 1{,}27 \cdot 10^{-3}$ $с^{-1}$ (для Сарыадырского угля).

Результаты обработки термогравиметрических кривых и расчета по вышеописанной методике представлены в таблицах 1-8 и рисунках 1-5. Для Шубаркольского угля эксперименты проводили в средах азота и кислорода (для сравнения), а для остальных углей − в среде азота.

Анализ полученных данных показывает, что для всех образцов в температурных интервалах 30-300 °C и 600-900 °C потери массы ОМУ почти одинаковы. Однако, в интервале температур 300-600 °C, где наблюдается второй и третий максимумы, наблюдаются более высокие потери массы ОМУ. По видимому, это связано с выделением основной массы паров смолы и газообразных углеводородов с одновременным образованием паров так называемой пирогенетической воды.

Таблица 1 - Потери масс образцов Майкубенского угля в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения в среде азота

Скорость нагрева, °C /мин	Потеря массы от навески, %				T_{max}, °C		
	30- 300°C	300-600°C	600-900°C	30-900°C	Стадии разложения		
					1;	2;	3;
3	12,15	24,78	11,97	48,90	146	364	471
6	11,72	25,66	10,04	47,42	181	403	508
9	12,84	26,36	10,18	49,38	205	429	533

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %				T_{max}, °С		
	30- 300°С	300-600°С	600-900°С	30-900°С	Стадии разложения		
					1;	2;	3;
12	11,34	26,03	10,75	48,12	223	448	552
15	11,09	24,53	10,64	46,26	238	460	567

Таблица 2 - Кинетические параметры термодеструкции Майкубенского угля в среде азота

Скорость нагрева, °С/мин	Стадии основного разложения					
	1 стадия			2 стадия		
	k_{max}, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^2 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль	k_{max}, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^4 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль
3	1,33	2,82±0,11	42,0±0,8	1,12	1,77±0,05	92,0±3,4
6	1,81	8,53±0,72	49,3±2,2	1,16	2,81±0,14	90,8±2,7
9	1,23	1,61±0,12	39,1±2,7	1,21	0,52±0,03	85,6±3,3
12	1,74	2,61±0,14	44,0±2,3	1,43	0,28±0,07	80,3±3,9
15	1,46	1,35±0,12	38,3±1,7	1,40	0,12±0,01	81,0±5,6

Таблица 3 - Потери масс образцов Шубаркольского угля в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения в среде азота

Скорость нагрева, °С/мин	Потеря массы от навески, %				T_{max}, ^{0} С		
	30-300°С	300-600°С	600-900°С	30-900°С	Стадии разложения		
					1;	2;	3;
3	13,08	25,67	12,12	50,87	131	342	461
6	12,49	24,89	10,42	47,80	185	389	498
9	12,04	24,78	10,15	46,97	211	407	523
12	11,85	24,49	9,52	45,86	218	426	542
15	11,03	23,37	9,50	43,90	230	439	559

Таблица 4 - Кинетические параметры термодеструкции Шубаркольского угля в среде азота

Скорость нагрева, °С /мин	Стадии основного разложения					
	1 стадия			2 стадия		
	k_{max}, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^2 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль	k_{max}, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^4 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль
3	1,38	2,82±0,11	47,0±0,9	1,23	1,68±0,08	96,0±3,9
6	1,85	7,83±0,72	45,1±2,5	1,34	2,31±0,12	92,4±3,2
9	1,49	2,13±0,12	41,3±2,3	1,43	1,71±0,04	87,7±4,6
12	1,87	2,84±0,14	43,0±2,8	1,57	0,59±0,06	84,5±3,2
15	1,63	1,58±0,12	38,7±1,9	1,49	0,42±0,02	80,1±4,2

Таблица 5 - Потери масс образцов Шубаркольского угля в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения в среде кислорода

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %				T_{max}, °С		
	30-300°С	300-600°С	600-900°С	30-900°С	Стадии разложения		
					1;	2;	3;
3	11,80	28,43	16,73	*56,96*	158	375	479
6	11,25	26,76	14,28	*52,29*	175	412	526
9	10,87	25,32	12,29	*48,48*	190	436	556
12	9,92	24,72	11,83	*46,47*	210	463	571
15	9,18	24,14	11,21	*44,53*	227	509	618

Таблица 6 - Кинетические параметры термодеструкции Шубаркольского угля в среде кислорода

Скорость нагрева, °С /мин	Стадии разложения					
	1 стадия			2 стадия		
	$k_{пер}$, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^2 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль	$k_{пер}$, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^4 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль
3	1,88	3,12	56,77	2,82	2,13	77,6
6	1,10	5,48	45,48	3,02	1,83	83,1
9	1,31	2,79	44,83	2,17	0,694	72,9
12	2,85	1,05	41,17	1,24	1,25	62,4
15	1,46	1,01	38,37	2,69	1,97	63,4

Таблица 7 - Потери масс образцов Сарыадырского угля в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения в среде азота

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %				T_{max}, °С		
	30- 300°С	300-600°С	600-900°С	30-900°С	Стадии разложения		
					1;	2;	3;
3	12,03	24,12	11,43	47,88	134	357	462
6	11,23	25,75	10,24	47,42	178	394	501
9	12,18	25,47	10,56	49,38	201	416	522
12	11,21	26,86	11,37	48,12	218	438	540
15	11,78	24,94	10,15	46,26	226	453	553

Таблица 8 - Кинетические параметры термодеструкции Сарыадырского угля в среде азота

Скорость нагрева, °С /мин	Стадии основного разложения					
	1 стадия			2 стадия		
	k_{max}, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^2 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль	k_{max}, 10^{-3} $с^{-1}$	k_0, 10^4 $с^{-1}$	Еакт, кДж/моль
3	1,35	2,72±0,13	43,7±0,92	1,23	1,45±0,03	98,2±3,7
6	1,65	7,42±0,64	46,3±2,76	1,19	1,94±0,12	93,3±2,9
9	1,47	1,89±0,11	40,3±2,61	1,34	0,71±0,03	86,8±3,6

	Стадии основного разложения					
12	1,69	2,78±0,18	44,8±2,23	1,52	0,54±0,06	82,6±3,4
15	1,39	1,65±0,06	38,3±1,75	1,32	0,47±0,02	80,1±4,8

Увеличение размера угольных частиц d=0,2-5 мм приводит к небольшому повышению степени разложения ОМУ (6-8%) и не оказывает существенного влияния на кинетику исследуемого процесса. Вместе с тем, при переходе от одной стадии основного разложения к другой при повышении температуры при различных скоростях нагрева отмечается заметное увеличение энергии активации, что видно на примере скорости нагрева 3 град/мин для Майкубенского угля: $E_{акт1}$ = 42,0 кДж/моль → $E_{акт2}$ = 92,0 кДж/моль → $E_{акт3}$ = 166,0 кДж/моль. Разница между активационными барьерами 1-й и 2-й стадий в пределах одинаковых скоростей нагрева составляет 36-48 кДж/моль (таблица 2). При этом, вероятность разрыва определенных типов связей в процессе деструкции заметно возрастает, о чем свидетельствуют различия между предэкспоненциальными множителями 1-й и 2-й стадий (на 1-2 порядка, т.е. $k_{01} \sim 10^2$ с$^{-1}$, $k_{02} \sim 10^3$–10^4 с$^{-1}$).

Повышение скорости нагрева β от 3 до 15 град/мин на всех стадиях разложения ОМУ приводит к сдвигу значений температур T_{max} (соответствующих максимальному разложению) в сторону больших величин ($\Delta T_{max} \approx 100$ °C) и увеличению скорости v_{max} процесса деструкции ОМУ. При этом, аппроксимация точек прямой линией позволяет получить приблизительные зависимости между v_{max} и β, показанные на рисунке 2, с высокими значениями достоверности аппроксимации R^2 (более 0,98). Вместе с тем, разница между величинами скоростей в точках перегиба Δv_{max} на 1-й и 2-й стадиях также растет с повышением скорости нагрева β и взаимосвязь между Δv_{max} и β описывается аналогичной функцией, близкой к линейной (как v_{max} и β). В связи с этим, повышение скорости нагрева оказывает на скорость реализации процесса с более высоким активационным барьером $E_{акт2}$ более существенное влияние, способствуя при этом заметному снижению величин $E_{акт2}$ (например, для Майкубенского: 92,0-81,0 кДж/моль). Однако это не оказывает заметного влияния на общую степень разложения угля, что по всей видимости, связано с компенсацией более высокой скорости меньшей длительностью процесса термолиза (и наоборот).

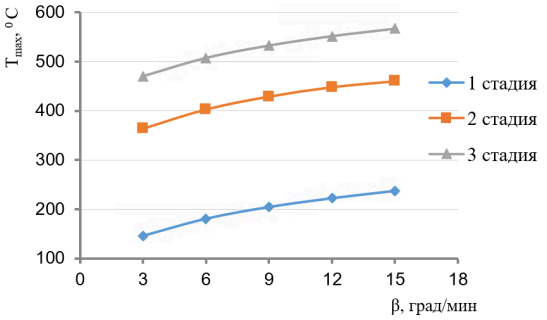


Рис. 1 - Зависимость температуры в точках перегиба от скорости нагрева Майкубенского угля на различных стадиях разложения

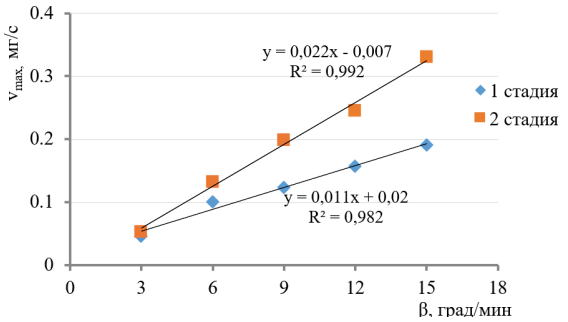


Рис. 2 – Зависимость скорости деструкции в точках перегиба от скорости нагрева Майкубенского угля на различных стадиях разложения

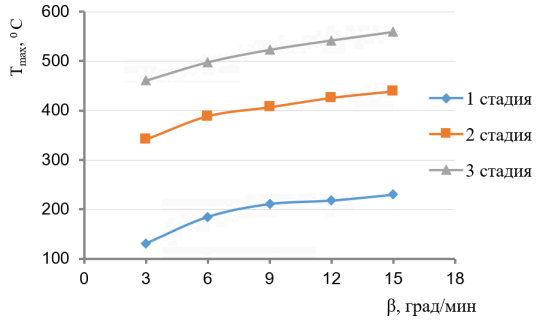


Рис. 3 - Зависимость температуры в точках перегиба от скорости нагрева Шубаркольского угля на различных стадиях разложения

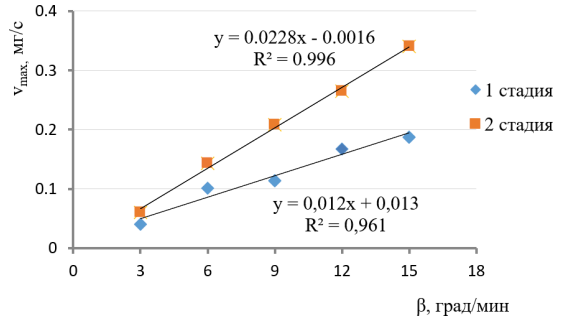


Рис. 4 - Зависимость скорости деструкции в точках перегиба от скорости нагрева Шубаркольского угля на различных стадиях разложения

Повышение скорости нагрева для Шубаркольского угля, как в среде азота, так и кислорода, приводит к некоторому снижению потери массы ОМУ – с 50,87-43,9 % и 56,96-44,53 % для азота и кислорода соответственно (рисунок 5). Отсюда видно, что на степень конверсии угля при термолизе существенно влияет время пребывания частиц угля. Вместе с тем, общие потери массы ОМУ в среде кислорода превышают аналогичные в среде азота, что объясняется окислительным действием первого. Данное различие более заметно особенно при низких скоростях нагрева 3 и 6 °С.

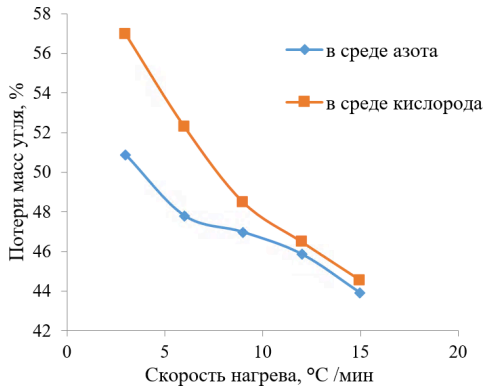


Рис. 5 - Значения потери масс образцов Шубаркольского угля при скоростях нагрева 6-15 °С/мин в средах азота и кислорода

,

Выводы. Исследовано влияние температуры и скорости нагрева углей различных месторождений на кинетические параметры процесса термической деструкции ОМУ. Установлено, что увеличение размера угольных частиц приводит лишь к незначительному повышению степени термического разложения органической массы угля и практически не оказывает влияния на кинетику процесса. Показано, что повышение скорости нагрева приводит к увеличению температуры максимальной скорости разложения (T_{max}) и максимальной скорости термической деструкции (v_{max}), а также к снижению энергии активации на стадиях основного разложения угля. Установлено, что энергия активации возрастает при переходе от первой к последующим стадиям термической деструкции, что свидетельствует о многостадийном характере пиролиза углей. Это указывает на последовательное вовлечение в процесс термического разложения структурных фрагментов органической массы угля с различной прочностью химических связей, что согласуется с современными представлениями о механизме пиролиза углей. Выявлено, что зависимости максимальной скорости термической деструкции от скорости нагрева образцов описываются линейными функциями с высокой степенью аппроксимации. При этом повышение скорости нагрева способствует интенсификации процесса термической деструкции органической массы угля за счет увеличения скорости разложения и сокращения продолжительности процесса.

Таким образом, полученные результаты расширяют представления о кинетических особенностях термической деструкции углей различной степени метаморфизма. Установленные кинетические закономерности могут быть использованы при математическом моделировании термохимических процессов, таких как пиролиз и газификация угля, а также при выборе и обосновании рациональных режимов их термохимической переработки угольного сырья.

Литература

1. Barneto A.G., Moltó J., Ariza J., Conesa J.A. Thermogravimetric monitoring of oil refinery sludge // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.-2014.- Vol.105.- P. 8-13. DOI 10.1016/j.jaap.2013.09.007.
2. Herrington P.R., Ball G.F.A., Patrick J.E. Determination of the relative oxidative stability of petroleum bitumens by thermogravimetry \// Thermochimica Acta.-1992. - Vol.202. - P. 201-213. DOI 10.1016/0040-6031(92)85164-Q.
3. Soria-Verdugo A., Goos E., Morato-Godino A., García-Hernando N., Riedel U. Pyrolysis of biofuels of the future: sewage sludge and microalgae - thermogravimetric analysis and modelling of the pyrolysis under different temperature conditions // Energy Conversion and Management.- 2017. - Vol. 138. - P. 261-272. DOI 10.1016/j.enconman.2017.01.059.
4. Chen J.B., Mu L., Cai J., Yin H. Thermal characteristics and kinetics of refining and chemicals wastewater, lignite and their blends during combustion // Energy Conversion and Management.-2015. - Vol.100. - P. 201-211. DOI 10.1016/j.enconman.2015.05.016.
5. Morin M., et al. Kinetic study and modelling of char combustion in TGA in isothermal conditions // Fuel.-2017. - Vol. 203. - P. 522-536. DOI 10.1016/j.fuel.2017.04.134.

6. Casal M.D., Vega M.F., Diaz-Faes E., Barriocanal C. The influence of chemical structure on the kinetics of coal pyrolysis // International Journal of Coal Geology.-2018. - Vol.195. - P. 415-422. DOI 10.1016/j.coal.2018.06.014.
7. Tyanakh S., Baikenov M.I., Gulmaliev A.M., Ma F.-Y., Musina G., Khamitova T.O., Bolatbay A.N. Kinetics of thermolysis of a low-temperature tar in the presence of a catalyzer agent with deposited metals // Bulletin of the University of Karaganda - Chemistry.- 2022. - Vol.108(4). - P. 89-98. DOI 10.31489/2022Ch4/4-22-19.
8. Azam M., Ashraf A., Setoodeh Jahromy S., Raza W., Khalid H., Raza N., Winter F. Isoconversional nonisothermal kinetic analysis of municipal solid waste, refuse-derived fuel, and coal // Energy Science & Engineering.-2020.-Vol.8(10).- P.3377-3768. DOI 10.1002/ese3.778.
9. Hu L., Wei X.-Y., Guo X.-H., Lv H.-P., Wang G.-H. Investigation on the kinetic behavior, thermodynamic and volatile products analysis of chili straw waste pyrolysis // Journal of Environmental Chemical Engineering.-2021.-Vol.9(5):105859. DOI 10.1016/j.jece.2021.105859.
10. Aboyade A.O., Carrier M., Meyer E.L., Knoetze J.H., Görgens J.F. Model fitting kinetic analysis and characterisation of the devolatilization of coal blends with corn and sugarcane residues // Thermochimica Acta. - 2012.- Vol.530. - P. 95-106. DOI 10.1016/j.tca.2011.12.007.
11. Li B., Liu G., Gao W., Cong H.-Y., Bi M.-S., Ma L., Deng J., Shu C.-M. Study of combustion behaviour and kinetics modelling of Chinese Gongwusu coal gangue: model-fitting and model-free approaches // Fuel. 2020. • Vol.268:117284. DOI 10.1016/j.fuel.2020.117284.
12. Zhou R., Huang B., Ding Y., Li W., Mu J. Thermal decomposition mechanism and kinetics study of plastic waste chlorinated polyvinyl chloride // Polymers. −2019.-Vol. 11(12):2080. DOI 10.3390/polym11122080.
13. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. Теоретические основы химии угля. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. - 556 с. ISBN 5-7418-0243-5
14. Шевкопляс В.Н. Расчет основных кинетических параметров твердых топлив по данным дериватографического анализа // Вопр. химии и хим. технологии. - 2007. - № 2. - С. 179-183.
15. Popat Y.R., Sunavala P.D. Mathematical models for coal devolatization and temperature distribution in coke ovens// Indian Journal of Chemical Technology.- 1999. - V.6. – P.247-255.

References

1. Barneto A.G., Moltó J., Ariza J., Conesa J.A. Thermogravimetric monitoring of oil refinery sludge // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. −2014.- Vol.105.- P. 8-13. DOI 10.1016/j.jaap.2013.09.007.
2. Herrington P.R., Ball G.F.A., Patrick J.E. Determination of the relative oxidative stability of petroleum bitumens by thermogravimetry \// Thermochimica Acta. −1992. - Vol.202. - P. 201-213. DOI 10.1016/0040-6031(92)85164-Q.
3. Soria-Verdugo A., Goos E., Morato-Godino A., García-Hernando N., Riedel U. Pyrolysis of biofuels of the future: sewage sludge and microalgae - thermogravimetric analysis and modelling of the pyrolysis under different temperature conditions // Energy Conversion and Management. - 2017. - Vol. 138. - P. 261-272. DOI 10.1016/j.enconman.2017.01.059.
4. Chen J.B., Mu L., Cai J., Yin H. Thermal characteristics and kinetics of refining and chemicals wastewater, lignite and their blends during combustion // Energy Conversion and Management. −2015. - Vol.100. - P. 201-211. DOI 10.1016/j.enconman.2015.05.016.
5. Morin M., et al. Kinetic study and modelling of char combustion in TGA in isothermal conditions // Fuel. - 2017. - Vol. 203. - P. 522-536. DOI 10.1016/j.fuel.2017.04.134.
6. Casal M.D., Vega M.F., Diaz-Faes E., Barriocanal C. The influence of chemical structure on the kinetics of coal pyrolysis // International Journal of Coal Geology.-2018. - Vol.195. - P. 415-422. DOI 10.1016/j.coal.2018.06.014.
7. Tyanakh S., Baikenov M.I., Gulmaliev A.M., Ma F.-Y., Musina G., Khamitova T.O., Bolatbay A.N. Kinetics of thermolysis of a low-temperature tar in the presence of a catalyzer agent with deposited metals // Bulletin of the University of Karaganda - Chemistry. - 2022. Vol.108(4). - P. 89-98. DOI 10.31489/2022Ch4/4-22-19.
8. Azam M., Ashraf A., Setoodeh Jahromy S., Raza W., Khalid H., Raza N., Winter F. Isoconversional nonisothermal kinetic analysis of municipal solid waste, refuse-derived fuel, and coal // Energy Science & Engineering. −2020.-Vol.8(10). - P.3377-3768. DOI 10.1002/ese3.778.

9. Hu L., Wei X.-Y., Guo X.-H., Lv H.-P., Wang G.-H. Investigation on the kinetic behavior, thermodynamic and volatile products analysis of chili straw waste pyrolysis // Journal of Environmental Chemical Engineering. −2021.-Vol.9(5):105859. DOI 10.1016/j.jece.2021.105859.
10. Aboyade A.O., Carrier M., Meyer E.L., Knoetze J.H., Görgens J.F. Model fitting kinetic analysis and characterisation of the devolatilization of coal blends with corn and sugarcane residues // Thermochimica Acta. - 2012.- Vol.530. - P. 95-106. DOI 10.1016/j.tca.2011.12.007.
11. Li B., Liu G., Gao W., Cong H.-Y., Bi M.-S., Ma L., Deng J., Shu C.-M. Study of combustion behaviour and kinetics modelling of Chinese Gongwusu coal gangue: model-fitting and model-free approaches // Fuel. 2020. • Vol.268:117284. DOI 10.1016/j.fuel.2020.117284.
12. Zhou R., Huang B., Ding Y., Li W., Mu J. Thermal decomposition mechanism and kinetics study of plastic waste chlorinated polyvinyl chloride // Polymers. −2019.-Vol. 11(12):2080. DOI 10.3390/polym11122080.
13. Gjul'maliev A.M., Golovin G.S., Gladun T.G. Teoreticheskie osnovy himii uglja. - M.: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2003. - 556 s. ISBN 5-7418-0243-5. [in Russian]
14. Shevkopljas V.N. Raschet osnovnyh kineticheskih parametrov tverdyh topliv po dannym derivatograficheskogo analiza // Vopr. himii i him. tehnologii. - 2007.- № 2. - S. 179-183.[in Russian]
15. Popat Y.R., Sunavala P.D. Mathematical models for coal devolatization and temperature distribution in coke ovens// Indian Journal of Chemical Technology.- 1999. - V.6. – P.247-255.

Информация об авторах

Кусенова А.С. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Карагандинский технический университет им. А.Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: kussenovaassiya@gmail.com;

Салькеева А.К.- кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Карагандинский технический университет им. А.Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: salkeeva58@mail.ru;

Нургалиев Н.У.- кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru;

Нургазина Г.М.- доктор PhD, и.о. асс.профессора,Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: ast.gulnar@mail.ru.

Information about the authors

Kussenova A. S. - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, A.Saginov Karaganda technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: kussenovaassiya@gmail.com;

Salkeyeva A. K.- Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, A.Saginov Karaganda technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: salkeeva58@mail.ru;

Nurgaliyev N. U.- Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru;

Nurgazina G. M.- PhD, Acting Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: ast.gulnar@mail.ru.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ-СТАБИЛИЗАТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНА И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕГО

И. Леонтьева, **С. Масакбаева**, **Р. Несмеянова**✉, **М. Елубай**, **С. Ковтарева**, **О. Мукашев**

Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан
✉ *Корреспондент-автор: nesmeyanova.r@tou.edu.kz*

Received: 26 June 2026
Accepted: 15 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: R. Nesmeyanova, et al. « ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ-СТАБИЛИЗАТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНА И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕГО ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-1
License CC BY 4.0

В работе исследовано влияние различных УФ-стабилизаторов на физико-механические свойства полипропиленовых нитей, полотна и клапанно-коробчатых мешков, полученных методом экструзии с последующей ориентацией.

Рассмотрены механизмы фотоокислительной деградации полимеров и принципы действия светостабилизаторов на основе стерически затруднённых аминов (HALS) и УФ-абсорберов. В качестве объектов исследования использованы три промышленных светостабилизатора, введённые в полипропиленовую композицию.

Проведены испытания образцов до и после ускоренного УФ-старения (168 и 336 часов) с оценкой прочности, удлинения, линейной плотности и остаточной усадки. Установлено, что эффективность стабилизаторов существенно различается: наилучшую стойкость к фотодеструкции показал стабилизатор UV 5010 PE, тогда как POL PE 920052-UV обеспечил наибольшую технологическую стабильность переработки. Исследование влияния концентрации POL PE 920052-UV в диапазоне 1–2 % показало, что увеличение его содержания сопровождалось ростом линейной плотности и массы изделий, при этом относительное удлинение нити снижалось, а прочность сварного дна мешков уменьшалась.

В исследованном диапазоне концентраций наилучшее сочетание показателей получено при содержании стабилизатора POL PE 920052-UV 1 %.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и промышленном производстве полипропиленовой упаковочной продукции.

Ключевые слова: полипропилен, УФ-стабилизаторы, деградация полимеров, фотостарение, HALS-стабилизаторы, механические свойства, модификация.

ПОЛИПРОПИЛЕН ЖӘНЕ ОДАН ЖАСАЛҒАН БҰЙЫМДАРДЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ УФ-ТҰРАҚТАНДЫРҒЫШТАРДЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

И. Леонтьева, **С. Масакбаева**, **Р. Несмеянова**✉, **М. Елубай**, **С. Ковтарева**, **О. Мукашев**

Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан
✉ *e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz*

Бұл жұмыста экструзия әдісімен алынған және кейіннен бағдарланған полипропилен жіптері, матасы және клапанды-қорапты қаптардың физика-механикалық қасиеттеріне әртүрлі УФ-тұрақтандырғыштардың әсері зерттелді.

Полимерлердің фотооксидтік деградациясының механизмдері және стерикалық тұрғыдан тежелген аминдер (HALS) мен УФ-абсорберлер

негізіндегі жарық тұрақтандырғыштардың әрекет ету принциптері қарастырылды. Зерттеу нысаны ретінде полипропилен композициясына енгізілген үш өнеркәсіптік жарық тұрақтандырғыш қолданылды.

Үлгілердің қасиеттері жеделдетілген УФ-қартаюға дейін және одан кейін (168 және 336 сағат) беріктік, үзілу кезіндегі ұзару, сызықтық тығыздық және қалдық шөгу көрсеткіштері бойынша бағаланды. Зерттеу нәтижесінде тұрақтандырғыштардың тиімділігі айтарлықтай ерекшеленетіні анықталды: фотодеструкцияға ең жоғары төзімділікті UV 5010 PE тұрақтандырғышы көрсетті, ал POL PE 920052-UV қайта өңдеу процесінің ең жоғары технологиялық тұрақтылығын қамтамасыз етті. POL PE 920052-UV концентрациясының 1–2 % диапазонындағы әсерін зерттеу оның құрамын арттыру нитьтің сызықтық тығыздығы мен бұйымдар массасының өсуіне алып келетінін көрсетті, бұл ретте нитьтің салыстырмалы ұзаруы төмендеп, қаптардың дәнекерленген түбінің беріктігі азайды. Зерттелген концентрациялар диапазонында көрсеткіштердің ең қолайлы үйлесімі POL PE 920052-UV тұрақтандырғышының 1 % мөлшерінде алынды.

Алынған нәтижелер полипропиленді қаптама өнімдерін әзірлеуде және өнеркәсіптік өндірісте қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: полипропилен, УФ-тұрақтандырғыштар, полимерлердің деградациясы, фотоқартаю, HALS-тұрақтандырғыштар, механикалық қасиеттер, модификация.

STUDY OF THE EFFECT OF UV STABILIZERS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE AND ITS PRODUCTS

I. Leonteva, **S. Massakbayeva**, **R. Nesmeyanova**✉, **M. Yelubay**, **S. Kovtareva**, **O. Mukashev**

Torayghyrov University, Pavlodar, Kazakhstan
✉*e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz*

This work investigates the effect of various UV stabilizers on the physical and mechanical properties of polypropylene tapes, fabric, and valve-type box bags obtained by extrusion followed by orientation.

The mechanisms of photo-oxidative degradation of polymers and the principles of action of light stabilizers based on sterically hindered amines (HALS) and UV absorbers are considered. Three industrial light stabilizers introduced into polypropylene composition were used as the objects of study.

The samples were tested before and after accelerated UV aging (168 and 336 hours) with evaluation of strength, elongation, linear density, and residual shrinkage. It was established that the effectiveness of the stabilizers differs significantly: the UV 5010 PE stabilizer showed the best resistance to photodegradation, while POL PE 920052-UV provided the highest technological stability during processing. The study of the effect of POL PE 920052-UV concentration in the range of 1–2 % showed that an increase in its content was accompanied by an increase in the linear density of the tapes and the mass of the bags, while the relative elongation of the tape decreased and the strength of the bag bottom welds was reduced. Within the investigated concentration range, the best combination of the studied properties was obtained at a POL PE 920052-UV stabilizer content of 1 %.

The obtained results can be used in the development and industrial production of polypropylene packaging products.

Keywords: polypropylene, UV stabilizers, polymer degradation, photoaging, HALS stabilizers, mechanical properties, modification.

Введение. Полимерные материалы, а именно полипропилен (ПП) используются в различных областях промышленности благодаря сочетанию низкой плотности, высокой прочности, химической инертности [1]. Он обладает хорошими механическими характеристиками, устойчив к истиранию и разрыву и технологичен в переработке методом экструзии. Одним из важных направлений использования полипропилена является производство ориентированных нитей для производства стандартно-прошивных, клапанно-коробчатых мешков и мягких контейнеров, предназначенных для транспортировки и хранения сыпучих материалов [2].

Ультрафиолетовое (УФ) излучение оказывает вредное влияние на полимерные материалы, ис-

пользуемые в условиях наружного применения [3]. Пластмассы подвергаются фотостарению при воздействии солнечного света, высокой температуры и влажности в присутствии кислорода [4]. Деградация пластмассы в результате поглощения УФ-излучения приводит к появлению трещин, изменению цвета и потере механических свойств [5, 6].

Деградация пластика проходит в три этапа: инициирование, распространение (пропагация) и обрыв цепи (терминация) [7]. Первый этап инициируется под действием солнечного излучения и характеризуется образованием свободных радикалов, приводящих к разрыву связей C-H в основной цепи полимера [8]. Реакция алкильных радикалов с кислородом приводит к накоплению продуктов окисления и разрыву молекулярных цепей [9]. Разрыв цепи и сшивание кислородосодержащих соединений приводит к образованию ненасыщенных полимерных цепей, альдегидов и кетонов, как показано на рисунке 1 [10].

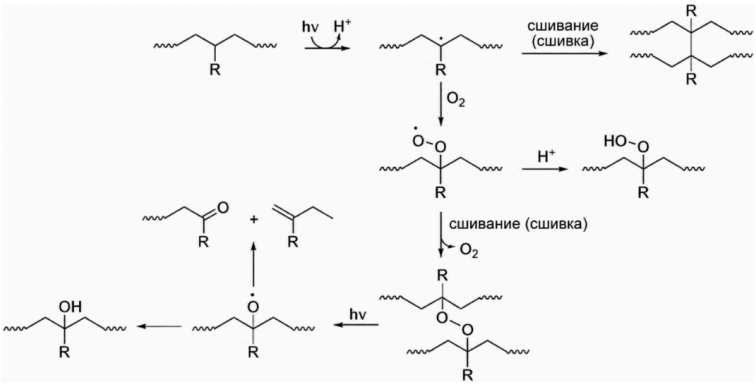


Рис. 1 - Пути абиотической деградации PE, PP и PS (адаптировано по [10])

УФ-стабилизаторы на основе стерически затрудненных аминов (HALS) относятся к числу наиболее эффективных модифицирующих добавок для полимерных материалов, в том числе и для ПП [11, 12]. Механизм действия HALS-стабилизаторов представлен на рисунке 2.

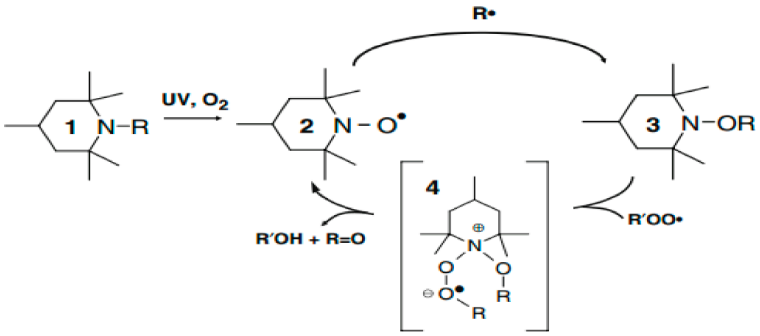


Рис. 2 - Цикл реакции HALS-стабилизаторов (адаптировано по [11])

Исходная аминная форма HALS (1) под действием УФ-излучения и кислорода превращается в нитроксильный радикал (2). Нитроксильный радикал захватывает свободный радикал полимера с образованием аминоэфирной функции (3). Далее эти промежуточные соединения подвергаются превращениям, в результате которых регенерируется активная нитроксильная форма HALS (4) [11].

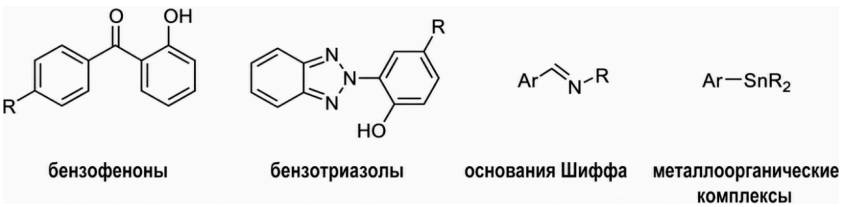


Рис. 3 - Структуры УФ-абсорберов (адаптировано по [10])

Еще одной разновидностью светостабилизаторов для полимеров являются УФ-абсорбенты. Они поглощают УФ-излучение в коротковолновой области за счет переноса протона и блокируют образование свободных радикалов ранней стадии [13]. Наиболее распространенными УФ-поглотителями являются оксид титана, бензофеноны и триазолы, основания Шиффа и металлорганические комплексы, представленные на рисунке 3 [14, 15].

Светостабилизаторы широко применяются в промышленности для обеспечения длительного срока службы полимерных изделий за счет предотвращения процессов фотоокисления и деградации [16]. Вместе с тем для полипропиленовых материалов и изделий из них, используемых в производстве ориентированных нитей, мешков, мягких контейнеров, сохраняется необходимость оценки эффективности УФ-стабилизаторов после воздействия УФ-излучения, поскольку снижение физико-механических характеристик может ограничивать срок службы готовых изделий.

Объектом исследования являются полипропилен, модифицированный УФ-стабилизаторами. Предметом исследования является изменение его физико-механических характеристик после УФ-старения. Целью работы является оценка влияния УФ-стабилизаторов на физико-механические показатели образцов полипропилена, моделирующих материал изделий из него после воздействия УФ-излучения. Для достижения цели были поставлены задачи: получить образцы полипропилена с УФ-стабилизаторами, провести испытания на УФ-старение, определить физико-механические показатели образцов до и после УФ-воздействия, сравнить эффективность применяемых стабилизирующих добавок. Гипотеза исследования заключается в том, что введение УФ-стабилизаторов способствует снижению фотоокислительной деградации при воздействии УФ-излучения и обеспечивает сохранение физико-механических свойств полипропилена и изделий из него. Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных результатов при разработке полипропиленовых материалов и изделий с повышенной устойчивостью к УФ-воздействию.

Материалы и методы. Исследование включало следующие этапы: подготовку полимерных композиций, получение ориентированных полипропиленовых нитей методом экструзии, изготовление рукавного полотна и клапанно-коробчатых мешков, проведение ускоренного УФ-старения, определение физико-механических показателей до и после старения и сравнительный анализ эффективности стабилизирующих добавок.

В качестве основного полимера использовали гомополимер полипропилена марки PP H030 производства ТОО «Компания Нефтехим LTD», обладающий показателем текучести расплава (ПТР) 12 г/10 мин при температуре 230 °C и нагрузке 2,16 кг, температурой плавления около 165 °C и плотностью 0,905 г/см³.

В качестве модификаторов использовались три промышленных светостабилизирующих продукта: POL PE 920052-UV, FMD 03.20/01-PP и UV 5010 PE.

Согласно информации производителей, содержание активной части в исследованных коммерческих продуктах составляло 20 %. POL PE 920052-UV представляет собой мастербатч, содержащий 20 % активного светостабилизирующего вещества, включающего УФ-абсорберы и HALS-стабилизаторы. Согласно информации производителей, содержание активной части в FMD 03.20/01-PP и UV 5010 PE также составляет 20 %. При этом химическая природа активных компонентов и состав полимерных носителей различаются. Все три продукты вводили в полипропиленовую композицию при одинаковой массовой концентрации 1 %, поэтому сравнительная оценка характеризует эффективность исследованных коммерческих композиций при одинаковой дозировке продукта. В качестве минерального наполнителя использовали осаждённый карбонат кальция $CaCO_3$, модифицированный стеариновой кислотой, с медианным размером частиц 2-3 мкм.

Композиции с различным содержанием компонентов (таблица 1) получали методом экструзии с использованием гравиметрической системы дозирования GraviTEC, обеспечивающей дозирование и предварительное смешение компонентов. Расплав перерабатывали на экструзионной линии StarEX 1500 ES с плоскощелевой головкой. Температурный режим от зоны шнека до плоскощелевой головки составлял 260−270 °C. Сформированное полотно охлаждали в водяной ванне при температуре 25−35 °C, после чего осуществляли его резку на ленточные нити. Полученные нити подвергали термическому вытягиванию и продольной ориентации в печи при температуре 190−195 °C. Скорость технологической линии составляла 300 м/мин. После ориентации нити стабилизировали на системе валов и наматывали на катушки. Из полученных нитей изготавливали рукавное полотно на круглоткацких станках Alpha 6 челночным методом. На заключительном этапе по-

липропиленовое полотно покрывалось ламинацией с использованием композиции из полипропилена с полиэтиленом, после чего из полученного материала изготавливали клапанно-коробчатые мешки на конверсионной машине STARLINGER ADStarKON.

Для оценки физико-механических характеристик образцов определяли прочность на разрыв и относительное удлинение при разрыве на универсальной разрывной машине Zwick/Roell BasicLine Z005, при скорости растяжения 250 мм/мин согласно ISO 2062-2014. Остаточную усадку нитей определяли в термоусадочной печи Testrite LTD MK 3 с автоматическим измерением деформации при температуре 130 °C в течение 2 минут.

Таблица 1 - Состав композиций

Образец	PP H030, %	$CaCO_3$, %	Вид УФ-стабилизатора	Содержание УФ-стабилизатора, %
Контрольный	95	5		0
Композиция 1	94	5	POL PE 920052-UV	1
Композиция 2	94	5	FMD 03.20/01-PP	1
Композиция 3	94	5	UV 5010 PE	1

Каждая серия образцов подвергалась ускоренному УФ-старению в климатической камере в течение 168 часов и 336 часов в соответствии с методикой ISO 4892-3. В качестве источника излучения использовали флуоресцентную УФ-лампу UVB-313 нм. Испытание проводили по циклическому режиму: 8 часов УФ-облучения при температуре 60 °C с последующей 4-х часовой конденсацией при температуре 50 °C. Поверхностная плотность излучения при длине волны 313 нм составляла 0,71 Вт/(м^2·нм).

Для оценки степени сохранения свойств анализировали изменение разрывной нагрузки, удлинения при разрыве и прочности нити до и после ускоренного старения, а также визуальное состояние полотна и стабильность технологического процесса при переработке. Данные по результатам УФ-старения представлены для единичных образцов каждого исследованного стабилизирующего варианта.

Для дальнейшего исследования влияния содержания, выбранного УФ-стабилизатора на свойства полипропиленовой нити были изготовлены композиции с различной массовой долей POL PE 920052-UV − 1 %, 1,5 % и 2 %. Целью данного этапа являлось определение изменений физико-механических характеристик нити при увеличении содержания стабилизатора в исследованном диапазоне концентраций. Контрольный вариант без введения POL PE 920052-UV в данной серии испытаний отдельно не изготавливался, поэтому результаты этого этапа рассматриваются как сравнительная оценка исследованных концентраций стабилизатора в диапазоне 1−2 %. Для каждой исследованной концентрации использовали по три образца полипропиленовой нити, результаты представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения. Определяли ширину и толщину нити, линейную плотность, прочность на разрыв, относительное удлинение и остаточную усадку.

Мешки были изготовлены из нити с различным содержанием стабилизатора – 1; 1,5 и 2 %. Для каждого варианта определяли массу мешка, массу ламинирующего слоя на единицу площади, а также относительную прочность сварного дна по всем испытанным полоскам, отдельно по центральным и угловым.

Испытания клапанно-коробчатых мешков проводили в соответствии с СТ РК 3050-2017. Из верхней и нижней частей мешка вырезали полоски размером 350×50 мм. Испытания на растяжение проводили на универсальной разрывной машине Zwick/Roell BasicLine Z005 при зажимной длине 200 ± 1 мм и скорости растяжения 100 мм/мин. Каждую полоску растягивали до разрыва с регистрацией разрывной нагрузки. Количество испытываемых полосок определялось фактической шириной мешка. Для расчёта относительной прочности по всем испытанным полоскам определяли среднее значение разрывной нагрузки всех полосок и выражали его в процентах относительно фактически измеренной разрывной нагрузки основы соответствующего мешка. Относительную прочность угловых полосок рассчитывали аналогично, используя среднее значение разрывных нагрузок четырёх угловых полосок. Для каждого варианта концентрации исследовали один изготовленный мешок.

Целью эксперимента являлось определение степени светостойкости образцов, оцененной по изменению их физико-механических свойств до и после ускоренного старения в камере искусственного освещения, имитирующего воздействие УФ-излучения. Контрольными показателями служили: разрывная нагрузка (Н/кгс), удлинение при разрыве (%), прочность нити (г/ден), визуальное состояние полотна, стабильность технологического процесса при переработке.

Результаты и обсуждение. В таблице 2 представлены основные механические характеристики образцов после введения трех типов модификаторов и их изменение после УФ-старения.

Таблица 2 - Результаты испытаний полипропиленового полотна после введения УФ-стабилизаторов

Образец	Время старения	Разрывная нагрузка, Н (кгс)	Удлинение, %	Прочность, г/ден
PP	До старения	655,20 (66,8)	16,2	5,2
	168 ч	342,11 (34,9)	6,4	2,7
	336 ч	118,25 (12,1)	2,1	1,1
POL PE 920052-UV	До старения	692,42 (70,6)	17,5	5,50
	168 ч	568,33 (57,9)	15,2	4,33
	336 ч	252,18 (25,7)	6,12	3,00
FMD 03.20/01-PP	До старения	548,15 (55,8)	15,2	4,5
	168 ч	376,60 (38,3)	7,14	3,0
	336 ч	200,12 (20,39)	3,37	1,7
UV 5010 PE	До старения	675,25 (68,8)	15,36	5,3
	168 ч	593,23 (60,5)	14,35	4,4
	336 ч	525,25 (53,5)	10,82	3,59

До начала старения исследованные образцы демонстрировали сопоставимые механические характеристики, подтверждающие правильность подготовки композиций. Однако по результатам УФ-старения проявилась значительная разница в эффективности светостабилизирующих добавок. Наилучшую защиту от фотодеструкции показал UV 5010 PE, при котором деградация прочностных характеристик была минимальной даже после 336 часов старения. POL PE 920052-UV продемонстрировал уверенную защиту до 168 часов, однако далее наблюдалось заметное падение показателей. Наименее эффективным оказался FMD 03.20/01-PP, при котором произошло резкое снижение прочности и удлинения уже на 168 часе, а к 336 часу материал характеризовался выраженной потерей механических свойств.

Изменение показателей прочности полипропиленового полотна представлено на рисунке 4.

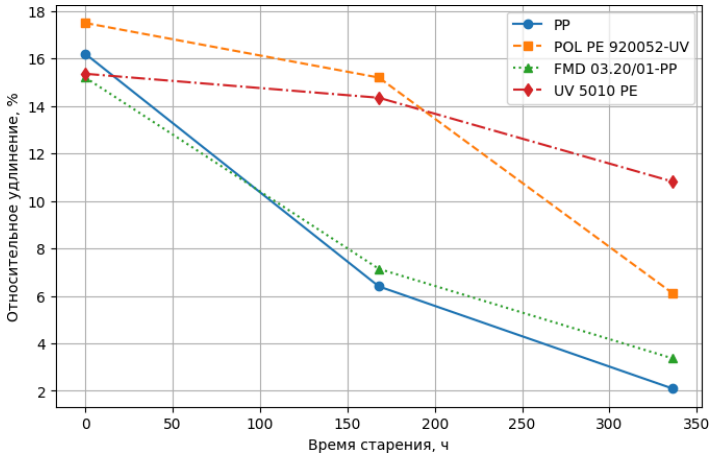


Рис. 4 - Изменение показателей прочности образцов при УФ-старении

После 336 часов УФ-старения контрольный образец PP без стабилизатора сохранил лишь около 18 % исходной разрывной нагрузки (таблица 3), образцы с POL PE 920052-UV и FMD 03.20/01-PP сохранили примерно 36 % исходного значения и образец с UV 5010 PE сохранил около 78 % разрывной нагрузки. Это свидетельствует о наиболее выраженном защитном действии UV 5010 PE в условиях ускоренного старения.

Таблица 3 - Сохранение разрывной нагрузки после 336 часов

Образец	Разрывная нагрузка до старения, Н (кгс)	Разрывная нагрузка после 336 ч старения, Н (кгс)	Сохранение прочности, %
PP	655,20 (66,8)	118,25 (12,1)	18,05
POL PE 920052-UV	692,42 (70,6)	252,18 (25,7)	36,42
FMD 03.20/01-PP	548,15 (55,8)	200,12 (20,39)	36,51
UV 5010 PE	675,25 (68,8)	525,25 (53,5)	77,79

Анализ разрушенных полотен (по характеру обрывов) позволяет предположить, что в образцах с FMD 03.20/01-PP и UV 5010 PE возможно образование поверхностной хрупкой зоны, подверженной появлению микротрещин и фрагментации при внешней нагрузке. Это согласуется с механизмом фотоокислительной деградации, при котором разрушение начинается с поверхностных слоёв и распространяется вглубь материала. Несмотря на то что UV 5010 PE обеспечил наибольшее сохранение механических свойств после УФ-старения, его применение сопровождалось технологическими затруднениями при переработке. Таким образом, в условиях промышленной переработки эффективность УФ-стабилизатора целесообразно оценивать комплексно − с учётом как сохранения физико-механических свойств после УФ-старения, так и стабильности технологического процесса переработки композиции.

При применении УФ-стабилизаторов FMD 03.20/01-PP и UV 5010 PE во время изготовления нити на экструзионной линии происходили обрывы нити в печи и на намоточном устройстве, появлялись дыры в полотне после выхода из плоскощелевой головки, наблюдалась нестабильность давления расплава до и после автоматического фильтра. В отличие от них, при использовании модификатора марки POL PE 920052-UV технологический процесс протекал стабильно: скачков давления перед и после фильтрующей сетки не наблюдалось, полотно формировалось без дефектов, обрывы нити в печи и на намоточном устройстве отсутствовали. С учетом результатов УФ-старения и выявленных технологических особенностей переработки выбор стабилизатора для дальнейшего исследования осуществляли по совокупности критериев светостабилизирующей эффективности и технологической стабильности процесса экструзии, принципиальным условием при этом являлась возможность стабильного получения ориентированной нити без обрывов и дефектов полотна. В результате для дальнейшего исследования влияния концентрации был выбран УФ-стабилизатор POL PE 920052-UV, обеспечивавший стабильную переработку композиции при экструзии.

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 4. В таблице приведены средние значения показателей и соответствующие стандартные отклонения, рассчитанные по результатам испытаний трёх образцов для каждой концентрации стабилизатора.

Таблица 4 - Результаты испытаний ПП нитей с разной концентрацией УФ-стабилизатора POL PE 920052-UV

Концентрация УФ-стабилизатора, %	Ширина, мм	Толщина, мкм	Линейная плотность, денье	Прочность, г/ден	Относительное удлинение, %	Остаточная усадка, %
1	3,00±0,00	36,47±0,21	867,03±1,11	5,83±0,25	30,30±0,95	6,90±0,17
1,5	3,00±0,00	37,50±0,20	872,53±1,42	5,60±0,10	30,10±0,40	7,73±0,15
2,0	3,00±0,00	37,07±0,64	874,87±2,77	5,67±0,06	27,43±0,50	7,43±0,31

В результате эксперимента установлено, что изменение содержания POL PE 920052-UV в полипропиленовой композиции в исследованном диапазоне от 1 % до 2 % по-разному отражается на отдельных характеристиках полученной нити. Ширина нити во всех исследованных образцах сохранялась на уровне 3,0 мм. При увеличении концентрации стабилизатора от 1 до 2 % наблюдалось увеличение средней линейной плотности нити с 867,03±1,11 до 874,87±2,77 ден, что влечёт за собой рост массы конечных изделий. Толщина нити изменялась менее однозначно: максимальное значение 37,50±0,20 отмечено при концентрации 1,5 %, а при 2 % показатель составил 37,07±0,64.

Прочность нити при увеличении концентрации стабилизатора изменялась в относительно узком диапазоне - от 5,60±0,10 до 5,83±0,25 г/ден - без выраженной направленной тенденции. При этом относительное удлинение при концентрации 1 и 1,5 % практически не различалось и составляло соответственно 30,30±0,95 и 30,10±0,40, тогда как при увеличении содержания стабилизатора до 2 % показатель снижался до 27,43±0,50, чт может свидетельствовать о повышении жесткости нити. Таким образом, наиболее заметное изменение при увеличении содержания УФ-стабилизатора до 2 % наблюдалось по относительному удлинению нити.

Подобные изменения могут негативно сказаться на эксплуатационных свойствах нити, особенно в условиях динамических нагрузок, изгибов, растяжений и вибрационных воздействий. На рисунке 5 показана диаграмма изменения относительного удлинения при повышении концентрации модификатора в составе нити.

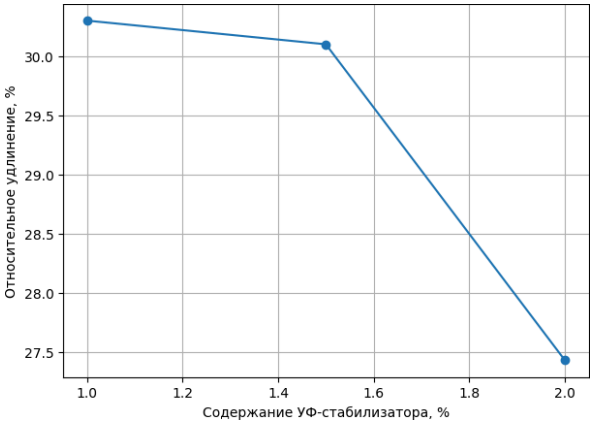


Рис. 5 - Изменение относительного удлинения при повышении концентрации модификатора

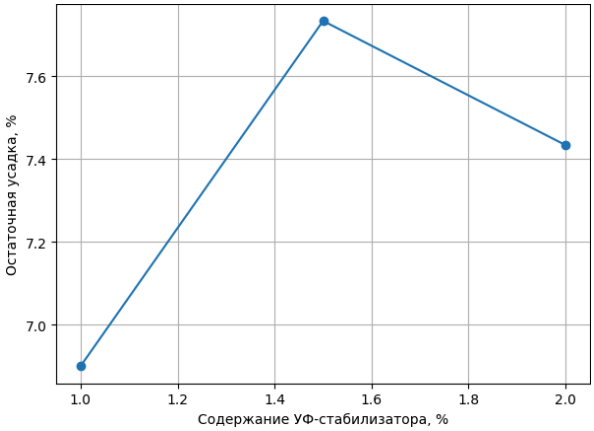


Рис. 6 - Изменение остаточной усадки при повышении концентрации модификатора

Изменение остаточной усадки (рисунок 6) имело немонотонный характер. По сравнению с концентраций 1 % среднее значение усадки увеличивалось при 1,5 % с 6,90±0,17 до 7,73±0,15 %, а при 2 % составляло 7,43±0,31 %. Наибольшее значение остаточной усадки отмечено при концентрации 1,5 %. Такое изменение может быть связано с изменением структуры, размеров и степени ориентации макромолекул полипропилена, однако подтверждение данного предположения требует дополнительных структурных исследований.

С ростом содержания POL PE 920052-UV наблюдается увеличение линейной плотности нити, тогда как изменение её толщины носит менее выраженный и немонотонный характер. Линейная плотность нити - один из ключевых параметров, определяющих массу нити на единицу длины и влияющих как на переработку материала в последующих операциях, так и на массу и механические свойства конечного изделия.

При содержании 1 % стабилизатора линейная плотность нити находилась в диапазоне от 866,0 до 868,2 ден, со средним значением около 867,03 ден. При увеличении дозировки до 1,5 %, линейная плотность составила от 871,0 до 873,8 ден, в среднем - 872,53 ден. При максимальной концентрации стабилизатора 2 % линейная плотность находилась в пределах 872,3-877,8 ден, со средним значением 874,87 ден. Таким образом, увеличение концентрации стабилизатора с 1 до 2 % сопровождалось ростом средней линейной плотности с 867,03 до 874,87 ден, что соответствует увеличению примерно на 0,9 %. Наблюдаемое увеличение линейной плотности может быть связано как с увеличением массы композиции за счёт введения стабилизатора, так и с возможными изменениями реологических характе-

ристик расплава. Подтверждение влияния реологических факторов требует дополнительных исследований.

В продолжение исследований полипропиленовой нити, модифицированной различным количеством УФ-стабилизатора, была проведена серия испытаний клапанно-коробчатых мешков, изготовленных на её основе. Целью этих испытаний являлось сравнение физико-механических характеристик готовой упаковочной тары при различном содержании УФ-стабилизатора POL PE 920052-UV. Клапанно-коробчатые мешки представляют собой тип широко применяемой полипропиленовой тары, предназначенной для упаковки, транспортировки и хранения сыпучих и порошкообразных материалов. В данном исследовании особое внимание было уделено трём показателям: массе мешка, массе ламинирующего слоя на единицу площади и прочности сварного дна, которое является критическим элементом конструкции, определяющим надёжность и герметичность упаковки при нагрузке.

Мешки были изготовлены из нити с различным содержанием стабилизатора – 1 %, 1,5 % и 2 %. Для каждого варианта определяли массу мешка, массу ламинирующего слоя на единицу площади (ламинация), а также относительную прочность сварного дна по всем испытанным полоскам, отдельно по центральным и угловым полоскам. Результаты представлены в таблице 5. Испытания клапанно-коробчатых мешков проводили в соответствии с СТ РК 3050-2017. Из верхней и нижней частей мешка вырезали полоски размером 350х50 мм. Испытания на растяжение проводили на универсальной разрывной машине Zwick/Roell BasicLine Z005 при зажимной длине 200±1 мм и скорости растяжения 100 мм/мин. Каждую полоску растягивали до разрыва с регистрацией разрывной нагрузки. Количество испытываемых полосок определялось фактической шириной мешка. Для расчёта относительной прочности по всем испытанным полоскам определяли среднее значение разрывной нагрузки всех полосок и выражали его в процентах относительно фактически измеренной разрывной нагрузки основы соответствующего мешка. Относительную прочность угловых полосок рассчитывали аналогично, используя среднее значение разрывных нагрузок четырёх угловых полосок. Относительную прочность рассчитывали, как отношение среднего значения разрывной нагрузки соответствующей группе полосок к фактически измеренной разрывной нагрузке основы того же мешка, выраженное в процентах.

Таблица 5 - Результаты испытаний клапанно-коробчатых мешков

Концентрация УФ-стабилизатора, %	Масса мешка, г	Ламинация, г/м²	Относительная прочность всех полосок, %	Относительная прочность центральных полосок, %	Относительная прочность угловых полосок, %
1	79,2	25,4	109,2	109,6	109,1
1,5	80,5	26,2	101,0	101,7	100,8
2	81,8	26,4	90,4	90,3	90,2

Полученные данные позволяют сделать несколько наблюдений. Прежде всего, с увеличением содержания УФ-стабилизатора наблюдается поступенное увеличение массы мешка. Если при 1 % стабилизатора масса мешка составляла 79,2 г, при 1,5 % - 80,5 г, а при 2 % - 81,8 г. Таким образом, при увеличении концентрации стабилизатора от 1 до 2 % масса мешка увеличилась на 2,6 г, или примерно на 3,3 % относительно значения при концентрации 1 %. Увеличение массы мешка, согласуется с изменением линейной плотности нити, установленным по результатам предыдущей серии испытаний. Масса ламинирующего слоя также увеличивалась с повышением концентрации стабилизатора: с 25,4 г/м² при 1 % до 26,2 г/м² при 1,5 % и 26,4 г/м² при 2 %. Таким образом, повышение содержания стабилизатора сопровождалось увеличением как общей массы мешка, так и массы ламинирующего слоя. В данном контексте увеличение массы является нежелательным с производственной точки зрения, т. к. означает увеличение расхода полимерного материала на единицу продукции, а в условиях массового производства даже небольшая прибавка веса приводит к увеличению расхода сырья, снижению технологичности (особенно на упаковочных и швейных линиях), а также к росту себестоимости продукции.

Наиболее существенным изменением, зафиксированным в ходе испытаний, стало снижение относительной прочности сварного дна по мере увеличения

дозировки стабилизатора. При содержании 1 % относительная прочность всех испытанных полосок составляла 109,2 % от фактически измеренной разрывной нагрузки основы мешка; для центральных и угловых полосок значения составляли соответственно 109,6 % и 109,1 % (с запасом, превышающим нормативные требования). При увеличении концентрации стабилизатора до 1,5 % соответствующие показатели снижались до 101,0; 101,7; 100,8 %. При концентрации 2 % относительная прочность снижалась до 90,4 % по всем испытанным полоскам, 90,3 % по центральным и 90,2 % по угловым полоскам. Таким образом, увеличение содержания POL PE 920052-UV от 1 до 2 % сопровождалось снижением относительной прочности сварного дна по отношению к прочности основы мешка. При этом значения, полученные для центральных и угловых полосок, изменялись согласованно, что указывает на сходный характер изменения прочности сварных соединений в исследованных зонах и свидетельствует о заметном ухудшении спаиваемости материала и, как следствие, о возможном снижении надёжности упаковки в реальных условиях эксплуатации. Диаграмма изменения относительной прочности сварного дна клапанно-коробчатых мешков представлена на рисунке 7.

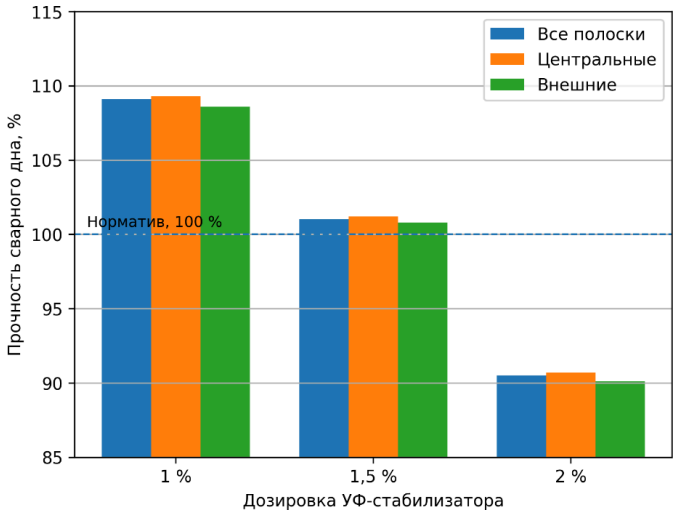


Рис. 7 - Изменение прочности сварного дна клапанно-коробчатых мешков

Предполагаемой причиной снижения относительной прочности сварных соединений при увеличении содержания УФ-стабилизатора может быть изменение условий термосваривания модифицированного материала. Наблюдаемое изменение прочности сварных соединений может быть связано с изменением структуры материала и условий оплавления в зоне сварки. Подтверждение конкретных структурных и термических механизмов выявленной зависимости требует дополнительных исследований.

Проведённые испытания мешков показали, что увеличение содержания стабилизатора в исследованном диапазоне от 1 до 2 % сопровождалось увеличением массы мешка и снижением относительной прочности сварного дна. При этом мешки, изготовленные при концентрации УФ-стабилизатора 1 %, характеризовались наименьшей массой и наиболее высоким значением относительной прочности сварного дня среди исследованных вариантов. Таким образом, в рассмотренном диапазоне концентраций наилучшее сочетание этих показателей было получено при содержании POL PE 920052-UV 1 %, что делает данный вариант предпочтительным для промышленного производства.

Полученные результаты согласуются с литературными данными о том, что УФ-стабилизаторы на основе HALS и УФ-абсорберов замедляют фотоокислительную деградацию полипропилена и способствуют сохранению его механических свойств при воздействии УФ-излучения. Эффективность стабилизации зависит не только от химической природы добавки, но и от её совместимости с полимерной матрицей, степени диспергирования в расплаве и влияния на технологические свойства материала. Результаты настоящего исследования подтверждают комплексный характер оценки стабилизатора: UV 5010 PE обеспечил наибольшее сохранение прочности после УФ-старения, но POL PE 920052-UV оказался более приемлемым для промышленной переработки благодаря стабильности экструзионного процесса.

В целом результаты исследования показывают, что выбор УФ-стабилизатора для промышленной переработки должен основываться не только на его светостабилизирующей эффективности, но и на технологической стабильности процесса и свойствах готового изделия. В исследованном диапазоне концентраций POL PE 920052-UV обеспечивал более высокую стабильность переработки, а при концентрации 1 % позволял получать клапанно-коробчатые мешки с наилучшим сочетанием массы изделия и прочности сварного дна.

Выводы. Проведенное исследование позволило оценить влияние УФ-стабилизаторов разных марок на технологический процесс изготовления продольно-ориентированных плоских полипропиленовых нитей, а также на физико-механические свойства нитей, полипропиленового полотна и готовых изделий из него. В ходе исследования определены основные характеристики полипропиленовой нити, включая линейную плотность, прочность, относительное удлинение при максимальной нагрузке и остаточную усадку, а также показатели готовых клапанно-коробчатых мешков - массу мешка, массу слоя ламинирующего покрытия и относительную прочность сварного дна.

В результате сравнения трёх коммерческих УФ-светостабилизирующих продуктов установлена различная эффективность их действия при ускоренном УФ-старении. Наибольшее сохранение разрывной нагрузки после 336 часов старения обеспечивал UV 5010 PE - 77,79 % исходного значения. При этом его применение, как и FMD 03.20/01-PP, сопровождалось технологическими нарушениями процесса экструзии и формирования нити. POL PE 920052-UV характеризовался более стабильной переработкой композиции, что послужило основанием для его дальнейшего исследования при различных концентрациях.

Сравнение концентраций стабилизатора POL PE 920052-UV (1; 1,5 и 2 %) показало, что изменение содержания стабилизатора по-разному отражается на отдельных характеристиках полипропиленовой нити. При увеличении концентрации от 1 до 2 % наблюдалось увеличение линейной плотности нити и снижение относительного удлинения, тогда как изменение толщины и остаточной усадки носило немонотонный характер, а прочность нити изменялась без выраженной направленной тенденции. На уровне готового изделия увеличение содержания стабилизатора сопровождалось увеличением массы мешка и снижением относительной прочности сварного дна.

Наиболее неблагоприятная динамика была зафиксирована при содержании УФ-стабилизатора 2 %, при котором относительная прочность сварных швов снизилась по сравнению с образцами при 1 % стабилизатора с 109,2 до 90,4 %, т. е. на 18,8 процентных пункта, а масса изделия увеличилась на 2,6 г. Таким образом, увеличение содержания стабилизирующей добавки до 2 % сопровождалось снижением прочности сварного дна и увеличением массы готового изделия, что с технологической точки зрения является неблагоприятным. При содержании стабилизатора 1,5 % масса изделия также увеличивалась, а относительная прочность сварного дна снижалась по сравнению с вариантом 1 %.

Установленные результаты свидетельствуют о том, что в исследованном диапазоне концентраций наилучшее сочетание механических показателей и массы готового изделия было получено при добавлении 1 % УФ-стабилизатора марки POL PE 920052-UV. Данная концентрация позволила получить клапанно-коробчатые мешки с наименьшей массой и наиболее высокой относительной прочностью сварного дна среди исследованных вариантов. Полученные результаты могут быть использованы для практического применения УФ-стабилизатора POL PE 920052-UV при производстве полипропиленовой упаковочной продукции.

Перспективой дальнейшей работы является проведение длительных натурных испытаний полипропиленовых изделий в производственных условиях и более детальное изучение структурных изменений материала после УФ-старения.

Финансирование: *данное исследование финансируется ГУ «Комитет науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан» (ИРН AP26199041).*

Литература

1. Hossain M.T., Shahid M.A., Mahmud N., Habib A., Rana M.M., Khan S. A., Hossain M.D. Research and application of polypropylene: a review \// Discover nano. - 2024 - Vol. 19(1). DOI 10.1186/s11671-023-03952-z.
2. Tajeddin B. & Arabkhedri, M. Polymers and food packaging \// Polymer Science and Innovative Applications. −2020. - P. 525-543. DOI 10.1016/B978-0-12-816808-0.00016-0.
3. Venkateshaiah A., Padil V. V., Nagalakshmaiah M., Waclawek S., Černík M., & Varma R. S. Microscopic techniques for the analysis of micro and nanostructures of biopolymers and their derivatives // Polymers. - 2020. - Vol. 12(3):512. DOI 10.3390/polym12030512.
4. Mao R., Lang M., Yu X., Wu R., Yang X. & Guo X. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals // Journal of Hazardous Materials. - 2020. - Vol.393: 122515. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.122515.
5. Chamas A., Moon H., Zheng J., Qiu Y., Tabassum T., Jang J. H., Abu-Omar M., Scott S. L. & Suh S. Degradation rates of plastics in the environment // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. - 2020. - Vol. 8(9). - P. 3494−3511. DOI 10.1021/acssuschemeng.9b06635.
6. Ainali N. M., Bikiaris D. N. & Lambropoulou D. A. Aging effects on low- and high-density polyethylene, polypropylene and polystyrene under UV irradiation: An insight into decomposition mechanism by Py-GC/MS for microplastic analysis // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. - 2021. - Vol. 158: 105207. DOI 10.1016/j.jaap.2021.105207.
7. Albertsson A. C. & Karlsson S. The three stages in degradation of polymers - polyethylene as a model substance // Journal of Applied Polymer Science. - 1988. - Vol. 35(5). - P. 1289-1302. DOI 10.1002/app.1988.070350515.
8. Vohidal J. Polymer degradation: a short review // Chemistry Teacher International. - 2021. - Vol. 3(2). - P. 213-220. DOI 10.1515/cti-2020-0015.
9. Lv Y., Huang Y., Yang J., Kong M., Yang H., Zhao J. & Li G. Outdoor and accelerated laboratory weathering of polypropylene: A comparison and correlation study // Polymer Degradation and Stability. - 2015. Vol. 112. - P. 145-159. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2014.12.023.
10. El-Hiti G. A., Ahmed D. S., Yousif E., Al-Khazrajy O. S. A., Abdallh M. & Alanazi S. A. Modifications of polymers through the addition of ultraviolet absorbers to reduce the aging effect of accelerated and natural irradiation// Polymers. - 2022.-Vol. 14(1):20. DOI 10.3390/polym14010020.
11. Brostow W., Lu X., Gencel O., Osmanson A. T. Effects of UV stabilizers on polypropylene outdoors // Materials. - 2020. Vol.13(7). - P. 1626. DOI 10.3390/ma13071626.
12. Chen W., An P., Chen Y. X., Li Y., Yan X. L., Chen L. G. Synthesis and light-stabilizing ability of a series of hindered piperidine derivatives // Synthetic Communications. - 2012. - Vol. 42(10). - P. 1419-1425. DOI 10.1080/00397911.2010.540693.
13. Yaqoob A. A., Noor N. H. B. M., Umar K., Adnan R., Ibrahim M. N. M., Rashid M. Graphene oxide-ZnO nanocomposite: An efficient visible light photocatalyst for degradation of rhodamine B //Applied Nanoscience. - 2021.-Vol.11(4). -P.1291-1302. DOI 10.1007/s13204-020-01665-8;.
14. Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y., Kumosa M. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites // Polymer Degradation and Stability. - 2018. - Vol.154.- P.203-210. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.004.
15. Ahmed D. S., El-Hiti G. A., Hameed A. S., Yousif E., Ahmed A. New Tetra-Schiff bases as efficient photostabilizers for poly (vinyl chloride) // Molecules. - 2017. - Vol. 22(9): 1506. DOI 10.3390/molecules22091506
16. Marturano V., Cerruti P., Ambrogi V. Polymer additives // Physical Sciences Reviews. - 2017. - Vol. 2(6). DOI 10.1515/psr-2016-0130

Информация об авторах

Леонтьева И.Л.- магистрант, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: brightmiss3107@gmail.com;;

Масакбаева С.Р.- кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com;

Несмеянова Р.М.- кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz;

Елубай М.А - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан. e-mail: madik_chimik@mail.ru;;

Ковтарева С.Ю.- магистр химической технологии органических веществ, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: kovtarsw@gmail.com;;

Мукашев О.Е.- магистр, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz.

Information about the authors

Leonteva I.L - master's student, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: brightmiss3107@gmail.com;;

Massakbayeva S. R. – candida te of Chemical Science, associate Professor, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com;;

Nesmeyanova R.M. - candidate of Chemical Science, associate Professor, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz;;

Yelubay M.A.- candidate of Chemical Science, associate Professor, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: madik_chimik@mail.ru;;

Kovtareva S.Yu. - master of Chemical Technology of Organic Substances, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: kovtarsw@gmail.com;;

Mukashev O. E. - master, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-3

COMPARATIVE STUDY OF THE PURIFICATION OF FULVIC ACID OBTAINED FROM AMMONIUM HUMATE USING CARBON SORBENTS

M.K. Kazankapova[1,2]✉, B.T. Yermagambet[1,2]✉, A.B. Malgazhdarova[1], Zh.M. Kassenova[1,2], U.M. Kozhamuratova[1], A.S. Akshekina[1], A.B. Bekbosynov[1]

Received: 29 June 2026
Accepted: 16 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: M.K. Kazankapova, et al. « COMPARATIVE STUDY OF THE PURIFICATION OF FULVIC ACID OBTAINED FROM AMMONIUM HUMATE USING CARBON SORBENTS ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-3
License CC BY 4.0

[1] «Institute of Coal Chemistry and Technology» LLP, Astana, Kazakhstan
[2] K. Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan
✉ Corresponding author: coaltech@bk.ru, maira_1986@mail.ru

This study investigates the purification of fulvic acid obtained from humic substances derived from oxidized brown coal using carbon sorbents derived from Kazakhstani coals. Fulvic acid was obtained by acidification of ammonium humate with a 5% nitric acid solution, followed by purification using sorbents produced from Shubarkol and Shoptykol coals, coconut activated carbon, KU-2-8 cation-exchange resin, and membrane dialysis. Ion chromatographic analysis showed that the combined purification process effectively reduced the concentrations of major inorganic ions. Nitrate and potassium removal exceeded 97% for all investigated sorbents, with the highest removal efficiencies being obtained using the Shubarkol sorbent (99.33% and 99.67%, respectively). Shoptykol showed the highest removal efficiency for Mg^{2+} (89.16%), whereas coconut activated carbon provided the highest removal efficiencies for SO_4^{2-} (67.72%) and Ca^{2+} (85.02%). The FA concentration after purification remained at 100–103 mg/L compared with 120 mg/L in the initial sample, corresponding to a retention of approximately 83–86% of the initial FA concentration. FTIR and ^1H NMR analyses indicated changes in the relative contributions of oxygen-containing, aliphatic, and aromatic structural fragments after purification. The results demonstrate that the combination of carbon sorption, KU-2-8 cation exchange, and membrane dialysis is an effective approach for reducing inorganic impurities while preserving the main fulvic acid fraction. Among the investigated sorbents, Shubarkol and Shoptykol demonstrated promising performance for the purification of fulvic acid obtained from ammonium humate.

Keywords: humic substances, fulvic acid, adsorption, membrane purification, inorganic ion removal, dialysis.

АММОНИЙ ГУМАТЫНАН АЛЫНҒАН ФУЛЬВОҚЫШҚЫЛДЫ КӨМІРТЕКТІ СОРБЕНТТЕРДІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ТАЗАРТУДЫ САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУ

М.Қ. Қазанқапова[1,2]✉, Б.Т. Ермағамбет[1,2]✉, А.Б. Малғаждарова[1], Ж.М. Касенова[1,2], Ұ.М. Қожамұратова[1], Ә.С. Акшекина[1], Ә.Б. Бекбосынов[1]

[1] «Көмір химиясы және технология институты» ЖШС, Астана, Қазақстан
[2] Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан
✉ e-mail: coaltech@bk.ru, maira_1986@mail.ru

Жұмыс Қазақстан көмірлері негізінде дайындалған көміртекті сорбенттерді пайдалана отырып, тотыққан қоңыр көмірден алынған гуминді заттардан бөлінген фульвоқышқылын тазартуға арналған. Фульвоқышқылы аммоний

гуматын 5%-дық азот қышқылы ерітіндісімен қышқылдандыру арқылы алынып, кейіннен Шұбаркөл және Шөптікөл кен орындарының көмірлерінен алынған сорбенттер, кокос белсендірілген көмірі, КУ-2-8 катионалмастырғыш шайыры және мембраналық диализ көмегімен тазартылды. Иондық хроматографиялық талдау кешенді тазарту үдерісінің негізгі бейорганикалық иондардың концентрациясын тиімді төмендеткенін көрсетті. Барлық зерттелген сорбенттер үшін нитрат және калий иондарын жою дәрежесі 97%-дан жоғары болды, бұл ретте ең жоғары тазарту тиімділігі «Шұбаркөл» сорбентін қолдану кезінде байқалды және сәйкесінше 99,33% және 99,67%-ды құрады. «Шөптікөл» сорбенті Mg^{2+} иондарын ең жоғары дәрежеде жоюды көрсетті (89,16%), ал кокос негізіндегі белсендірілген көмір SO_4^{2-} (67,72%) және Ca^{2+} (85,02%) иондарын жою бойынша ең жоғары көрсеткіштерді қамтамасыз етті. Тазартудан кейінгі фульвоқышқылдардың концентрациясы бастапқы үлгідегі 120 мг/л мәнімен салыстырғанда 100–103 мг/л деңгейінде сақталды, бұл бастапқы фульвоқышқылдардың шамамен 83–86%-ының сақталғанын көрсетеді. FTIR және ^{1}H NMR талдаулары тазартудан кейін құрамында оттегі бар, алифатты және ароматты құрылымдық фрагменттердің салыстырмалы үлесінің өзгергенін көрсетті. Алынған нәтижелер көміртекті материалдардағы сорбцияны, КУ-2-8 ионалмастырғыш шайырындағы ион алмасуды және мембраналық диализді үйлестіру бейорганикалық қоспалардың мөлшерін төмендету және фульвоқышқылдардың негізгі фракциясын сақтау тұрғысынан тиімді тәсіл болып табылатынын көрсетті. Зерттелген сорбенттердің ішінде «Шұбаркөл» және «Шөптікөл» көмірлері негізіндегі материалдар аммоний гуматынан алынған фульвоқышқылдарды тазартуда жақсы нәтижелер көрсетті.

Түйін сөздер: гуминді заттар, фульвоқышқылы, адсорбция, мембраналық тазарту, бейорганикалық иондарды жою, диализ.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ ФУЛЬВОКИСЛОТЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ГУМАТА АММОНИЯ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ

М.К. Казанкапова[1,2]✉, Б.Т. Ермагамбет[1,2]✉, А.Б. Малгаждарова[1], Ж.М. Касенова[1,2], У.М. Кожамуратова[1], А.С. Акшекина[1], А.Б. Бекбосынов[1]

[1] ТОО «Институт химии угля и технологии», Астана, Казахстан
[2] Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан
✉ *e-mail: coaltech@bk.ru, maira_1986@mail.ru*

Работа посвящена очистке фульвокислот, выделенных из гуминовых веществ, полученных из окисленного бурого угля, с использованием углеродных сорбентов на основе углей Казахстана. Фульвокислоту получали путем подкисления гумата аммония 5%-ным раствором азотной кислоты с последующей очисткой с применением сорбентов из углей месторождений Шубарколь, Шоптыколь и кокосового активированного угля, катионообменной смолы КУ-2-8 и мембранного диализа. Ионно-хроматографический анализ показал, что комплексный процесс очистки эффективно снижает концентрации основных неорганических ионов. Для всех исследованных сорбентов степень удаления нитрат- и калий-ионов превышала 97%, при этом наибольшая эффективность очистки была достигнута при использовании сорбента «Шубарколь» и составила 99,33% и 99,67% соответственно. Сорбент «Шоптыколь» продемонстрировал наибольшую степень удаления ионов Mg^{2+} (89,16%), тогда как активированный уголь из кокосового сырья обеспечил наиболее высокую степень удаления ионов SO_4^{2-} (67,72%) и Ca^{2+} (85,02%). Концентрация фульвокислот после очистки сохранялась на уровне 100–103 мг/л по сравнению со 120 мг/л в исходном образце, что соответствует сохранению примерно 83–86% исходного содержания фульвокислот. Анализ методом FTIR и ^{1}H NMR продемонстрировал изменения в относительном содержании кислородсодержащих, алифатических и ароматических структурных фрагментов после очистки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что сочетание сорбции на углеродных материалах, ионного обмена на смоле КУ-2-8 и мембранного диализа является эффективным подходом к снижению содержания неорганических примесей при сохранении основной фракции фульвокислот. Среди исследованных сорбентов материалы «Шубарколь» и «Шоптыколь» показали хорошие результаты при очистке фульвокислот, полученных из гумата аммония.

Ключевые слова: гуминовые вещества, фульвокислота, адсорбция, мембранная очистка, удаление неорганических ионов, диализ.

Introduction. The molecular structure and origin of humic substances have been widely studied over the past two centuries. Humic and fulvic acids are formed during the decomposition and transformation of natural organic matter under various environmental conditions. Humic and fulvic acids can be extracted from natural sources in a variety of ways. As a rule, FA and HA are extracted from natural humic raw materials by successive alkalization and acidification. Thus, alkalization extracts humic and fulvic acids together, and acidification helps separate humic acids from fulvic acids. Next, the raw products are washed with water to remove salts formed as a result of the acid-base reaction. Isolation of FAs in high yields is difficult because they are soluble in both acidic and basic environments. In addition, acidic solutions of fulvic acids contain undesirable substances derived from other acid-soluble particles or sources of humic substances. Sources of humic substances may also contain radioactive compounds associated with fulvic acids, raising further concerns about large-scale use of FAs. Moreover, FA and HA molecules have almost identical polar functional groups, which complicates their separation and purification. Therefore, the purification of fulvic acids is becoming increasingly important for their potential use in the pharmaceutical and industrial sectors. Many methods have been discovered for the isolation and purification of fulvic acids; however, it is difficult to obtain pure FAs due to low extraction yields, environmental instability, and complex and labor-intensive purification procedures [1-3].

Fulvic acids are defined as the colored fraction of humus remaining in solution after separation of humic acids, soluble in dilute acid and alkali, or soluble in water at any pH value [4]. Fulvic acid can bind metal ions through complexation, forming chelate-like complexes. Fulvic acid can participate in redox processes and exhibits buffering capacity due to the presence of ionizable functional groups.

H umic and fulvic acids are complex mixtures of naturally occurring substances that are commonly isolated from natural raw materials. However, the purity of the isolated fulvic acid is very low. The isolation and purification of highly pure fulvic acid are often expensive processes [5-7].

Fulvic acids have attracted considerable attention due to their diverse physicochemical and biological properties and their potential applications in the pharmaceutical, agricultural, cosmetic, and industrial sectors. However, the isolation and purification of fulvic acids remain challenging because of the complexity of humic-derived mixtures and the presence of inorganic and low-molecular-weight impurities [8, 9].

Recently, carbon-based sorbents have attracted significant attention due to their high surface area, tunable porosity, and strong adsorption properties. In particular, sorbents derived from coal and carbon-rich natural materials demonstrate excellent efficiency in removing organic impurities from complex mixtures. Their surface functional groups and porous structure make them promising materials for the selective purification of fulvic acids from humic-derived solutions. Therefore, the use of carbon sorbents based on Kazakhstan coals represents a promising approach to improve the purity and quality of fulvic acid products while maintaining environmentally friendly and cost-effective processing conditions [10-14].

Previous studies of our research group have focused on the isolation and purification of fulvic acid obtained from oxidized brown coal. In the earlier study reported at HIT-2022, the ionic composition of fulvic acid obtained from Maikuben oxidized brown coal was investigated at an earlier stage of purification using carbon sorbents based on Shubarkol and Shoptykol coals [15]. A subsequent study presented at HIT-2024 further examined the extraction and purification of fulvic acid from Sarykol oxidized brown coal using the Forsyth approach, including adsorption, ion-exchange purification and dialysis [16]. The 2024 study published in Vestnik KazUTB investigated fulvic acid obtained from potassium humate prepared from Maikuben oxidized brown coal and characterized the purified samples using acid-base titration, ion chromatography, FTIR and NMR spectroscopy [17]. Another study published in 2025 examined the physicochemical properties of fulvic acid solutions after purification [18].

The present study differs from these previous investigations in the starting humate and experimental dataset. In the present work, fulvic acid obtained from ammonium humate is comparatively purified using Shubarkol, Shoptykol and coconut carbon sorbents followed by KU-2-8 ion-exchange treatment and membrane dialysis. Particular attention is given to the changes in ionic composition and functional-group characteristics after the complete purification sequence.

The aim of this study was to comparatively evaluate the purification of fulvic acid obtained from ammonium humate using carbon sorbents derived from Shubarkol and Shoptykol coals and coconut activated carbon, followed by KU-2-8 cation-exchange treatment and membrane dialysis, with particular emphasis on

changes in ionic composition and functional-group characteristics.

Materials and methods. The following reagents and equipment were used: 0.1 N HCl, 0.1 N NaOH, 5% HNO_3, acetone, KU-2-8 cation exchanger, ammonium humate, distilled water, laboratory centrifuge TsN-12, laboratory stirrer IKA RH «basic 2», rotary evaporator RV 3 IKA, ion chromatograph «Dionex» ICS 6000, FT-IR spectrometer Nicolet iS10, JEOL ECA-500 MHz NMR spectrometer.

Oxidized lignite from the Sarykol deposit was used as the raw material for humate production. The particle-size distribution was characterized by D10 = 2.95 μm, D50 = 63.8 μm, and D90 = 452 μm, with the following characteristics, expressed on a dry basis (wt%): A^d (ash content) 66.09; W^r (total moisture) 5.73; V^d (volatile matter) 17.78 and elements: S 0.71; C 21.01; H 1.68; N 2.09, Na 0.61, Al 0.89, K 0.58, Ca 0.31, Ti 0.22, Fe 1.11, Zr 0.08. The X-ray diffraction phase composition of the sample allowed to distinguish halloysite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), silica (SiO_2), and albite ($NaAlSi_3O_8$).

The preparation of ammonium humate from oxidized coal by an electrophysical process consisted of several stages. First, crushed oxidized Sarykol coal was subjected to intensive oxidation and dispersion in atmospheric oxygen using an RPA at 50 °C. The coal particles were reduced to an ultrafine state and homogenized in the presence of a 3% aqueous ammonia solution for 20 min. After treatment in the RPA, the resulting mass was transferred to extraction tanks and held for 1 h. The aged solution was subsequently subjected to ultrasonic dispersion for 25 min [19].

Shubarkol and Shoptykol coal-based adsorbents (Kazakhstan) and coconut activated carbon Extrasorb GAC (India) were used for the purification of fulvic acid. To obtain fulvic acid, the ammonium humate solution was mixed with a 5% aqueous nitric acid solution and acidified to pH 1–2. The mixture was stirred for 30 min and then centrifuged at 3000 rpm for 30 min to separate humic acids from the fulvic acid fraction. During centrifugation, humic acids precipitated at the bottom, while fulvic acids remained in the aqueous phase. The resulting fulvic acid solution was then subjected to the purification procedure.

Experimental reproducibility and purification conditions. The purification experiments were performed in three independent replicates. In each experiment, 100 mL of the fulvic acid solution was passed through 5.0 g of carbon sorbent (Shubarkol, Shoptykol, or coconut activated carbon), corresponding to a sorbent-to-solution ratio of 50 g/L. The adsorption purification was carried out for 60 min at room temperature under continuous contact with the carbon sorbent.

Following the carbon adsorption stage, the resulting fulvic acid solution was subjected to cation-exchange purification using KU-2-8 cation-exchange resin. Approximately 10 g of KU-2-8 resin was used for 100 mL of solution. The ion-exchange purification was carried out at a flow rate of approximately 1 mL/min for 60 min.

The final purification stage was performed by membrane dialysis. The fulvic acid solution obtained after carbon adsorption and cation-exchange purification was placed in a dialysis membrane and dialyzed against distilled water for 24 h. The dialysis medium was replaced every 4–6 h to maintain the concentration gradient and facilitate the removal of residual inorganic ions and low-molecular-weight impurities.

All analytical measurements were performed in three replicates. The results are expressed as mean ± standard deviation (SD).

Results and discussion. The Shubarkol and Shoptykol sorbents were produced by the Institute of Coal Chemistry and Technology LLP. Their technical and physicochemical characteristics are presented in Table 1.

Table 1 – Characteristics of the coal-based adsorbents from the «Shubarkol» (1) and «Shoptykol» (2) deposits

№;	W^r_t,%	A^r,%	V^d, %	V_{Σ}; (water), cm^3/g	ρ_{bulk}, g/cm^3	$pH_{aqueous\ extract}$	$A_{m.o.}$, mg/g	$A_{m.b.}$, mg/g	A_{iodine}, %	S_{BET}, m^2/g
1	28.52	11.25	12.20	0.58	0.68	9.00	21.0	185.0	40.64	1130.613
2	26.49	24.91	14.94	1.1	0.60	9.18	66.5	210.0	34.29	926.67

Characteristics of coconut activated carbon Extrasorb GAC (12x40) are presented in Table 2.

Content of functional groups of the initial fulvic acid, mmol/g: carboxyl – 0.018; phenolic – 0.571; total

acidity – 0.589. The contents of the functional groups after purification are presented in Table 3. Compared with the initial FA sample, the content of carboxyl groups after purification increased by 5–9 times, while the contents of phenolic groups and total acidity decreased by approximately 3–4 and 1.7–2.4 times, respectively (Table 3).

Table 2 – Characteristics of coconut activated carbon Extrasorb GAC (12x40)

Characteristic	Value
Appearance	black irregular granules
Particle size, mm	
less than 0.425	not more than 3 %
0.425-1.7	not less than 94 %
more than 1.7	not more than 3 %
Adsorption activity for iodine, mg/g	not less than 1000
Total pore volume in water, cm^3/g	0.81
Sorption capacity for methylene blue, mg/g	not less than 240
Abrasion, %	not more than 2
Humidity, %	not more than 5
Ash content, %	not more than 3
Bulk density, g/l	485

Table 3 – Functional groups of samples

№	Name	Carboxyl group, mmol/g	Phenolic group, mmol/g	Total acidity, mmol/g
1	Initial FA before purification	0.018	0.571	0.589
2	FA after purification with coconut activated carbon	0.136	0.157	0.293
3	FA after purification with coconut activated carbon and cation exchanger KU-2-8	0.157	0.148	0.305
4	FA after treatment with coconut activated carbon, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	0.161	0.181	0.342
5	FA after purification with the sorbent Shoptykol	0.106	0.180	0.286
6	FA after purification with the Shoptykol sorbent and the KU-2-8 cation exchanger	0.118	0.163	0.281
7	FA after treatment with Shoptykol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	0.125	0.162	0.287
8	FA after purification with the sorbent Shubarkol	0.089	0.156	0.245
9	FA after purification with the Shubarkol sorbent and the KU-2-8 cation exchanger	0.094	0.193	0.287
10	FA after treatment with Shubarkol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	0.120	0.187	0.307

The results show an increase in the carboxyl-group content after the purification steps, accompanied by a decrease in the phenolic-group content and total acidity. Table 4 shows the pH changes at each stage of fulvic acid purification.

After passing the fulvic acid solution through the KU-2-8 cation exchanger during the second purification

stage, the pH decreased. This decrease may be associated with the release of H^+ ions during cation exchange. At the final purification stage, membrane dialysis resulted in an increase in pH, which indicates the removal of ionic impurities and other low-molecular-weight components from the fulvic acid solution through diffusion into the distilled water.

Fulvic acid obtained with 5% nitric acid and ammonium humate was analyzed for the ionic composition of fulvic acid after the sorbent, after the cation exchanger and after membrane purification (dialysis) on a Dionex ICS-6000 ion chromatograph in the Nazarbayev University laboratory. Samples were filtered using a syringe filter (pore size 0.20 μm). The samples were diluted 100-fold with deionized water with a resistivity of 18.2 MΩ·cm because the concentrations of the analyzed substances were high.

Table 4 – Changes in pH at each stage of fulvic acid purification

№;	Name	pH after sorbent	pH after cation exchanger KU-2-8	pH after membrane dialysis
1	FA after Shubarkol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	0.89	0.47	2.33
2	FA after Shoptykol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	1.09	0.27	2.08
3	FA after coconut activated carbon, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	0.83	0.28	2.75

The concentrations of inorganic ions in the fulvic acid solutions before and after the complete purification procedure are presented in Table 5. The purification efficiency was calculated using the equation:

$$Removal \quad efficiency(\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

where C_0 is the initial concentration of the corresponding ion and C_f is its concentration after purification. The calculated values characterize the decrease in the concentration of inorganic ions in the fulvic acid solution.

Table 5 – Concentrations and removal efficiencies of inorganic ions in fulvic acid samples

Name	Concentration (C), ppm							
	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Initial FA before purification	35.4473	71.4420	23821.9014	57.0635	14.1041	1520.9613	7.8783	50.6674
FA after Shubarkol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis								
FA after purification	14.8971	33.5257	159.5939	10.2114	3.1870	5.0733	1.1816	9.9496
Removal efficiency (%)	57.97	53.07	99.33	82.11	77.40	99.67	85.00	80.36
FA after Shoptykol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis								
FA after purification	17.1516	25.2961	240.1812	13.9942	7.6091	13.0994	0.8539	11.2097
Removal efficiency (%)	51.61	64.59	98.99	75.48	46.05	99.14	89.16	77.88
FA after coconut activated carbon, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis								
FA after purification	34.1742	23.0595	577.3391	23.5595	13.8716	18.8476	1.4937	7.5924
Removal efficiency (%)	3.59	67.72	97.58	58.71	1.65	98.76	81.04	85.02
Commercial fulvic acid product “Golden Elixir” (Bashkortostan)								
FA	12.3768	55295.4308	-	321.1675	17.2597	16734.6703	1.4400	14.8665

A comparison of the three sorbents shows that all investigated purification systems were highly effective in reducing nitrate and potassium ions, with removal efficiencies exceeding 97% in all cases. The highest nitrate and potassium removal efficiencies were obtained using the Shubarkol sorbent, reaching 99.33% and 99.67%, respectively. Shoptykol demonstrated the highest removal efficiency for Mg^{2+} (89.16%) among the investigated sorbents, whereas coconut activated carbon showed the highest removal efficiencies for Ca^{2+}

(85.02%) and SO_4^{2-} (67.72%). At the same time, the lowest removal efficiencies for Cl^- (3.59%) and NH_4^+ (1.65%) were observed for coconut activated carbon. These differences indicate that the physicochemical and porous characteristics of the sorbents may influence their affinity toward individual inorganic ions.

For comparison, the ionic composition of the commercial fulvic acid product "Golden Elixir" from Bashkortostan was also analyzed. The commercial sample contained substantially higher concentrations of SO_4^{2-} and K^+ (55,295.43 and 16,734.67 ppm, respectively) than the purified laboratory samples. The concentrations of SO_4^{2-} in the Shubarkol-, Shoptykol- and coconut-purified samples were 33.53, 25.30 and 23.06 ppm, respectively, while the corresponding K^+ concentrations were 5.07, 13.10 and 18.85 ppm. These results indicate substantially lower residual concentrations of SO_4^{2-} and K^+ in the laboratory-purified samples compared with the commercial sample. However, direct conclusions regarding the overall purity or production technology of the commercial product cannot be made solely on the basis of ionic composition, because commercial and laboratory samples may differ in formulation, concentration and manufacturing process.

Overall, the obtained results demonstrate that the combined purification sequence consisting of carbon sorption, KU-2-8 cation exchange and membrane dialysis effectively reduces the concentrations of major inorganic ions present in the fulvic acid solutions. Among the tested sorbents, Shubarkol showed the highest removal efficiencies for NO_3^- and K^+, while Shoptykol and coconut activated carbon demonstrated higher removal efficiencies for selected ions, particularly Mg^{2+}, SO_4^{2-} and Ca^{2+}. Therefore, Shubarkol and Shoptykol carbon sorbents can be considered promising materials for further investigation of coal-derived fulvic acid purification.

The IR spectrum of the original fulvic acid obtained from ammonium humate is shown in Fig. 1 (1). No pronounced C=O stretching band was observed in the spectrum. Therefore, the contribution of carbonyl-containing groups appears to be relatively low in the initial sample. A broad band at 3230 cm^{-1} can be attributed to O–H stretching vibrations associated with hydrogen bonding. The bands at 1410 and 1338 cm^{-1} may be associated with a combination of O–H bending, CH_2 and CH_3 deformation, C–H bending in alkenes, C–N stretching in carboxamide groups, and symmetric stretching vibrations of the $–COO^-$ group. The absence of a pronounced asymmetric $–COO^-$ stretching band in the 1650–1550 cm^{-1} region should also be noted. The band at 872 cm^{-1} may be assigned to out-of-plane deformation vibrations of C–H groups in substituted aromatic structures.

The IR spectrum of fulvic acid purified using the Shubarkol sorbent is shown in Fig. 1 (2). The spectrum is generally similar to that of the initial fulvic acid, but a distinct C=O stretching band appears at 1716 cm^{-1}, which may be associated with carbonyl groups of carboxylic acids, ketones, or related structures. A band at 1635 cm^{-1} can be attributed to C=C stretching vibrations. Broad absorption in the 3000–3650 cm^{-1} region corresponds to O–H stretching vibrations of different hydroxyl groups. The bands at 1338 and 1417 cm^{-1} may be associated with CH_2 and CH_3 bending vibrations, C–H bending in alkenes, and C–O stretching vibrations.

The IR spectrum of fulvic acid purified using the Shoptykol sorbent is shown in Fig. 1 (3). The spectrum is similar to that obtained after purification with the Shubarkol sorbent; however, the bands at 1716 and 1616 cm^{-1}, corresponding to C=O and C=C stretching vibrations, respectively, are less intense. A broadening of the bands around 1400 cm^{-1}, accompanied by decreased intensity, and in the 1312–1350 cm^{-1} region is also observed. These bands may be associated with CH_2 and CH_3 bending vibrations, C–H bending in alkenes, and C–O stretching vibrations. The band at 1149 cm^{-1} may be attributed to C–O–C stretching vibrations.

The IR spectrum of fulvic acid purified using the coconut activated carbon is shown in Fig. 1 (4). Only a weak broad O–H absorption band is observed in the 3000–3500 cm^{-1} region. Bands at approximately 1700 and 1600 cm^{-1} can be attributed to C=O and C=C stretching vibrations, respectively. The bands in the 1339–1457 cm^{-1} region may be associated with CH_2 and CH_3 bending vibrations, C–H bending in alkenes, and C–O stretching vibrations. The IR spectrum of the commercial fulvic acid product «Golden Elixir» from Bashkortostan shows a broad O–H stretching band in the 3000–3650 cm^{-1} region, associated with hydrogen-bonded hydroxyl groups.

The band at 1713 cm^{-1} may be attributed to C=O stretching vibrations of carboxylic acids, ketones, and related carbonyl-containing structures. The absorption bands in the 1600–1700 cm^{-1} region may include contributions from aromatic C=C stretching and other overlapping vibrations. The bands in the 1390–1100 cm^{-1} region may be associated with CH_2 and CH_3 bending vibrations, C–H bending in alkenes,

symmetric stretching vibrations of –COO^- groups, and C–O stretching vibrations. The band at 1038 cm^{-1} may be attributed to C–O stretching vibrations in polysaccharide or polysaccharide-like structures. The band at 885 cm^{-1} may correspond to out-of-plane C–H deformation vibrations in substituted aromatic structures, while the band at 575 cm^{-1} may be associated with out-of-plane bending vibrations of aromatic –(CH)n– groups.

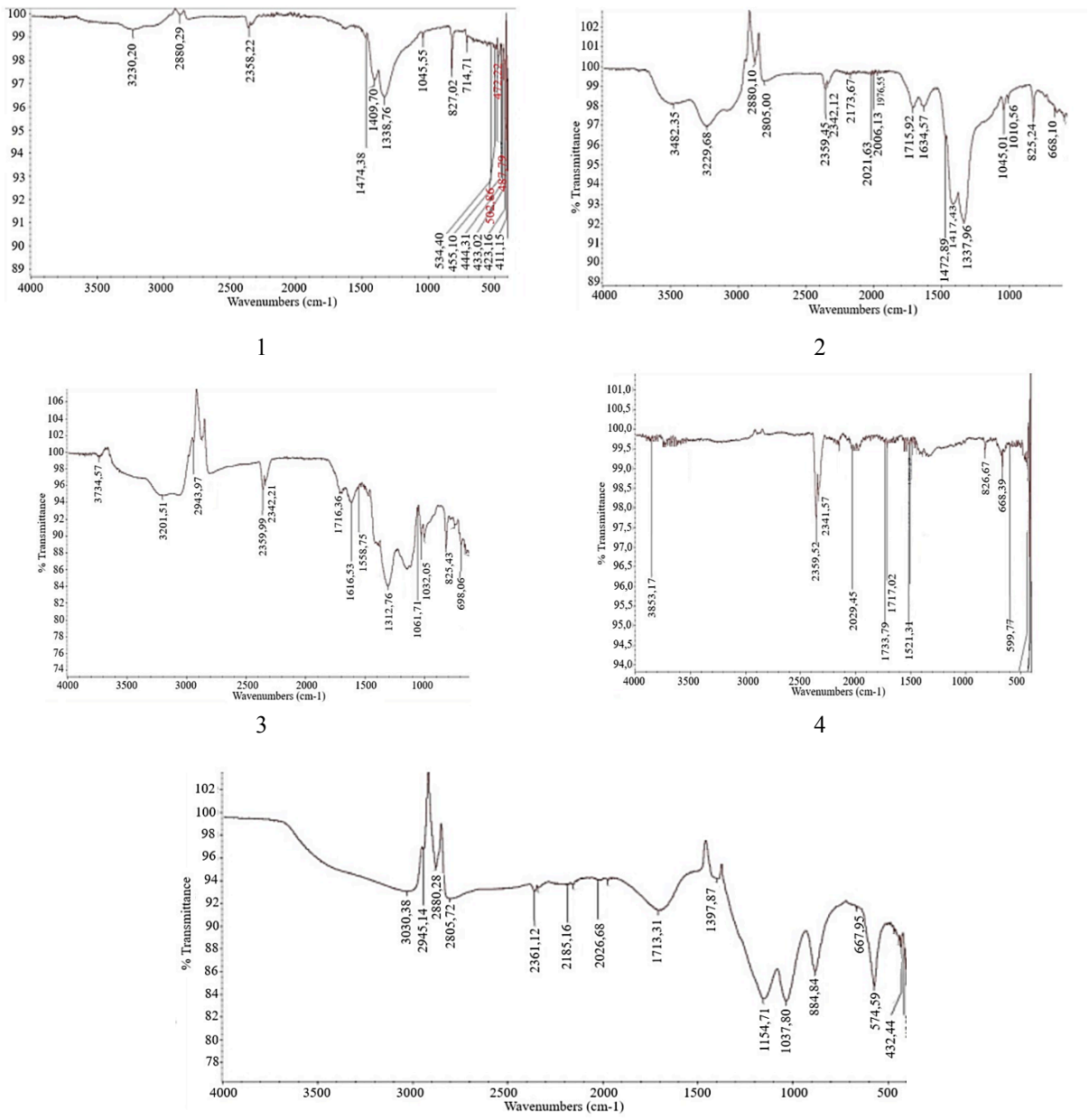


Fig. 1 - FTIR spectra of fulvic acid obtained from ammonium humate: 1 – initial sample; 2 – after purification with Shubarkol sorbent; 3 – after purification with Shoptykol sorbent; 4 – after purification with coconut activated carbon; 5 – commercial fulvic acid product «Golden Elixir» (Bashkortostan).

The ^{1}H NMR spectrum of the initial fulvic acid obtained from ammonium humate was analyzed to identify the main proton environments associated with aliphatic, oxygenated and aromatic structural fragments. NMR analysis of fulvic acid was performed using a JEOL ECA-500 MHz NMR spectrometer. In the ammonium salt sample, intense resonances of aromatic and heteroaromatic protons (6.96-7.18 ppm) are observed in the initial sample (Fig. 2), while resonances in the aliphatic region of the spectrum are significantly less intense, suggesting a relatively high contribution of aromatic and heteroaromatic proton environments. The

use of the Shubarkol sorbent leads to a decrease in the content of polyaromatic groups compared with aliphatic and other functional substituents, and the spectrum contains signals attributable to terminal saturated hydrocarbon groups (0.81-1.52 ppm), aliphatic protons in the α-position to aromatic, alkenyl and carbonyl groups (1.94-2.22 ppm), aliphatic protons in ester groups and in the α-position relative to OH and OR groups, as well as aliphatic OH protons (2.81-3.62 ppm). In the sample after treatment with the Shoptykol sorbent, a similar picture is observed, although the intensity of the signals of aliphatic protons in ester groups and in the α-position to the OH and OR groups, as well as aliphatic OH protons (approximately 3.00-4.00 ppm) is significantly lower compared to the sample after treatment with Shubarkol sorbent. A similar pattern is also observed in the sample treated with coconut activated carbon.

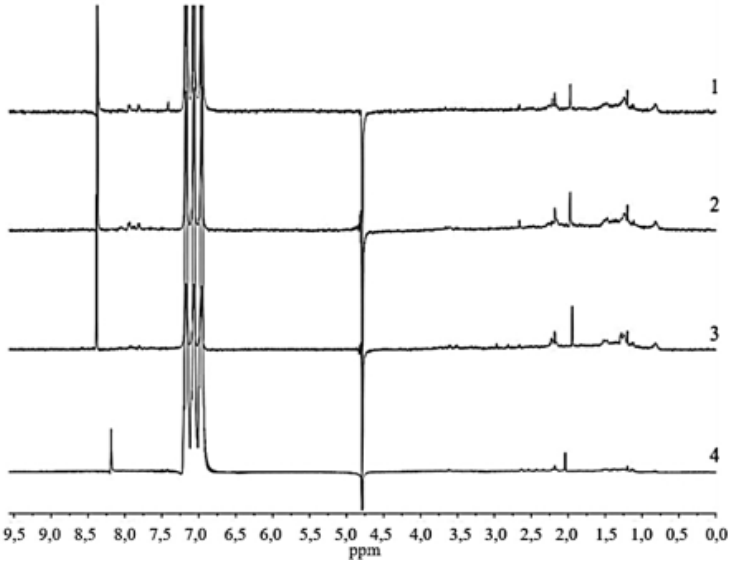


Fig. 2 - Comparison of the H NMR spectra of fulvic acid obtained from ammonium humate: 1 - initial sample 2 - after purification with Shubarkol sorbent 3 - after purification with Shoptykol sorbent 4 - after purification with coconut activated carbon

Compared with the previously described samples, the commercial “Golden Elixir” sample showed (Fig. 3) a higher ratio of aliphatic and O–H signals to aromatic and heteroaromatic signals, particularly in the 3.00–4.00 ppm region.

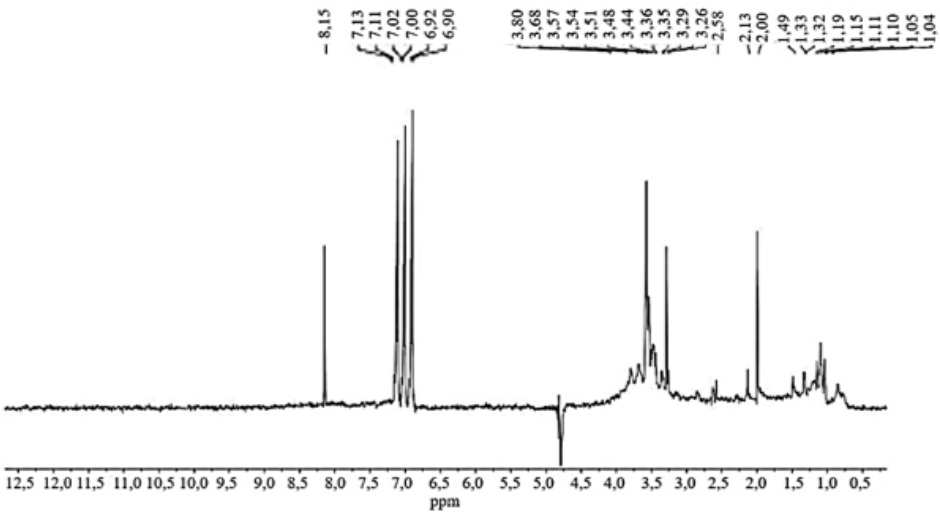


Fig. 3 - H NMR spectra of fulvic acid «Golden Elixir» (Bashkortostan)

Titration curves for the isolated fulvic acid samples were constructed based on pH-metric measurements,

and the pK values were determined using the appropriate equations. Table 6 presents the pK values of fulvic acid purified using different sorbents.

Table 6 – pK values and fulvic acid concentrations

№;	Name	pK values	Concentration, mg/l
1	Initial FA before purification	7.58	120
2	FA after Shubarkol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	7.97	100
3	FA after Shoptykol sorbent, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	6.77	103
4	FA after coconut activated carbon, cation exchanger KU-2-8 and membrane dialysis	12.49	101

The obtained titration data indicate that the purification procedure affected the acid–base properties of the fulvic acid samples. The initial FA showed a pK value of 7.58, while after sequential purification with carbon sorbents, KU-2-8 cation-exchange resin, and membrane dialysis, the pK values were 7.97, 6.77, and 12.49 for Shubarkol, Shoptykol, and coconut activated carbon, respectively. These differences may be related to changes in the relative contribution of ionizable functional groups and the removal of inorganic ions and low-molecular-weight compounds during purification.

The initial FA concentration was 120 mg/L, while the purified samples contained 100, 103, and 101 mg/L for Shubarkol, Shoptykol, and coconut activated carbon, respectively. Thus, approximately 83–86% of the initial FA concentration was retained after purification, indicating relatively low losses of the target fraction. The similar final concentrations demonstrate comparable purification performance of the investigated sorbents, while their different pK values indicate differences in the acid–base characteristics of the resulting FA fractions.

Spectral analysis showed characteristic absorption maxima at 360, 450, 610, and 800 nm in the 320–1000 nm range. These spectral features reflect the chromophoric structures of fulvic substances and provide additional evidence of changes in their chemical characteristics following purification.

Conclusion. A comparative purification study of fulvic acid obtained from ammonium humate was performed using Shubarkol, Shoptykol, and coconut activated carbon, followed by KU-2-8 cation exchange and membrane dialysis. The results demonstrated that the combined purification procedure substantially reduced the concentrations of major inorganic ions while retaining 83–86% of the initial fulvic acid concentration.

Shubarkol showed the highest removal efficiencies for NO_3^- and K^+, reaching 99.33% and 99.67%, respectively. Shoptykol demonstrated the highest removal of Mg^{2+} (89.16%), whereas coconut activated carbon showed the highest removal of SO_4^{2-} (67.72%) and Ca^{2+} (85.02%). FTIR and ^1H NMR analyses indicated changes in the relative contributions of functional groups and structural fragments. The pK values also changed after purification, indicating differences in the acid–base characteristics of the resulting FA fractions.

Overall, the combination of carbon adsorption, KU-2-8 cation-exchange treatment, and membrane dialysis can be considered an effective approach for the purification of fulvic acid obtained from ammonium humate. Shubarkol and Shoptykol sorbents demonstrated particularly promising performance and can be considered for further development and optimization of FA purification processes.

Acknowledgement. *This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR34637102 "Development and implementation of technology for the integrated transformation of coal and coal waste, aimed at ensuring sustainable development and improving environmental safety").*

References

1. Romarıs-Hortas V, Moreda-Pineiro A, Bermejo-Barrera P. Application of microwave energy to speed up the alkaline extraction of humic and fulvic acids from marine sediments//Anal Chim Acta.- 2007.- Vol.602(2). -P. 202–210. DOI 10.1016/ j.aca.2007.09.022.

2. Tsuda K, Mori H, Asakawa D, Yanagi Y, Kodama H, Nagao S, Yonebayashi K, Fujitake, N. Characterization and grouping of aquatic fulvic acids isolated from clear-water rivers and lakes in Japan//Water Res.-;2010.-Vol. 44(13). - P.3837–3846. DOI 10.1016/j.watres.2010.04.038.
3. Gong G, Xu L, Zhang Y, Liu W, Wang M, Zhao Y, Yuan X, Li Y. Extraction of fulvic acid from lignite and characterization of its functional groups//ACS Omega.- 2020.-Vol.5(43). -P.27953–27961. DOI 10.1021/acsomega.0c03388.
4. Md.Zahidul, Islam, Aynur Manzak, Yasemin Yıldız, Yavuz Derin, RaşitF, Yılmaz, M. Shahinuzzaman, Ahmet Tutar. An efficient technique for the purification of fulvic acid extracted from leonardite//Chemical Engineering Communications.- 2023.- Vol.210(7). - P.1223-1233. DOI 10.1080/00986445.2023.2185516.
5. Hricikova S., Kožárová I., Hudakova N., Reitznerova A., Nagy J., Marcinčák S. Humic substances as a versatile intermediary//Life.-2023.-Vol.13(4):858. DOI 10.3390/life13040858.
6. Bezuglova O. S., Gorovtsov A. V., Polienko E. A., Zinchenko V. E., Grinko A. V., Lykhman V. A., Demidov A. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress//Journal of Soils and Sediments.- 2019.- 19(6).- P.2665-2675. DOI: 10.1007/s11368-018-02240-z.
7. Zhao Q., Yang Y., Qiu X., Yang B., Zhao D., Zhang W., Su X. Humic acid: research progress in its structural properties, sources, preparation and application//Scientia Sinica Chimica.- 2023.- Vol.53(8). - P.1437-1454. DOI 10.1360/SSC-2023-0080.
8. Coles C. A., Yong R. N. Humic acid preparation, properties and interactions with metals lead and cadmium//Engineering Geology.- 2006.-Vol.85(1-2). - P. 26-32. DOI 10.1016/j.enggeo.2005.09.024.
9. Ferro-Garcia M. A., Rivera-Utrilla J., Bautista-Toledo I., Moreno-Castilla C. Adsorption of humic substances on activated carbon from aqueous solutions and their effect on the removal of Cr (III) ions// Langmuir.- 1998.-Vol. 14(7). -P.1880-1886. DOI 10.1021/la970565h.
10. Lorenc-Grabowska E., Gryglewicz G. Adsorption of lignite-derived humic acids on coal-based mesoporous activated carbons// Journal of Colloid and Interface Science.- 2005.-Vol.284(2). -P. 416-423. DOI 10.1016/j.jcis.2004.10.031.
11. Klimenko N. A., Savchina L. A., Polyakova T. V., Kazdobin K. A. Impact of inorganic water impurities on adsorption of fulvic acids by activated carbon//Journal of Water Chemistry and Technology.-2011.-Vol. 33(3). -P. 153-159. DOI 10.3103/S1063455X11030040.
12. Zhang L., Luo L., Zhang S. Integrated investigations on the adsorption mechanisms of fulvic and humic acids on three clay minerals//Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.- 2012.-Vol.406.-P.84-90. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2012.05.003. [In English]
13. Ko I., Kim J. Y., Kim K. W. Adsorption properties of soil humic and fulvic acids by hematite. Chemical Speciation & Bioavailability, 2005, 17(2), 41-48. DOI 10.3184/095422905782774928.
14. Weng Van Riemsdijk W. H., Koopal L. K., Hiemstra, T. Adsorption of humic substances on goethite: comparison between humic acids and fulvic acids//Environmental science & technology.- 2006.-Vol.40(24). -P.7494-7500. DOI 10.1021/es060777d.
15. Yermagambet B.T., Kazankapova M.K., Kassenova Zh.M., Malgazhdarova A.B., Rychlewska K. Obtaining and purification of fulvic acids from oxidized coal. Book of Abstracts of the Seventh International Conference of the CIS IHSS on Humic Innovative Technologies “Humic substances and technologies for resilience” (HIT-2022), Moscow, Russia, November 18–21, 2022, p. DOI: 10.36291/HIT.2022.004.
16. Kazankapova M.K., Yermagambet B.T., Malgazhdarova A.B., Kassenova Zh.M. Analysis of the composition of fulvic acid isolated from oxidized brown coal. Book of Abstracts of the Ninth International Conference of the CIS IHSS on Humic Innovative Technologies “Humic substances and green technologies” (HIT-2024), October 25–28, 2024, p. 17.
17. Kazankapova M.K., Yermagambet B.T., Malgazhdarova A.B., Kassenova Zh.M., Beisembaeva K.A., Rychlewska K.I. Isolation of Fulvic Acid from Coal and Study of Physical and Chemical Properties. Vestnik KazUTB, 2024, No. 1(22), pp. 158–164. DOI: 10.58805/kazutb.v.1.22-204.
18. Kazankapova M.K., Yermagambet B.T., Malgazhdarova A.B., Kassenova Zh.M., Jakupova Zh.E. Study of the Physicochemical Properties of Fulvic Acid Solutions. Vestnik KazUTB, 2025, No. 1(26), pp. 161–168. DOI: 10.58805/kazutb.v.1.26-660.

19. Toleukhanuly Y. B., Kuttybaevna K. M., Muratbekovna K. Z., Turlangyzy N. A. Obtaining Derivatives of Humic Substances from Oxidized Coal and Study of Physico-Chemical and Adsorption Properties//Academic Scientific Journal of Chemistry.-2020.-Vol.6(444).- P.57-64. DOI 10.32014/2020.2518-1491.98.

Information about the authors

Kazankapova M.K. - PhD in Philosophy, Associate Professor, Academician of KazNANS, Leading Researcher, Deputy Director for Science and Innovation of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", Astana, Kazakhstan, e-mail: maira_1986@mail.ru;

Yermagambet B.T. - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of KazNANS, Project Manager, Chief Researcher, Director of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", Astana, Kazakhstan, e-mail: coaltech@bk.ru;

Malgazhdarova A.B. - Senior Researcher, Head of Laboratory «Institute of Coal Chemistry and Technology», Master of Natural Science, Astana, Kazakhstan, e-mail: malgazhdarova.ab@mail.ru;

Kassenova Zh.M. - Candidate of Chemical Sciences (PhD), Associate Professor, Member of KazNANS, Leading Researcher, Deputy Director for Commercialization of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", Astana, Kazakhstan, e-mail: zhanar_k_68@mail.ru;

Kozhamuratova U.M. – Senior Researcher, scientific secretary «Institute of Coal Chemistry and Technology», Master of Natural Science, Astana, Kazakhstan, e-mail: kozhamuratova.u@mail.ru;

Akshekina A.S. – Junior Researcher «Institute of Coal Chemistry and Technology», Bachelor of Natural Science, Astana, Kazakhstan, e-mail: akshekina11@gmail.com;

Bekbosynov A.B. – Junior Researcher «Institute of Coal Chemistry and Technology», Master of Information Technology, Astana, Kazakhstan, e-mail: adeka_mega@mail.ru.

Сведения об авторах

Казанкапова М.К. - PhD, асс. профессор, академик КазНАЕН, ведущий научный сотрудник, заместитель директора по науке и инновациям ТОО «Институт химии и технологии угля», Астана, Казахстан, e-mail: maira_1986@mail.ru;

Ермагамбет Б.Т. - доктор химических наук, профессор, академик КазНАЕН, руководитель проекта, главный научный сотрудник, директор ТОО «Институт химии и технологии угля», Астана, Казахстан, e-mail: coaltech@bk.ru;

Малғаждарова А.Б. - старший научный сотрудник, заведующий лабораторией ТОО «Институт химии угля и технологии», магистр естественных наук, Астана, Казахстан, e-mail: malgazhdarova.ab@mail.ru;

Касенова Ж.М. - кандидат химических наук (PhD), асс. профессор, член КазНАЕН, ведущий научный сотрудник, заместитель директора по коммерциализации ТОО «Институт углехимии и технологии», Астана, Казахстан, e-mail: zhanar_k_68@mail.ru;

Қожамұратова Ұ.М. - старший научный сотрудник, ученый секретарь ТОО «Институт химии угля и технологии», магистр естественных наук, Астана, Казахстан, e-mail: kozhamuratova.u@mail.ru;

Акшекина Ә.С. - младший научный сотрудник ТОО «Институт химии угля и технологии», бакалавр естественных наук, Астана, Казахстан, e-mail: akshekina11@gmail.com;

Бекбосынов Ә.Б. – младший научный сотрудник ТОО «Институт химии угля и технологии», магистр информационных технологий, Астана, Казахстан, e-mail: adeka_mega@mail.ru.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-20

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА ИЗ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА КАК КОМПОНЕНТА ТОПЛИВА

А.Т. Джасакбаев[1]✉, З.Б. Сұлтамұратова[1], Ж.К. Карешова[1], А.К. Жумабекова[2]

Received: 20 April 2026
Accepted: 24 June 2026
Published: 30 September 2026
Citation: A.T. Jassakbayev, et al. « ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА ИЗ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА КАК КОМПОНЕНТА ТОПЛИВА ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-20
License CC BY 4.0

[1] *НАО «Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева», Атырау, Казахстан*
[2] *Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан*
✉ *Корреспондент-автор: alikhanjassakbayev@gmail.com*

В статье рассмотрены перспективы использования пиролизного масла, полученного из отходов полиэтилена, в качестве компонента жидкого топлива. Актуальность работы обусловлена ростом объёмов пластиковых отходов, низким уровнем их переработки и необходимостью разработки технологий, позволяющих одновременно снижать экологическую нагрузку и возвращать углеродсодержащее сырьё во вторичный хозяйственный оборот. На основе анализа литературных данных изучены особенности пиролиза полиэтиленовых отходов, влияние технологических параметров на выход жидкой фракции, а также физико-химические свойства образующегося пиролизного масла. Показано, что температура процесса, скорость нагрева и состав исходного сырья оказывают существенное влияние как на выход жидкого продукта, так и на его качественные характеристики. Установлено, что пиролизное масло обладает высокой теплотворной способностью и рядом свойств, близких к характеристикам традиционных жидких топлив, в том числе дизельного топлива и бензиновых фракций. Вместе с тем выявлено, что его прямое использование ограничивается широким фракционным составом, нестабильностью отдельных эксплуатационных показателей и необходимостью дополнительной подготовки перед практическим применением. Отмечено, что наиболее перспективным направлением является использование пиролизного масла после предварительной обработки, прежде всего после дистилляции, а также в составе смесевых топлив. Сделан вывод, что пиролиз отходов полиэтилена представляет собой перспективное направление химического рециклинга, сочетающее решение экологических задач по сокращению объёмов пластиковых отходов с возможностью получения ценных жидких углеводородных продуктов для дальнейшего топливного и химического использования.

Ключевые слова: полиэтилен, пластиковые отходы, пиролиз, пиролизное масло, жидкое топливо, химическая переработка, дистилляция, дизель, бензин.

ПОЛИЭТИЛЕН ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН ПИРОЛИЗ МАЙЫН ОТЫН КОМПОНЕНТІ РЕТІНДЕ ПАЙДАЛАНУДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

А.Т.Джасакбаев[1]✉, З.Б. Сұлтамұратова[1], Ж.К. Карешова[1], А.К. Жумабекова[2]

[1] *«Сафи Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КЕАҚ, Атырау, Қазақстан*
[2] *Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан*
✉ *e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com*

Мақалада полиэтилен қалдықтарынан алынған пиролиз майын сұйық отын

компоненті ретінде пайдаланудың перспективалары қарастырылған. Жұмыстың өзектілігі пластик қалдықтары көлемінің өсуімен, оларды қайта өңдеу деңгейінің төмен болуымен және экологиялық жүктемені азайтып, көміртекқұрамды шикізатты екінші реттік шаруашылық айналымға қайтаруға мүмкіндік беретін технологияларды әзірлеу қажеттілігімен айқындалады. Әдеби деректерді талдау негізінде полиэтилен қалдықтарының пиролиз ерекшеліктері, технологиялық параметрлердің сұйық фракция шығымына әсері, сондай-ақ алынған пиролиз майының физика-химиялық қасиеттері зерттелді. Процесс температурасы, қыздыру жылдамдығы және бастапқы шикізат құрамы сұйық өнімнің шығымына да, оның сапалық сипаттамаларына да елеулі әсер ететіні көрсетілді. Пиролиз майының жоғары жылу бөлу қабілетіне ие екені және оның қасиеттерінің бірқатары дәстүрлі сұйық отындардың, соның ішінде дизель отыны мен бензин фракцияларының қасиеттеріне жақын екені анықталды. Сонымен қатар, оны тікелей пайдалану кең фракциялық құрамымен, кейбір пайдалану көрсеткіштерінің тұрақсыздығымен және практикалық қолдану алдында қосымша өңдеу қажеттілігімен шектелетіні анықталды. Ең перспективалы бағыт ретінде пиролиз майын алдын ала дайындағаннан кейін, ең алдымен дистилляциядан соң, сондай-ақ аралас отындар құрамында пайдалану көрсетілген. Полиэтилен қалдықтарының пиролизі пластик қалдықтарының көлемін азайтуға бағытталған экологиялық мәселелерді шешуді әрі одан әрі отындық және химиялық мақсатта пайдалануға болатын бағалы сұйық көмірсутек өнімдерін алуды ұштастыратын химиялық қайта өңдеудің перспективалы бағыты болып табылады деген қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: полиэтилен, пластик қалдықтары, пиролиз, пиролиз майы, сұйық отын, химиялық қайта өңдеу, дистилляция, дизель, бензин.

PROSPECTS FOR USING PYROLYSIS OIL FROM POLYETHYLENE WASTE AS A FUEL COMPONENT

A.T. Jassakbayev[1]✉, Z. B.Sultamuratova[1], Z. K. Kareshova[1], A.K. Zhumabekova[2]

[1] *"Safi Utebaev Atyrau University of Oil and Gas" NJSC, Atyrau, Kazakhstan,*
[2] *K. Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan,*
✉ *e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com*

The article examines the prospects for using pyrolysis oil obtained from polyethylene waste as a component of liquid fuel. The relevance of the study is determined by the growing volume of plastic waste, the low level of its recycling, and the need to develop technologies capable of simultaneously reducing environmental impact and returning carbon-containing raw materials to secondary economic circulation. Based on an analysis of literature data, the features of polyethylene waste pyrolysis, the influence of technological parameters on the yield of the liquid fraction, and the physicochemical properties of the resulting pyrolysis oil were studied. It is shown that the process temperature, heating rate, and composition of the feedstock have a significant effect both on the yield of the liquid product and on its quality characteristics. It was found that pyrolysis oil has a high calorific value and a number of properties close to those of conventional liquid fuels, including diesel fuel and gasoline fractions. At the same time, it was revealed that its direct use is limited by a wide fractional composition, instability of certain performance indicators, and the need for additional treatment before practical application. It is noted that the most promising direction is the use of pyrolysis oil after preliminary treatment, primarily after distillation, as well as as a component of blended fuels. It is concluded that the pyrolysis of polyethylene waste is a promising direction of chemical recycling, combining the solution of environmental problems associated with reducing plastic waste volumes with the possibility of obtaining valuable liquid hydrocarbon products for further fuel and chemical use.

Keywords: polyethylene, plastic waste, pyrolysis, pyrolysis oil, liquid fuel, chemical recycling, distillation, diesel, gasoline.

Введение. Проблема накопления пластиковых отходов сохраняет глобальный характер. По данным современного глобального анализа жизненного цикла пластмасс, в 2022 году мировое производство пластика составило около 400 млн тонн, при этом лишь около 9.5% этого объёма было произведено из вторичного сырья. Основная часть первичных пластмасс по-прежнему производится из ископаемых ресурсов, прежде всего угля, нефти и природного газа. Производство пластмасс демонстрирует устойчивый рост: если в 1950 году оно составляло около 2 млн тонн в год, то к 2022 году достигло 400 млн тонн, а к 2050 году, по прогнозам, может удвоиться. Одновременно уровень фактической пе-

реработки пластиковых отходов остаётся низким: по оценкам, в 2022 году глобальный уровень переработки составил около 9%, тогда как значительная часть отходов была направлена на сжигание или захоронение. В этих условиях особую актуальность приобретают технологии, способные не только снижать объёмы накопления пластиковых отходов, но и возвращать ценные углеводородные компоненты в промышленный оборот. [1].

Несмотря на развитие систем сбора и сортировки отходов, уровень фактической переработки пластмасс остаётся низким. По современным оценкам, в 2022 году из общего объёма пластиковых отходов лишь около 38 млн тонн были реально переработаны, что соответствует примерно 9% от объёма первичного на сжигание или захоронение, что сопровождается потерей ценного углеродсодержащего сырья и усилением негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим всё большую актуальность приобретают технологии, ориентированные не только на утилизацию пластиковых отходов, но и на их преобразование в полезные продукты [2].

Одним из наиболее перспективных направлений химической переработки пластиковых отходов считается пиролиз. Современные обзорные исследования рассматривают его как технологию, способную превращать пластиковые отходы в ценные продукты, включая жидкие углеводороды, химическое сырьё и топливные компоненты. По литературным данным, пиролиз пластиковых отходов может обеспечивать высокий выход жидкой фракции, а для полиэтиленсодержащего сырья этот подход особенно интересен вследствие значительного содержания углеводородных соединений, пригодных для дальнейшего энергетического или химического использования [3-4].

Особый интерес представляет переработка отходов полиэтилена, поскольку данный полимер является одним из наиболее распространённых компонентов пластиковых отходов и при термическом разложении способен образовывать значительное количество жидких продуктов. Получаемое пиролизное масло рассматривается как потенциальный компонент жидкого топлива, однако возможность его практического применения определяется не только выходом продукта, но и его физико-химическими свойствами, стабильностью состава, фракционным распределением и соответствием требованиям к традиционным топливам. Поэтому исследование свойств пиролизного масла из отходов полиэтилена и оценка перспектив его использования в качестве топливного компонента представляют как научный, так и прикладной интерес [5].

Несмотря на значительное количество публикаций по пиролизу пластиковых отходов, литературные данные по переработке полиэтилена остаются неоднородными. В отдельных исследованиях различаются состав сырья, температурные режимы, давление, конструкции реакторов, применяемые катализаторы и способы подготовки жидкого продукта. Это затрудняет прямое сопоставление полученных результатов и однозначную оценку перспектив использования пиролизного масла в топливных целях. Научная ценность настоящего обзора заключается в систематизации данных о взаимосвязи между условиями пиролиза полиэтиленовых отходов, свойствами получаемого масла, необходимостью его последующей подготовки и возможными направлениями практического применения.

Цель исследования - оценить возможность использования пиролизного масла, полученного из отходов полиэтилена, в качестве компонента жидкого топлива на основе анализа литературных данных о выходе продукта, его физико-химических свойствах и ограничениях практического применения [6].

Задачи исследования:

1. Рассмотреть пиролиз отходов полиэтилена как способ получения жидких углеводородных продуктов.
2. Проанализировать влияние технологических параметров на выход жидкой фракции.
3. Изучить основные физико-химические свойства пиролизного масла из полиэтилена.
4. Сопоставить характеристики получаемого продукта с показателями традиционных жидких топлив.
5. Оценить перспективы и ограничения использования пиролизного масла в качестве компонента топливных композиций.
6. Рассмотреть влияние типа реактора, давления и природы катализатора на распределение продуктов пиролиза.
7. Проанализировать экологические, экономические и технологические ограничения промышленного внедрения процесса.
8. Сопоставить пиролиз с альтернативными методами обращения с пластиковыми отходами.

Материалы и методы. Настоящая работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование с элементами структурированного литературного

поиска. Для подготовки обзора использовались научные статьи, обзорные публикации, официальные аналитические отчёты и открытые материалы, посвящённые пиролизу пластиковых отходов с преимущественным акцентом на переработку полиэтилена низкой, высокой и линейной низкой плотности.

Поиск научной литературы проводился с использованием электронных научных платформ и репозиториев RSC Publishing, MDPI, ScienceDirect, PubMed Central (PMC), Digital.CSIC, UCL Discovery, OSUVA, JRC Publications Repository и Nottingham ePrints. Основу обзора составили публикации за период 2018–2026 гг., при этом приоритет отдавался современным исследованиям 2020–2026 гг. Дополнительно для анализа реальных примеров промышленного внедрения использовались официальные материалы компаний Plastic Energy, OMV и Neste.

Поиск выполнялся с использованием сочетаний ключевых слов на английском языке: polyethylene waste pyrolysis, HDPE pyrolysis, LDPE pyrolysis, LLDPE pyrolysis, plastic pyrolysis oil, fuel component, temperature, pressure, catalyst, reactor type, distillation, hydrotreatment, diesel blend, life cycle assessment, techno-economic assessment, industrial plastic pyrolysis и chemical recycling. Дополнительно рассматривались публикации по пиролизу смешанных пластиковых отходов в тех случаях, когда их результаты позволяли оценить общие закономерности процесса или сопоставить поведение различных полимеров.

В обзор включались источники, содержащие сведения об условиях проведения пиролиза, составе исходного сырья, температуре, давлении, скорости нагрева, времени пребывания продуктов в реакционной зоне, конструкции реактора, наличии и типе катализатора, распределении жидких, газообразных и твёрдых продуктов, а также физико-химических свойствах получаемого пиролизного масла. Отдельно анализировались способы подготовки жидкого продукта к практическому применению, включая дистилляцию, гидрообработку и смешение с традиционными нефтяными топливами.

При отборе экологических и экономических материалов учитывались исследования, содержащие оценку жизненного цикла, сведения об энергопотреблении процесса, затратах на подготовку сырья, масштабировании установок и интеграции пиролиза с нефтеперерабатывающей или нефтехимической инфраструктурой. Материалы корпоративных сайтов использовались только для описания конкретных действующих или демонстрационных промышленных объектов и не рассматривались как единственная доказательная база при оценке эффективности технологии.

Систематизация литературных данных проводилась по следующим направлениям: влияние температуры, давления и катализаторов на выход и состав продуктов; сопоставление различных типов реакторов; сравнительный анализ физико-химических свойств пиролизного масла и традиционных топлив; способы облагораживания жидкого продукта; экологические и экономические аспекты; ограничения технологии; реальные примеры промышленного внедрения. При сравнении результатов учитывались различия в составе сырья и экспериментальных условиях, поскольку данные отдельных исследований не всегда могут быть непосредственно сопоставлены между собой.

Обсуждение и результаты. Пиролиз отходов полиэтилена как способ получения жидкого топливного продукта. Обобщённая принципиальная схема получения пиролизного масла из отходов полиэтилена представлена на рисунке 1.

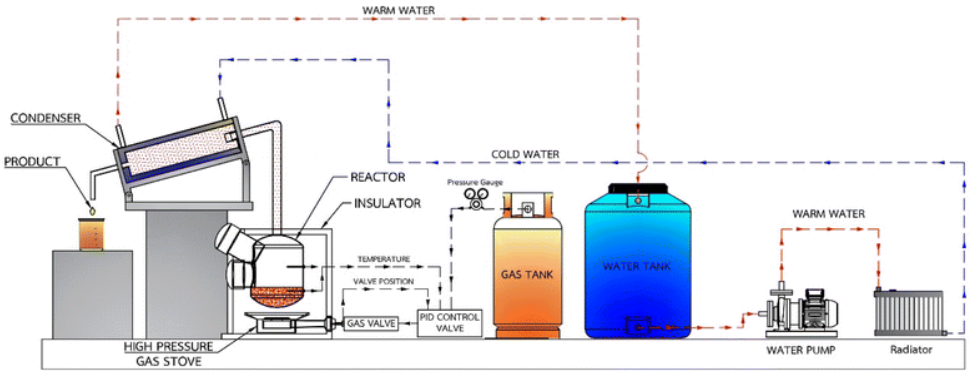


Рис. 1 - Принципиальная схема производства пиролизного масла из отходов полиэтилена

Согласно рисунку 1, схема отражает основные стадии процесса, включающие термическое разло-

жение полимерного сырья в реакторе, транспортировку парогазовой смеси, её охлаждение в конденсационной системе и получение жидкого продукта. Использование данной схемы позволяет обобщить технологическую последовательность получения пиролизного масла и служит основой для дальнейшего анализа его свойств и направлений применения [7].

Сравнительная оценка проводилась по наиболее значимым показателям, определяющим возможность топливного применения продукта: выход жидкой фракции, плотность, кинематическая вязкость, теплотворная способность, температура вспышки и характер углеводородного состава. Дополнительно учитывались данные о необходимости последующей доочистки, дистилляции или гидрообработки пиролизного масла перед его использованием в двигателях или топливных смесях [8].

Пиролиз представляет собой термическое разложение органического сырья в отсутствие кислорода. В обзоре 2025 года для пластиковых отходов указывается, что процесс обычно протекает в диапазоне примерно 455-700°C, а на распределение продуктов существенно влияют температура, время пребывания, скорость нагрева, состав сырья и наличие катализатора. Для полиэтилена это направление особенно интересно, поскольку полимерная цепь состоит преимущественно из углеводородных фрагментов, способных при термическом разложении переходить в жидкие топливоподобные продукты [3, 9].

Термическое разложение полиэтилена протекает по радикальному механизму. На начальной стадии происходит разрыв связей C-C в макромолекулярной цепи с образованием более коротких углеводородных фрагментов и свободных радикалов.

Последующие реакции включают дальнейшее расщепление цепей, внутримолекулярные и межмолекулярные превращения, а также образование более стабильных жидких и газообразных углеводородов. При повышении температуры интенсивность вторичных реакций возрастает, вследствие чего часть жидких продуктов дополнительно разлагается с увеличением выхода газообразной фракции [10].

Как видно из рисунка 2, скорость нагрева оказывает влияние на температурные интервалы и характер разложения полимерного сырья, что необходимо учитывать при выборе режима пиролиза.

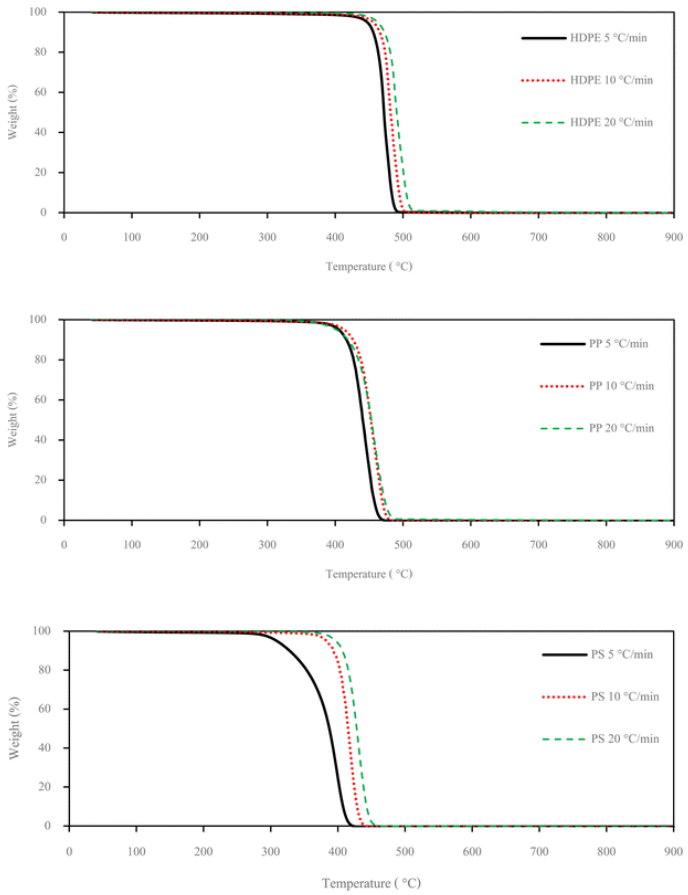


Рис. 2 - Кривые разложения пластикового сырья при разных скоростях нагрева

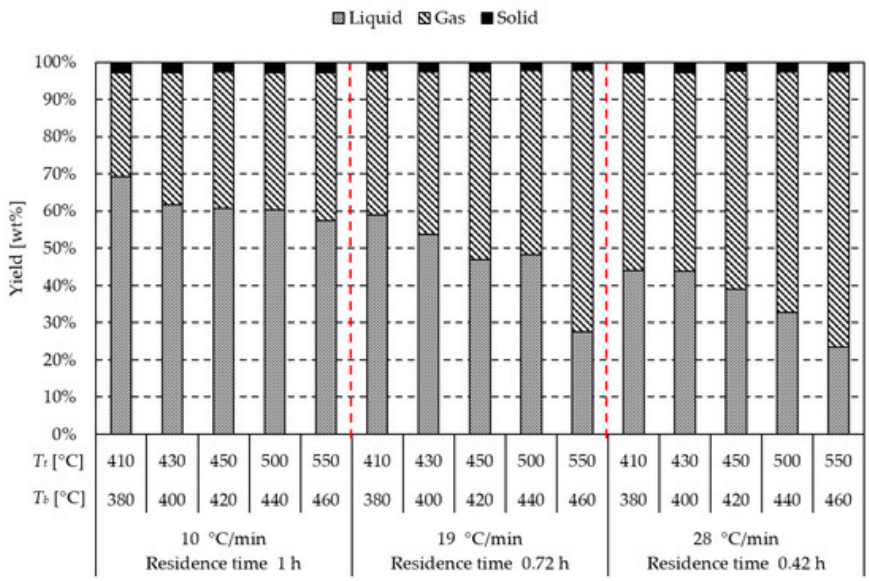


Рис. 3 – Влияние температуры и скорости нагрева на выход продуктов пиролиза

Из рисунка 3, более низкая температура и меньшая скорость нагрева, соответствующая большему времени пребывания, способствуют увеличению выхода жидкого продукта, тогда как ужесточение режима приводит к росту газообразной фракции. Следовательно, получение пиролизного масла определяется не только природой полимерного сырья, но и выбранными технологическими условиями процесса.

По литературным данным, именно полиэтилен часто обеспечивает высокий выход жидкой фракции. Например, в исследовании пяти распространённых типов пластиков максимальный выход жидкого продукта для HDPE достигал 82%, тогда как для LDPE он составил около 58%. При этом теплотворная способность полученных продуктов находилась на уровне 45.9-46.2 МДж/кг, что близко к значениям традиционного дизельного топлива и бензина [8].

В то же время выход масла зависит не только от типа полимера, но и от режима процесса. На примере смеси пластиков показано, что повышение температуры или уменьшение времени пребывания паров снижает выход жидкого продукта и увеличивает выход газов. В указанной работе максимальный выход масла составил 69% при 410°C и скорости нагрева 10°C/мин, что подтверждает важность оптимизации режима пиролиза [11].

Для объяснения зависимости распределения продуктов от температурного режима необходимо учитывать механизм термического разложения полиэтилена. На рисунке 4 представлена схема последовательных превращений полиэтиленовой цепи при пиролизе [10].

Как видно из рисунка 4, первичной стадией процесса является разрыв связей C-C в макромолекулярной цепи с образованием более коротких углеводородных фрагментов и свободных радикалов. Последующие превращения приводят к формированию жидких углеводородов, воскообразных продуктов и газообразных соединений. При ужесточении температурного режима усиливается вторичный крекинг уже образовавшихся жидких компонентов, что сопровождается увеличением выхода газа [10].

Влияние катализаторов, давления и температурных условий на процесс пиролиза полиэтиленовых отходов. Выход и состав продуктов пиролиза полиэтиленовых отходов в значительной степени определяются условиями проведения процесса. По данным современного обзора, для пластиковых отходов в целом пиролиз обычно протекает в диапазоне 455-700°C, а на распределение жидких, газообразных и твёрдых продуктов наиболее существенно влияют температура, время, состав сырья, тип реактора и выбор катализатора. Оптимизация этих параметров рассматривается как один из ключевых путей повышения выхода жидкой фракции и улучшения качества получаемого пиролизного масла [9].

В зависимости от наличия катализатора пиролиз пластиковых отходов подразделяется на термический и каталитический. Принципиальные различия между двумя вариантами процесса представлены на рисунке 5 [12].

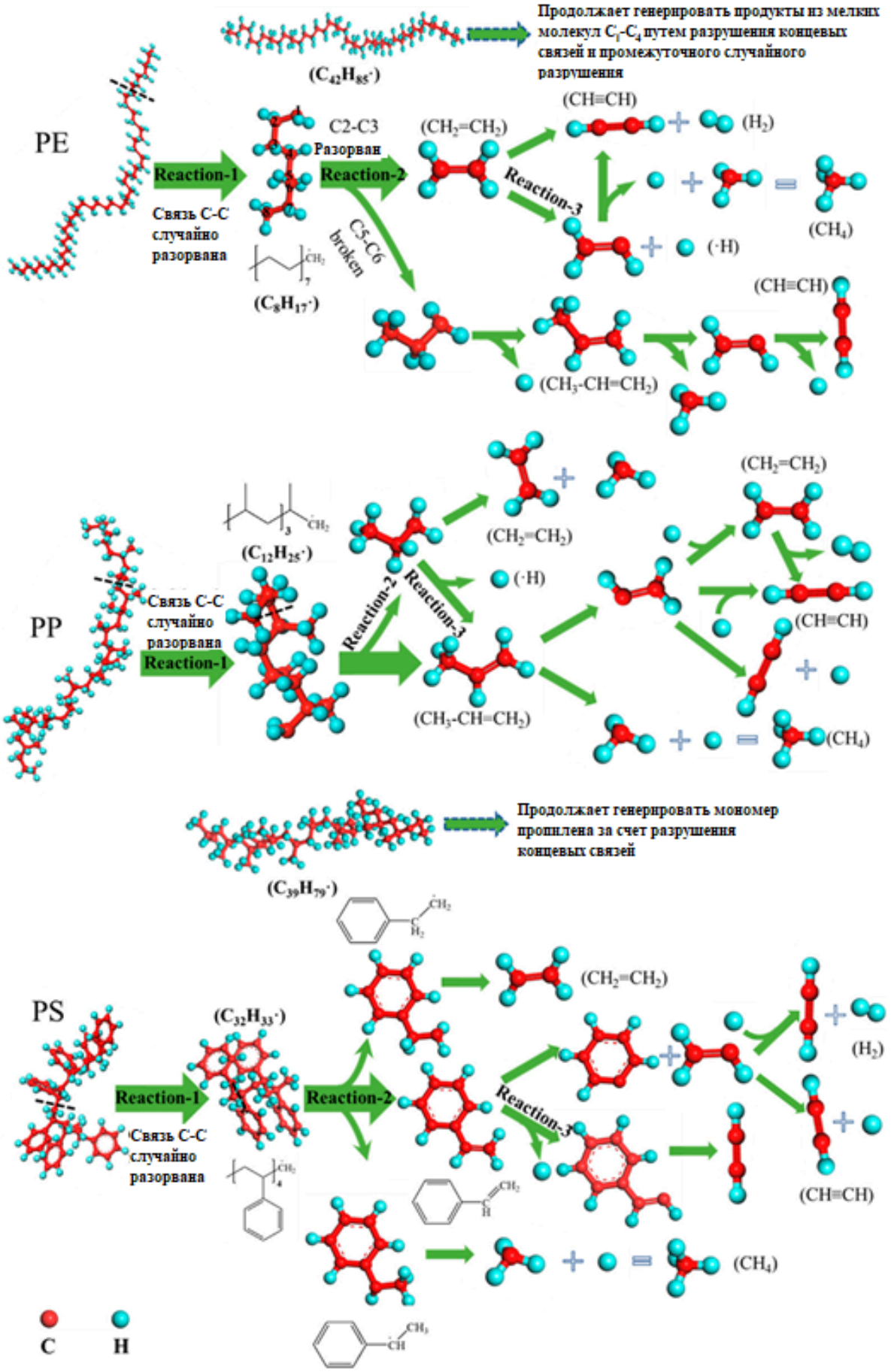


Рис. 4 - Схема термического разложения полиэтилена



Рис. 5 - Схематическое представление термического и каталитического путей пиролиза пластиковых отходов

Как видно из рисунка 5, термический пиролиз основан на разложении полимерного сырья под действием температуры без применения каталитического материала. При каталитическом варианте направление вторичных превращений дополнительно определяется свойствами катализатора, что позволяет изменять распределение продуктов и углеводородный состав жидкой фракции. Одновременно использование катализатора создаёт дополнительные требования к подбору режима, предотвращению коксообразования и регенерации каталитического материала [12, 13].

Температура является одним из наиболее значимых факторов. При повышении температуры интенсифицируется разрыв полимерных цепей, однако слишком жёсткие температурные условия усиливают вторичный крекинг жидких продуктов и увеличивают долю газа. В открытом исследовании по пиролизу пластмасс в фиксированном слое показано, что для HDPE максимальный выход жидких углеводородов наблюдался при 773 K (около 500°C) и составлял 62.2 мас. %, тогда как при 973 K доля жидкого продукта снижалась, а выход газа возрастал до 68.6 мас.%. Аналогичная тенденция отмечена и для других пластиков: рост температуры выше оптимального диапазона уменьшает выход конденсируемой фракции за счёт вторичных реакций [14].

Существенную роль играет и природа катализатора. В обзорах по пиролизу пластиков подчёркивается, что каталитический пиролиз позволяет не только изменять распределение продуктов, но и нередко снижать требуемую температуру процесса по сравнению с чисто термическим разложением. В частности, было показано, что использование таких катализаторов, как активированный оксид алюминия, ZSM-5, катализатор FCC и галлуазитовая глина, позволило снизить температуру пиролиза polyolefins с 470 до 450°C при улучшении выхода жидкого продукта [15].

Для полиэтилена влияние катализатора проявляется также в изменении селективности по углеводородному составу. В исследовании 2024 года по LLDPE при 600°C показано, что оксидные катализаторы улучшают качество жидкой фракции: Al_2O_3 способствует формированию лёгких и средних углеводородов диапазона C_7-C_{20}, тогда как MgO и CaO усиливают образование более лёгких соединений диапазона C_7-C_{12}. Одновременно авторы отмечают, что повышение температуры и использование катализаторов могут увеличивать выход газа и твёрдого остатка, что требует подбора оптимального режима в зависимости от целевого продукта [16].

Давление в литературе освещено менее подробно, чем температура и катализ, однако его влияние на состав продуктов также подтверждается экспериментально. В исследовании по HDPE показано, что при 464°C и субатмосферическом давлении 0.1 бар получали масло с максимальной долей линейных углеводородов 93.2 мас. %, тогда как при более высоких давлении и температуре возрастала доля циклических и разветвлённых соединений до 17.4 мас. % против 6.8 мас. % при вакуумных условиях и более мягком режиме [14].

Интересны и данные о высоком начальном давлении инертного газа. В работе 2023 года по пиролизу полиэтилена установлено, что увеличение начального давления азота с 2 до 21 бар сопровождалось ростом пиковой температуры системы с 428.1 до 476.7°C, что авторы связывают с фазовыми переходами, вызванными давлением в полиэтилене. Авторы показывают, что давление способно существенно влиять на течение процесса и способствовать полу-

чению высококачественных топливных продуктов даже при более низкой заданной температуре [17].

Анализ литературных данных показывает, что температура, тип катализатора и давление являются взаимосвязанными параметрами, определяющими как выход жидкой фракции, так и её состав. С практической точки зрения наиболее перспективным представляется подбор таких условий пиролиза, при которых обеспечивается высокий выход жидкого продукта при ограничении вторичного крекинга и формировании углеводородного состава, близкого к требованиям топливного применения [9].

Для систематизации рассмотренных литературных данных в таблице 1 представлены условия проведения пиролиза полиэтиленовых отходов и их влияние на выход и состав получаемых продуктов. При сопоставлении результатов учитывались вид сырья, температура и давление процесса, наличие катализатора, конструкция реактора и продолжительность реакции.

Таблица 1 - Систематизация литературных данных о влиянии условий пиролиза на выход и состав продуктов

Сырье	T, °C	P, бар	Катализатор	Тип реактора	Выход жидкой фракции	Основной эффект
HDPE	Около 500°C	Не указано; инертная среда N_2	Без катализатора	Неподвижный слой	62.2 мас. %	При дальнейшем повышении температуры до 700°C возрастает доля газообразных продуктов; максимальный выход газа достигает 68.6 мас. % [14].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	Без катализатора	Периодический реактор	44.31 мас. %	Термический пиролиз использован как базовый вариант для сопоставления с каталитическими режимами [16].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	Al_2O_3, соотношение PE : катализатор = 10 : 1	Периодический реактор	31.68 ± 1.14 мас. %	Формируется более широкий диапазон лёгких и средних углеводородов C_7-C_{20}, потенциально пригодных для бензиновых и дизельных фракций [16].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	MgO, соотношение PE : катализатор = 10 : 1	Периодический реактор	29.64 ± 1.95 мас. %	Усиливается образование преимущественно лёгких углеводородов C_7-C_{12} отмечается более выраженное коксообразование по сравнению с CaO [16].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	CaO, соотношение PE : катализатор = 10 : 1	Периодический реактор	35.08 ± 1.01 мас. %	Усиливается образование преимущественно лёгких углеводородов C_7-C_{12} катализатор демонстрирует более высокую устойчивость к коксообразованию по сравнению с MgO [16].
HDPE	464°C	0.1 бар	Без катализатора	Непрерывная пилотная установка	н/д	В составе пиролизного масла достигнута максимальная доля линейных углеводородов 93.2 мас. %. При повышении температуры и давления возрастает доля циклических и разветвлённых соединений [14].
LDPE	380°C	2-21 бар, N_2	Без катализатора	Автоклав периодического действия объёмом 100 мл с магнитной мешалкой	До ~90 мас. %	Повышение начального давления азота с 2 до 21 бар увеличивает пиковую температуру системы с 428.1 до 476.7°C и способствует более глубокому расщеплению полимерных цепей [17].

Сырье	T, °C	P, бар	Катализатор	Тип реактора	Выход жидкой фракции	Основной эффект
LDPE + 1-гексен	340°C	Начальное атмосферное давление; среда N_2	1-гексен как инициатор фазового перехода	Автоклав периодического действия объёмом 100 мл с магнитной мешалкой	Около 90 мас. %	Добавление 1-гексена позволяет получить высокий выход топливного масла при более низкой заданной температуре и без применения высокого начального давления [17].

Примечание - н/д означает, что данные не приведены в рассматриваемом источнике.

Как видно из таблицы 1, выход и состав продуктов пиролиза полиэтилена определяются не одним параметром, а совокупностью технологических условий. Для HDPE при термическом пиролизе в реакторе с неподвижным слоем максимальный выход жидкой фракции составил 62.2 мас. % при температуре около 500°C, тогда как дальнейшее повышение температуры сопровождалось увеличением доли газообразных продуктов. При каталитическом пиролизе LLDPE применение Al_2O_3, MgO и CaO не обеспечивало максимального выхода жидкой фракции по сравнению с некаталитическим режимом, однако позволяло изменять её углеводородный состав. В частности, Al_2O_3 способствовал образованию более широкого диапазона соединений C_7-C_{20}, тогда как MgO и CaO смещали состав продукта в сторону более лёгких углеводородов C_7-C_{12}.

Данные по влиянию давления также показывают, что изменение режима может отражаться не только на количестве масла, но и на его качественном составе. При субатмосферическом давлении для первичного HDPE была получена высокая доля линейных углеводородов, а увеличение начального давления азота при пиролизе LDPE сопровождалось повышением пиковой температуры системы и более глубоким расщеплением полимерных цепей. Следовательно, выбор условий процесса должен определяться целевым направлением применения продукта: максимизацией выхода жидкой фракции либо получением углеводородов требуемого диапазона для дальнейшей топливной или нефтехимической переработки.

Влияние типа реактора на выход и свойства продуктов пиролиза. Конструкция реактора является одним из факторов, определяющих эффективность пиролиза пластиковых отходов. Тип реактора влияет на интенсивность тепло- и массообмена, равномерность нагрева сырья, контакт полимера с катализатором, время пребывания паров в реакционной зоне и вероятность протекания вторичных реакций. По этой причине результаты пиролиза полиэтилена, полученные в разных исследованиях, не всегда могут быть непосредственно сопоставлены только на основании температуры процесса или типа катализатора [12].

Реакторы с неподвижным слоем характеризуются сравнительно простым устройством и широко применяются в лабораторных исследованиях. Передача тепла в таких аппаратах осуществляется преимущественно от стенок реактора к сырью, а при каталитическом варианте процесса частицы катализатора находятся в стационарном слое. Эти реакторы могут использоваться и как вторичная стадия для дополнительного преобразования парогазовых продуктов первичного пиролиза. Вместе с тем ограниченная интенсивность перемешивания и возможность возникновения температурных градиентов снижают эффективность теплообмена, особенно при масштабировании процесса [12].

Реакторы с псевдоожиженным слоем обеспечивают более интенсивный тепло- и массообмен благодаря движению частиц под действием восходящего потока газа. Их преимуществами являются более равномерное распределение температуры, эффективный контакт сырья с катализатором и возможность организации непрерывного процесса. Такие аппараты особенно перспективны для быстрого пиролиза и переработки значительных объёмов сырья, но их эксплуатация требует более точного контроля размера частиц, скорости газового потока и условий подачи расплавленного полимера. Дополнительной проблемой может стать нарушение устойчивости слоя при переработке вязкого или склонного к слипанию сырья [12].

При вакуумном пиролизе процесс проводится при пониженном давлении. Это уменьшает продолжительность пребывания паров в реакционной зоне и ограничивает вторичный крекинг уже образовавшихся жидких продуктов. В результате снижается вероятность их дополнительного разложения до неконденсируемых газов. Вакуумные реакторы могут быть полезны в тех случаях, когда основной

целью является сохранение жидкой фракции, однако создание и поддержание пониженного давления усложняет аппаратурное оформление процесса [12].

Конические реакторы с фонтанирующим слоем отличаются высокой интенсивностью перемешивания и эффективной передачей тепла между фазами. Они способны работать с частицами различного размера и плотности, а также демонстрируют меньшую склонность к нарушению гидродинамического режима при переработке липких материалов. Это особенно важно для полиэтилена, который размягчается и плавится при нагревании. Вместе с тем промышленное применение таких аппаратов ограничивается сложностями подачи катализатора, уноса твёрдых частиц и последующего разделения продуктов [12].

Универсального типа реактора, одинаково эффективного для всех вариантов пиролиза полиэтиленовых отходов, не существует. Выбор оборудования должен определяться целевым продуктом и условиями процесса. Реакторы с неподвижным слоем удобны для лабораторных исследований и вторичных каталитических стадий, реакторы с псевдоожиженным слоем для непрерывной переработки и повышения эффективности теплообмена, вакуумные реакторы для ограничения вторичных реакций и сохранения жидкого продукта, конические реакторы с фонтанирующим слоем для улучшения перемешивания и переработки склонного к слипанию сырья. При сравнении литературных данных необходимо учитывать не только температуру, давление и катализатор, но и конструкцию реактора [12].

Сравнительная характеристика основных типов реакторов, применяемых для пиролиза пластиковых отходов, представлена в таблице 2. При сопоставлении учитывались особенности тепло- и массообмена, возможность организации непрерывного процесса, технологические ограничения и наиболее целесообразные направления применения каждого типа оборудования.

Таблица 2 - Сравнительная характеристика реакторов для пиролиза пластиковых отходов

Тип реактора	Основные преимущества	Основные ограничения	Наиболее целесообразное применение
Реактор с неподвижным слоем	Простота конструкции; удобство лабораторных исследований; возможность использования катализатора в стационарном слое	Ограниченная интен-сивность перемеши-вания; возможные температурные градиенты; сложности масштабирования	Лабораторные исследования; вторичная каталитическая переработка парогазовых продуктов
Реактор с псевдоожиженным слоем	Интенсивный тепло- и массообмен; равномерный нагрев; хороший контакт сырья с катализатором; возможность непрерывной работы	Необходимость контроля размера частиц и скорости газа; возможное нарушение устойчивости слоя при переработке липкого сырья	Быстрый пиролиз; непрерывная пере-работка значительных объёмов пластиковых отходов
Вакуумный реактор	Сокращение времени пребывания паров; ограничение вторичного крекинга; возможность повышения сохранности жидкой фракции	Усложнение аппаратурного оформления; необходимость поддержания пониженного давления	Получение жидкого продукта с ограни-чением вторичных реакций
Конический реактор с фонтанирующим слоем	Эффективное перемешивание; высокий теплообмен; работа с частицами различного размера и плотности; меньшая склонность к нарушению режима при переработке липкого сырья	Сложности подачи катализатора; унос твёрдых частиц; необходимость эффективного разделения продуктов	Непрерывная переработка полимерного сырья, склонного к размягчению и слипанию

Как видно из таблицы 2, выбор реактора оказывает существенное влияние на условия проведения пиролиза и распределение получаемых продуктов. Реакторы с неподвижным слоем отличаются сравни-

тельно простой конструкцией и удобны для лабораторных исследований, однако их масштабирование может быть ограничено недостаточно интенсивным тепло- и массообменом. Реакторы с псевдоожиженным слоем обеспечивают более равномерный нагрев и эффективный контакт сырья с катализатором, что делает их перспективными для непрерывной переработки значительных объёмов пластиковых отходов. Вакуумные реакторы позволяют уменьшить продолжительность пребывания паров в реакционной зоне и ограничить вторичный крекинг жидких продуктов, но требуют более сложного аппаратурного оформления. Конические реакторы с фонтанирующим слоем обеспечивают интенсивное перемешивание и могут быть эффективны при переработке склонного к размягчению и слипанию полимерного сырья.

Физико-химические свойства пиролизного масла из полиэтилена. Одним из ключевых аргументов в пользу практического использования пиролизного масла является его высокая теплотворная способность. В обзорных и экспериментальных исследованиях для пластиковых пиролизных масел обычно приводятся значения свыше 40 МДж/кг, а для продуктов, полученных из полиэтилена, теплотворная способность часто оказывается близкой к уровню дизельного топлива. Так, для HDPE и LDPE в одном из исследований были получены значения 45.9 и 46.2 МДж/кг, а в работе по каталитическому пиролизу HDPE сообщается о теплотворной способности масла 49.3 МДж/кг [8], [9].

Важными показателями также являются плотность и вязкость, поскольку именно они во многом определяют поведение топлива при хранении, перекачке и сгорании. Однако литературные данные показывают, что свойства пиролизного масла могут заметно варьировать в зависимости от сырья и условий процесса. В обзорной таблице для HDPE-пиролизного масла приводятся типичные значения плотности около 0.90 г/см^3 и вязкости около 5.06 мм^2/с, тогда как в более селективном каталитическом процессе получено масло с плотностью 823.8 кг/м^3 и вязкостью 1.8 мм^2/с, то есть уже ближе к дизельным показателям. Это означает, что говорить о «едином» качестве пиролизного масла нельзя, то есть его свойства определяются конкретной технологией получения [9].

Существенной особенностью пиролизного масла является широкий углеводородный и фракционный состав. В исследовании термического пиролиза смеси пластиков было показано, что получаемое масло охватывает широкий диапазон углеводородов и требует последующего фракционирования перед использованием в двигателях внутреннего сгорания. После разделения были выделены фракции бензинового, дизельного и тяжёлого дизельного диапазона в количествах 21.12%, 56.52% и 22.36% соответственно. Это особенно важно для нашей темы, поскольку подтверждает: пиролизное масло рациональнее рассматривать не как полностью готовое моторное топливо, а как сырьё для дальнейшей подготовки или как компонент смесевых топлив [11].

По данным обзора по применению пиролизного масла в дизельных двигателях, такие масла часто характеризуются более высокой вязкостью и плотностью, пониженной температурой вспышки и пониженным цетановым индексом по сравнению с коммерческим дизельным топливом. Поэтому наиболее реалистичным направлением их применения считается использование после дистилляции, гидрообработки или в виде смесей с традиционными нефтяными топливами [6].

Перспективы и ограничения использования пиролизного масла в качестве компонента жидкого топлива. Анализ литературных данных показывает, что пиролизное масло из полиэтиленовых отходов действительно обладает значительным энергетическим потенциалом. Его высокая теплотворная способность, наличие углеводородов бензинового и дизельного диапазона, а также возможность получения высоких выходов жидкой фракции делают его перспективным промежуточным продуктом для топливного использования. Особенно показательно, что в ряде исследований свойства масел из HDPE оказываются близки к дизельному топливу, а при каталитической переработке могут практически соответствовать его базовым физическим параметрам [8, 18].

Для наглядного сопоставления основных эксплуатационно значимых характеристик в таблице 3 приведено сравнение свойств пиролизного масла из отходов полиэтилена и дизельного топлива.

Таблица 3 раскрывает что, пиролизное масло по ряду показателей приближается к дизельному топливу, прежде всего по теплотворной способности, однако различия по вязкости, температуре вспышки, фракционному составу и стабильности ограничивают возможность его прямого использования без предварительной подготовки.

Одновременно прямое использование такого продукта без дополнительной подготовки остаётся

ограниченным. Основными причинами являются нестабильность состава, наличие непредельных соединений, широкий фракционный диапазон и изменчивость свойств в зависимости от режима получения. По этой причине наиболее обоснованным выглядит применение пиролизного масла из полиэтилена либо после дополнительной переработки, либо в составе смесевых топлив, либо как сырья для последующей нефтехимической и топливной доработки [6], [11].

Таблица 3 - Топливные свойства пиролизного масла, полученного из пластиков, и их сопоставление со стандартными значениями для бензина и дизельного топлива

Свойства	**ЕИ**	**Типы пластмасс (типичное экспериментальное значение)**						**Коммерческое стандартное значение (ASTM 1979)**	
		PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	Бензин	Дизель
Теплотворная способность	МДж/кг$^{-1}$	28.2	40.5	21.1	39.5	40.8	43	42.5	43
Плотность по API при 60°F	-	-	27.48	38.98	48.05	33.03	-	55	38
Вязкость	мм^2/с$^{-1}$	-	5.06	7.05	5.56	5.02	1.8	1.18	1.9-4.1
Плотность при 15°C	г/см$^{-3}$	0.9	0.9	0.79	0.79	0.85	0.8	0.658	0.907
Зольность	масс%	-	0	-	0.035	0	0.007	-	0.02
Октановое число по ММ (мин.)		-	86	-	-	88	-	82-86	-
Октановое число по ИМ (мин.)		-	96	-	-	98	90-98	90-94	-
Температура застывания	°C	-	−4	-	-	−10	−68	-	7
Точка воспламенения	°C	-	49	39	40	29	27	43	51
Анилиновая точка	°C	-	56	-	-	39	-	69	78
Дизельный индекс		-	30	-	-	35	-	-	38

Подготовка пиролизного масла к использованию в составе жидких топлив. Пиролизное масло, полученное из отходов полиэтилена, не следует рассматривать как полностью готовое моторное топливо без дополнительной подготовки. Его свойства зависят от состава исходного сырья, режима пиролиза и условий конденсации, а в ряде работ подчёркивается, что сырое пиролизное масло из пластиковых отходов обычно характеризуется более высокой вязкостью и плотностью, пониженной температурой вспышки и нестабильным составом по сравнению со стандартным дизельным топливом. В обзорной работе 2023 года прямо отмечено, что повышение пригодности пиролизного масла к практическому применению достигается за счёт последующей обработки, прежде всего дистилляции и гидрообработки [6].

Первым и наиболее очевидным этапом подготовки является фракционирование. По данным Energy & Fuels, пиролизные жидкости из пластиков в значительной степени состоят из углеводородов дизельного диапазона кипения 180-380°C, причём их доля может составлять примерно 50-55 об.%. Это означает, что дистилляция позволяет выделить более узкую и технологически удобную фракцию, приблизив свойства продукта к требованиям, предъявляемым к дизельным и котельным топливам. Исследование 2023 года, в котором сравнивалось сырое, дистилли-

рованное и гидроочищенное пластиковое дизельное топливо, также показывает, что дистилляция является необходимым промежуточным этапом перед дальнейшим повышением качества продукта [19, 20].

Следующим важным направлением является гидрообработка. Показано, что гидрообработка пиролизного масла, полученного из полиэтилена, снижает его реакционную способность и способствует образованию более стабильных дизельных и керосиновых фракций. В прикладных исследованиях также установлено, что последовательное сочетание вакуумной дистилляции и гидрообработки позволяет значительно приблизить свойства продукта к стандартному автомобильному дизельному топливу [21].

Наиболее реалистичным способом внедрения пиролизного масла на современном этапе является его применение в составе смесевых топлив. В экспериментальной работе 2024 года, в которой исследовалось пиролизное масло, полученное из пакетов из HDPE для продуктов из полиэтилена высокой плотности, показано, что низкие добавки PPO к дизельному топливу вплоть до 15% могут использоваться в дизельном двигателе без модификации конструкции, при этом основные показатели работы и часть экологических характеристик остаются сопоставимыми с базовым дизельным топливом. Это подтверждает, что смесь дизеля с умеренной долей подготовленного пиролизного масла является более реалистичным направлением внедрения, чем использование неочищенного продукта в чистом виде [22].

Обобщённая последовательность подготовки пиролизного масла к дальнейшему применению представлена на рисунке 6.



Рис. 6 - Основные стадии получения, подготовки и практического использования пиролизного масла из полиэтиленовых отходов

Как видно из рисунка 6, жидкий продукт пиролиза целесообразно рассматривать в качестве промежуточного углеводородного сырья. Перед использованием его свойства можно скорректировать путем дистилляции и, при необходимости, гидроочистки. После приготовления продукт может быть использован в составе смеси жидких топлив или направлен на дальнейшую нефтехимическую переработку. Дополнительным преимуществом процесса является возможность использования части неконденсирующихся газов для удовлетворения тепловых потребностей установки.

Наиболее перспективные направления применения пиролизного масла из отходов полиэтилена. С учётом рассмотренных свойств пиролизного масла и необходимости его предварительной подготовки наиболее перспективным направлением его использования следует считать не прямое применение в качестве готового моторного топлива, а использование как промежуточного углеводородного продукта. Современные исследования показывают, что пиролизное масло может рассматриваться либо как компонент жидких топлив после облагораживания, либо как химическое сырьё для дальнейшей перера-

ботки. В открытом исследовании, опубликованном в Polymers, пиролизные масла специально сопоставлялись с лёгкой и тяжёлой нафтою с точки зрения возможности их использования как сырья для получения полиолефинов, то есть акцент делался именно на сырьё, а не только на энергетическом использовании [23].

Одним из наиболее реалистичных путей практического внедрения остаётся использование пиролизного масла в составе смесевых жидких топлив. Такой подход позволяет частично заместить нефтяное топливо без необходимости полного соответствия всех свойств пиролизного продукта требованиям к товарному дизелю. В то же время данные открытого исследования работы дизельного двигателя показывают, что при доле пиролизного масла свыше примерно 40%, наблюдается ухудшение физических и самовоспламеняющихся свойств смеси, а значит, наиболее рациональным остаётся применение умеренных долей подготовленного пиролизного компонента [24].

Другим перспективным направлением является использование пиролизного масла как сырья для последующей химической переработки. Открытый обзор 2025 года в PMC подчёркивает, что пиролитическое сжижение пластмасс рассматривается как способ получения химического сырья, включая топливные фракции, и анализирует не только лабораторные исследования, но и промышленные проекты по переработке пластиков в жидкие углеводородные продукты. Это особенно важно для темы данной статьи, поскольку показывает, что ценность пиролизного масла определяется не только возможностью его сжигания, но и его ролью как промежуточного сырья в рамках химического рециклинга и циркулярной экономики пластмасс [25].

Наиболее перспективными направлениями применения пиролизного масла из отходов полиэтилена являются его использование после подготовки в составе смесевых топлив, выделение целевых фракций для дальнейшего топливного применения, а также вовлечение в цепочки химической переработки в качестве углеводородного сырья. Такой подход в большей степени соответствует современным представлениям о химическом рециклинге пластмасс, чем прямое использование необработанного пиролизного продукта [23, 25].

Примеры промышленного применения и интеграции технологии. Практическая реализуемость пиролиза пластиковых отходов подтверждается эксплуатацией промышленных и демонстрационных установок, а также развитием инфраструктуры для последующей переработки получаемого пиролизного масла. При этом реальные проекты показывают, что жидкий продукт пиролиза может использоваться по двум основным направлениям: как компонент топлива после дополнительной подготовки либо как промежуточное углеводородное сырьё для получения химических продуктов и новых полимерных материалов.

Одним из примеров промышленного применения является предприятие Hintes Oil Europe, расположенное в Альмерии, Испания. Данный объект был рассмотрен Vinci et al. в качестве практического кейса при проведении оценки жизненного цикла производства пиролизного масла. В исследуемом процессе использовалась смесь пластиковых отходов, включающая 50% полиэтилена, 25% полипропилена и 25% полистирола. При переработке 91.38 кг/ч пластиковых отходов производительность по пиролизному маслу составляла 78.41 кг/ч. Неконденсируемые газы и твёрдые углеродистые продукты частично использовались для покрытия тепловой потребности процесса. Полученное масло имело теплотворную способность 44.26 МДж/кг и рассматривалось как продукт, пригодный для частичного замещения традиционного дизельного топлива после оценки его эксплуатационных характеристик [26].

Другим примером являются промышленные установки компании Plastic Energy в Альмерии и Севилье, Испания. По данным компании, установки эксплуатируются соответственно с 2016 и 2017 гг. В процессе TAC смешанные пластиковые отходы подвергаются нагреву в отсутствие кислорода с образованием углеводородных паров, которые затем конденсируются в жидкий продукт TACOIL. В отличие от прямого использования в качестве топлива, данный продукт применяется как вторичное углеводородное сырьё для производства новых пластиковых материалов. Компания указывает, что TACOIL с двух испанских установок был коммерциализирован на европейском рынке и использован при выпуске упаковочной продукции [27].

Показательным примером интеграции химического рециклинга с нефтеперерабатывающей инфраструктурой является технология ReOil® компании OMV. В марте 2025 г. на территории нефтеперерабатывающего завода в Швехате, Австрия, была введена в эксплуатацию установка производительностью до 16 000 т трудно перерабатываемых смешанных пластиковых отходов в год. Технология предусмат-

ривает превращение постпотребительских пластиковых отходов в пиролизное масло, которое используется как сырьё для получения базовых химических продуктов. Интеграция установки с действующим нефтеперерабатывающим комплексом позволяет вовлекать жидкий продукт пиролиза в существующую технологическую цепочку и снижать потребность в первичном ископаемом сырьё [28].

Отдельное значение имеет развитие промышленных мощностей для облагораживания пиролизного масла. В марте 2026 г. компания Neste ввела в эксплуатацию на нефтеперерабатывающем заводе в Порвоо, Финляндия, установку подготовки сжиженных пластиковых отходов производительностью до 150 000 т в год. Данный объект не является установкой первичного пиролиза: он предназначен для улучшения качества жидких продуктов термохимической переработки пластиков, включая пиролизное масло. После облагораживания продукт совместно перерабатывается с традиционным углеводородным сырьём на действующем нефтеперерабатывающем предприятии и используется для получения сырья, соответствующего требованиям нефтехимической промышленности [29].

Рассмотренные примеры показывают, что промышленное развитие пиролиза пластиковых отходов происходит преимущественно по пути интеграции с существующей нефтеперерабатывающей и нефтехимической инфраструктурой. Хотя отдельные исследования подтверждают возможность применения пиролизного масла в составе смесевых топлив, в промышленных проектах значительное внимание уделяется его использованию как промежуточного сырья. Такой подход позволяет проводить дополнительную очистку и облагораживание продукта, стабилизировать его свойства и получать химические материалы с более высокой добавленной стоимостью.

Для систематизации рассмотренных промышленных проектов в таблице 4 представлены примеры действующих и демонстрационных установок пиролиза пластиковых отходов, а также объектов последующей подготовки получаемого жидкого продукта.

Таблица 4 - Примеры промышленного применения и интеграции технологии пиролиза пластиковых отходов

Компания и местоположение	**Сырьё или промежуточный продукт**	**Технология и назначение продукта**	**Масштаб или производительность**	**Практическое значение**
Hintes Oil Europe, Альмерия, Испания [26].	Смесь пластиковых отходов: 50% PE, 25% PP и 25% PS	Пиролиз с получением жидкого продукта, потенциально пригодного для применения как компонента топлива	91.38 кг/ч пластиковых отходов; 78.41 кг/ч пиролизного масла	Пример промышленного производства пиролизного масла с частичным использованием побочных продуктов для покрытия тепловой потребности процесса
Plastic Energy, Альмерия и Севилья, Испания [27].	Смешанные пластиковые отходы	Процесс TAC с получением TACOIL; продукт используется как вторичное углеводородное сырьё для производства новых пластиков	Промышленные установки эксплуатируются с 2016 и 2017 гг. соответственно	Подтверждает возможность коммерциализации жидкого продукта химичес-кого рециклинга на европейском рынке
OMV, нефтеперерабатывающий завод в Швехате, Австрия [28].	Трудно перерабатываемые смешанные пластиковые отходы	Технология ReOil® с получением пиролизного масла как сырья для производства базовых химических продуктов	До 16 000 т пластиковых отходов в год; установка введена в эксплуатацию в 2025 г.	Пример интеграции пиролиза с действующей нефтеперерабатывающей инфраструктурой

Компания и местоположение	**Сырьё или промежуточный продукт**	**Технология и назначение продукта**	**Масштаб или производительность**	**Практическое значение**
Neste, нефтеперерабатывающий завод в Порвоо, Финляндия [29].	Сжиженные пластиковые отходы, включая пиролизное масло	Облагораживание жидкого продукта и совместная переработка с традиционным углеводородным сырьём	До 150 000 т жидкого сырья в год; установка введена в эксплуатацию в 2026 г.	Показывает про-мышленное масшта-бирование стадии подготовки пиро-лизного масла к нефтехимическому использованию

Как видно из таблицы 4, реальные промышленные проекты развиваются преимущественно по пути интеграции пиролиза с действующей нефтеперерабатывающей и нефтехимической инфраструктурой. Получаемое пиролизное масло в большинстве случаев рассматривается не как готовое моторное топливо для прямого применения, а как промежуточное углеводородное сырьё, требующее дополнительной подготовки и дальнейшей переработки. Рассмотренные примеры также показывают, что промышленное внедрение включает не только стадию первичного пиролиза, но и развитие мощностей по облагораживанию жидкого продукта.

Экологические и экономические аспекты применения технологии. Оценка перспектив использования пиролизного масла из отходов полиэтилена не должна ограничиваться анализом выхода жидкой фракции и её физико-химических свойств. Для определения практической целесообразности технологии необходимо учитывать экологические последствия полного жизненного цикла, энергозатраты на проведение процесса, затраты на подготовку сырья и последующую очистку продукта, масштаб установки, возможность использования побочных продуктов и особенности конкретного потока пластиковых отходов.

Одним из инструментов комплексной экологической оценки является анализ жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA). В исследовании Vinci et al. выполнена LCA-оценка промышленного предприятия по производству пиролизного масла в Альмерии, Испания. В качестве сырья использовалась смесь пластиковых отходов, включающая 50% полиэтилена, 25% полипропилена и 25% полистирола. Авторы установили, что производство 1 л пиролизного масла сопровождается образованием около 0.032 кг CO_2-экв. и потреблением около 0.031 м^3 воды. При сравнении с ископаемым дизельным топливом снижение воздействия было отмечено в 17 из 18 рассмотренных категорий. Кроме того, в рамках данного промышленного кейса химическая переработка продемонстрировала более благоприятные показатели по сравнению с захоронением и сжиганием пластиковых отходов [26].

Вместе с тем указанные результаты не следует автоматически распространять на все установки пиролиза. Экологическая эффективность зависит от состава сырья, источника энергии, аппаратурного оформления процесса и способа учёта предотвращённых воздействий. В исследовании Yadav et al. выполнен технико-экономический анализ и LCA для концептуальной установки каталитического быстрого пиролиза смешанных пластиковых отходов производительностью 240 т/сут. Авторы установили, что использование отходов вместо ископаемого сырья способно снизить расход невозобновляемых ресурсов и совокупное энергопотребление цепочки поставок. Однако для базового варианта получения бензола, толуола и ксилолов выбросы парниковых газов оказались выше по сравнению с традиционным нефтехимическим производством. Причинами названы значительные затраты энергии и ресурсов на подготовку сырья, производство холода, пара и электроэнергии, а также разделение продуктов [30].

Сопоставление результатов данных исследований показывает, что экологическая оценка пиролиза зависит от выбранного сценария. В одном случае основным продуктом является пиролизное масло, рассматриваемое как частичная замена дизельного топлива, а в другом нефтехимические продукты, требующие более глубокой переработки и разделения.

Следовательно, при оценке технологии необходимо учитывать не только выход жидкой фракции, но и дальнейший маршрут её использования. Дополнительное значение имеют возможность утилизации неконденсируемых газов для обеспечения процесса теплом, использование тяжёлых углеводородных фракций, а также интеграция установки с действующими нефтеперерабатывающими или нефтехимическими объектами [26], [30].

Экономическая эффективность пиролиза также в значительной степени определяется масштабом производства. В работе Fivga и Dimitriou выполнено моделирование установки переработки пластиковых отходов производительностью 100 кг/ч с использованием программного комплекса Aspen HYSYS. Для малотоннажного варианта расчётная себестоимость топливного продукта составила 0.87 фунта стерлингов за килограмм, что на 58% превышало рассматриваемую авторами рыночную цену. Вместе с тем расчёты для более крупных установок показали существенное снижение удельных затрат за счёт эффекта масштаба [31].

Похожая закономерность прослеживается в исследовании Yadav et al. Авторы отмечают, что ключевыми факторами стоимости являются цена и предварительная подготовка пластикового сырья, капитальные затраты на разделение продуктов, эксплуатационные расходы, стоимость катализатора и возможность реализации сопутствующих продуктов. Согласно результатам чувствительного анализа, увеличение производительности моделируемой установки с 240 до 500 т/сут способно снизить минимальную цену реализации целевого продукта приблизительно на 14%. При этом экономическая эффективность может дополнительно повышаться при интеграции процессов разделения с существующей нефтехимической инфраструктурой [26].

Согласно выводам, Joint Research Centre Европейской комиссии, выбор предпочтительного способа обращения с пластиковыми отходами должен основываться на совокупности трёх критериев: максимизации возврата материала при минимизации воздействия переработки, технической пригодности метода для конкретного потока отходов и экономической реализуемости проекта. Пиролиз в связи с этим не следует рассматривать как универсальную замену механической переработке. Его применение наиболее оправдано для тех потоков полиолефиновых отходов, которые трудно вовлечь в механический рециклинг вследствие загрязнения, смешанного состава или ухудшения свойств материала [32].

Пиролиз полиэтиленовых отходов обладает значительным потенциалом, однако экологические и экономические преимущества технологии не являются безусловными. Практическая эффективность определяется сочетанием факторов: качеством и стабильностью сырьевого потока, энергопотреблением, производительностью установки, возможностью использования побочных продуктов, необходимой глубиной очистки пиролизного масла и наличием инфраструктуры для дальнейшей переработки. Наиболее перспективным представляется интегрированный подход, при котором пиролиз дополняет механическую переработку и применяется преимущественно для сложных потоков пластиковых отходов.

Сравнение пиролиза с альтернативными методами обращения с пластиковыми отходами. Оценка перспектив пиролиза полиэтиленовых отходов требует сопоставления данной технологии с другими способами переработки и утилизации пластмасс. Согласно данным Joint Research Centre Европейской комиссии, выбор предпочтительного метода должен основываться на трёх основных критериях: максимизации возврата материала при минимизации воздействия процесса на окружающую среду, технической пригодности технологии для конкретного сырьевого потока и экономической реализуемости проекта [32].

Наиболее распространённым способом вовлечения пластиковых отходов во вторичный оборот остаётся механическая переработка. Она включает сортировку, измельчение, очистку и повторное формование полимерного материала. Преимуществами данного подхода являются относительная технологическая простота и сохранение полимера как материала. Однако его применение ограничивается требованиями к чистоте и однородности исходного сырья. Загрязнённые, смешанные или многослойные отходы, а также материалы с ухудшенными эксплуатационными свойствами могут быть менее пригодны для механического рециклинга [32].

Физическая переработка, также называемая переработкой с использованием растворителей или селективным растворением, позволяет отделять полимер от примесей без полного разрушения его макромолекулярной структуры. Этот подход может быть полезен для отдельных сложных потоков отходов, однако требует применения растворителей, их последующего отделения и регенерации. В связи с этим экологическая и экономическая эффективность метода зависит от энергопотребления и организации оборота растворителя [32].

Пиролиз относится к методам химической переработки и заключается в термическом разложении полимеров с образованием жидких углеводородов, неконденсируемых газов и твёрдого остатка. В отличие от механической переработки, пиролиз позволяет вовлекать в переработку часть смешанных и трудно перерабатываемых полиолефиновых отходов.

Его основным преимуществом является получение жидкого углеводородного продукта, который после предварительной подготовки может использоваться как топливный компонент или как промежуточное сырьё для нефтехимии. Одновременно технология требует значительных энергозатрат, контроля состава сырья и последующей подготовки пиролизного масла [32].

Другим термохимическим методом является газификация. В данном процессе пластиковые отходы преобразуются преимущественно в синтез-газ, содержащий оксид углерода и водород. Синтез-газ может использоваться для получения энергии или химических продуктов. Однако газификация проводится при более жёстких условиях, требует сложного оборудования и очистки газообразного продукта. По этой причине её применение связано с дополнительными технологическими и экономическими барьерами [32].

Энергетическая утилизация путём сжигания позволяет сократить объём отходов и получить тепловую или электрическую энергию. Однако при таком подходе углеводородное сырьё утрачивается как материал, а содержащийся в пластике ископаемый углерод переходит в выбросы диоксида углерода. Согласно результатам оценки Joint Research Centre, по показателю воздействия на изменение климата механическая, физическая и химическая переработка в рассмотренных сценариях предпочтительнее энергетической утилизации. Вместе с тем для отдельных категорий воздействия, не связанных непосредственно с изменением климата, преимущество переработки не всегда является однозначным, особенно для энергоёмких пиролизных процессов [32].

Что касается пиролиза, то его не следует рассматривать в качестве замены механической обработке. Комбинированный подход является наиболее рациональным: целесообразно направлять относительно чистые и однородные полиэтиленовые отходы на механическую переработку, тогда как пиролиз может быть использован в качестве дополнительного метода переработки смешанных и сложных потоков полиолефинов, которые трудно поддаются механической переработке.

Сравнительная характеристика основных методов представлена в таблице 5.

Таблица 5 - Сравнение основных методов обращения с пластиковыми отходами в контексте переработки полиэтилена

Метод	Сущность	Основные преимущества	Ограничения	Основной результат	Наиболее подходящая область применения
Механическая переработка	Сортировка, измельчение, очистка и повторное формование полимерного материала	Сохранение полимера как материала; относительная технологическая простота; возможность получения вторичного полимера	Требования к чистоте и однородности сырья; ухудшение свойств материала при повторных циклах; ограниченная пригодность смешанных и загрязнённых отходов	Вторичный полимерный материал	Чистые и относительно однородные потоки полиэтиленовых отходов
Физическая переработка с использованием растворителей	Селективное растворение полимера с его последующим отделением и восстановлением	Возможность отделения полимера от части примесей; сохранение макромолекулярной структуры	Необходимость использования и регенерации растворителей; дополнительные энергозатраты; зависимость эффективности от состава сырья	Очищенный полимерный материал	Отдельные сложные потоки отходов, для которых механическая переработка недостаточно эффективна
Пиролиз	Термическое разложение полимеров в отсутствие кислорода	Получение жидких углеводородных продуктов; возможность переработки части смешан-	Энергоёмкость; нестабильность состава масла; образование газа, тяжёлых продуктов и кокса;	Пиролизное масло, неконденсируемый газ и твёрдый остаток	Смешанные и трудно перерабатываемые полиолефиновые отходы, ограни-

Метод	Сущность	Основные преимущества	Ограничения	Основной результат	Наиболее подходящая область применения
		ных полиолефиновых отходов; получение промежуточного сырья для топливного или нефтехимического применения	необходимость дистилляции или иной подготовки жидкого продукта		ченно пригодные для механического рециклинга
Газификация	Высокотемпературное термохимическое превращение отходов в газообразный продукт	Получение синтез-газа как сырья для энергетического или химического применения	Высокие температуры; сложность аппаратурного оформления; необходимость очистки газа; экономические ограничения	Синтез-газ	Сложные потоки отходов при наличии инфраструктуры для дальнейшего использования синтез-газа
Энергетическая утилизация путём сжигания	Термическое уничтожение отходов с получением тепла и электроэнергии	Значительное сокращение объёма отходов; получение энергии; технологическая освоенность	Потеря углеводородного сырья как материала; выбросы диоксида углерода; невозможность возврата полимера в хозяйственный оборот	Тепловая и электрическая энергия	Остаточные потоки отходов, для которых переработка технически или экономически затруднена

Как видно из таблицы 5, каждый метод занимает собственное место в системе обращения с пластиковыми отходами. Механическая переработка сохраняет полимерный материал и остаётся предпочтительным направлением для сравнительно чистых потоков сырья. Пиролиз приобретает особое значение для тех полиолефиновых отходов, которые трудно перерабатывать механическими способами. Его практическая ценность заключается не в замещении других методов, а в расширении общего спектра перерабатываемых пластиковых отходов и получении жидкого углеводородного сырья для дальнейшего использования.

Ограничения технологии и проблемы промышленного внедрения. Несмотря на значительный потенциал пиролиза полиэтиленовых отходов, практическое внедрение данной технологии связано с рядом ограничений. К ним относятся неоднородность поступающего сырья, нестабильность состава пиролизного масла, широкий фракционный диапазон жидкого продукта, образование тяжёлых компонентов и кокса, дезактивация катализаторов, повышенные энергозатраты и необходимость последующей подготовки масла перед его использованием в качестве компонента топлива.

Одной из ключевых проблем является неоднородность пластиковых отходов. В лабораторных исследованиях часто применяются чистые образцы HDPE, LDPE или LLDPE с известным составом. В реальных условиях сырьевой поток может содержать смеси полимеров, остатки органических веществ, красители, наполнители и другие примеси. Даже незначительное содержание нежелательных компонентов способно влиять на распределение продуктов, стабильность процесса и качество пиролизного масла. В частности, присутствие поливинилхлорида в смешанных пластиковых отходах может привести к поступлению хлорсодержащих соединений в продукты пиролиза и отложениям примесей на поверхности катализатора. Поэтому промышленное внедрение требует организации предварительной сортировки и контроля качества исходного сырья [25, 32].

Другим ограничением является нестабильность свойств получаемого жидкого продукта. Пиролизное масло представляет собой сложную смесь углеводородов с широким диапазоном температур кипения. Его состав зависит от вида полимера, температуры, скорости нагрева, давления, времени пребывания паров, конструкции реактора и условий конденсации. В сравнении с товарным ди-

зельным топливом сырое пиролизное масло может характеризоваться повышенной вязкостью и плотностью, пониженной температурой вспышки, наличием непредельных соединений и изменчивостью эксплуатационных показателей. В связи с этим прямое использование необработанного продукта в двигателях ограничено. Для повышения качества необходимы дистилляция, гидрообработка или смешение с традиционными нефтяными топливами [6, 19, 21].

Особое значение имеет проблема дезактивации катализаторов. При каталитическом пиролизе контакт углеводородных фрагментов с активной поверхностью способствует более глубокому расщеплению полимерных цепей и формированию целевых продуктов. Одновременно на поверхности и внутри пор катализатора могут накапливаться углеродистые отложения. Образование кокса снижает доступность активных центров и постепенно уменьшает каталитическую активность. На интенсивность данного процесса влияют структура и кислотность катализатора, температура, состав сырья, время контакта и конструкция реактора [13].

Дезактивированный катализатор может подвергаться регенерации. К основным методам удаления коксовых отложений относятся окисление воздухом или кислородом, газификация с использованием диоксида углерода или водяного пара, а также гидрирование. Наиболее распространённым промышленным подходом является окислительная регенерация. Однако чрезмерно высокая температура восстановления активности способна вызвать необратимое изменение структуры катализатора, снижение числа активных центров и ухудшение его дальнейших эксплуатационных свойств.

Следовательно, применение катализаторов повышает качество продуктов пиролиза, но одновременно увеличивает технологическую сложность процесса и создаёт дополнительные требования к регенерации и повторному использованию каталитического материала [13].

Выбор конструкции реактора также влияет на возможность промышленного масштабирования. В реакторах с неподвижным слоем расплавленный пластик и тяжёлые продукты могут затруднять тепло- и массообмен и создавать риск закупоривания аппарата. Реакторы с псевдоожиженным слоем обеспечивают более интенсивное перемешивание, равномерный нагрев и улучшенный контакт сырья с катализатором, однако требуют более сложного контроля гидродинамического режима. Таким образом, результаты лабораторных экспериментов, проведённых в периодических установках, не могут автоматически переноситься на непрерывные промышленные процессы без дополнительной проверки и масштабирования [12, 13].

Существенным ограничением остаётся энергоёмкость технологии. Пиролиз требует затрат тепловой энергии на нагрев сырья, а последующая подготовка масла дополнительных ресурсов на охлаждение, разделение, дистилляцию и, при необходимости, гидрообработку. Часть энергозатрат может компенсироваться использованием неконденсируемых газов процесса, однако итоговая экологическая и экономическая эффективность зависит от масштаба установки, источника энергии, состава сырья и глубины дальнейшей переработки жидкого продукта [26, 30, 31].

Отдельной проблемой является разрыв между лабораторными исследованиями и промышленной реализацией. В лабораторных условиях изучается пиролиз широкого спектра пластиков и многочисленных каталитических систем. В промышленных проектах чаще используются сравнительно распространённые и технологически удобные виды сырья, а применение катализаторов ограничивается требованиями к их стабильности, стоимости и возможности многократной регенерации. Для расширения промышленного применения пиролиза необходимы устойчивые и экономически доступные катализаторы, эффективные системы подготовки сырья и оптимизированные конструкции реакторов [25].

Этим объясняется то, что пиролиз полиэтиленовых отходов не следует рассматривать как универсальное решение проблемы накопления пластика. Технология обладает значительным потенциалом, но её практическая эффективность определяется сочетанием факторов: качеством сырья, стабильностью процесса, выходом и составом масла, энергопотреблением, стабильностью катализатора, глубиной последующей подготовки продукта и возможностью интеграции с существующей нефтеперерабатывающей или нефтехимической инфраструктурой. Наиболее разумным подходом является использование пиролиза в качестве дополнительного метода переработки тех потоков полиэтиленовых отходов, которые трудно поддаются механической обработке.

Выводы. Проведённый анализ показывает, что отходы полиэтилена являются перспективным сырьём для получения жидких углеводородных про-

дуктов методом пиролиза. Актуальность данного направления связана с ростом объёмов пластиковых отходов, низким уровнем их переработки и необходимостью вовлечения углеродсодержащих материалов во вторичный хозяйственный оборот. Пиролиз в данном случае рассматривается не только как способ утилизации отходов, но и как технология получения ценного промежуточного продукта.

Установлено, что при пиролизе полиэтиленовых отходов возможно получение жидкой фракции с высокой теплотворной способностью и характеристиками, частично близкими к свойствам традиционных жидких топлив. Это подтверждает энергетический потенциал пиролизного масла и его практическую значимость. Вместе с тем свойства получаемого продукта зависят от состава исходного сырья, температурного режима, скорости нагрева и условий проведения процесса, что оказывает существенное влияние на выход жидкой фракции и её качество.

Анализ физико-химических свойств пиролизного масла показал, что, несмотря на близость отдельных показателей к дизельному топливу, его прямое использование в качестве готового моторного топлива ограничено. Основными причинами являются широкий фракционный состав, нестабильность свойств и несоответствие части эксплуатационных характеристик требованиям, предъявляемым к товарным нефтяным топливам.

Вместе с тем промышленное внедрение технологии требует решения вопросов стабильности сырьевого потока, снижения энергоёмкости, предотвращения коксообразования, повышения срока службы катализаторов и стандартизации качества получаемого пиролизного масла.

Наиболее рациональным направлением практического применения пиролизного масла из отходов полиэтилена является его использование после предварительной подготовки. По литературным данным, дистилляция позволяет улучшить характеристики пиролизного продукта за счёт выделения более узких фракций, а смешение дистиллированного продукта с коммерческим дизельным топливом повышает его эксплуатационную пригодность. В связи с этим пиролизное масло целесообразно рассматривать прежде всего, как промежуточный углеводородный продукт, пригодный для дальнейшей топливной или химической переработки.

Пиролиз отходов полиэтилена представляет собой перспективное направление химического рециклинга пластиковых отходов. Практическая ценность данной технологии заключается в возможности одновременного решения экологической задачи по снижению объёмов пластиковых отходов и ресурсной задачи по получению жидких углеводородных продуктов, пригодных для дальнейшего использования после соответствующей подготовки.

Литература

1. Houssini K., Li J. Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis//Commun Earth Environment. −2025. -Vol.6: 257. DOI 10.1038/s43247-025-02169-5.
2. Ranger S. Plastic recycling rates are stubbornly low: Here's what's going wrong//SCI. −2025. URL:https://www.soci.org/news/2025/4/plastics-recycling-rates-are-stagnating-heres-why. Date accessed: 01.04.2026.
3. Laghezza M., Fiore S., Berruti F. A review on the pyrolytic conversion of plastic waste into fuels and chemicals //Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. −2024. -Vol.179:106479. DOI 10.1016/j.jaap.2024.106479.
4. Hasan M.M., Haque R., Jahirul M.I., Rasul M.G. Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts//Energy Conversion and Management. −2025. Vol.326: 119511. DOI 10.1016/j.enconman.2025.119511.
5. Wijayanti W., Musyaroh M., Sasongko M.N. Low-Density Polyethylene Plastic Waste to Liquid Fuel Using Pyrolysis Method: An Effect of Temperatures on the Oil Yields Physicochemical Properties//Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2022. -Vol.10(3):1090402. DOI 10.13044/j.sdewes.d9.0402.
6. Faisal F., Rasul M.G., Jahirul M.I., Chowdhury A.A. Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics//Science of The Total Environment. −2023. Vol.886:163756. DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163756.
7. Pumpuang A., Klinkaew N., Wathakit K., Sukhom A., Sukjit E. The influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance// RSC advances. −2024. -Vol. 14(14). -P. 10070-10087. DOI 10.1039/d3ra08150h.

8. Javed N., Muhammad S., Iram S., et.al. Analysis of Fuel Alternative Products Obtained by the Pyrolysis of Diverse Types of Plastic Materials Isolated from a Dumpsite Origin in Pakistan// Polymers. 2023.-Vol.15(1):24. DOI 10.3390/polym15010024.
9. Yaqoob H., Muhammad Ali H., Khalid U. Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: a review of key factors//RSC Sustainability. 2024. -Vol.3(1). -P.208-218. DOI 10.1039/D4SU00504J.
10. Xuan W., Yan S., Dong Y. Exploration of Pyrolysis Behaviors of Waste Plastics (Polypropylene Plastic/Polyethylene Plastic/Polystyrene Plastic): Macro-Thermal Kinetics and Micro-Pyrolysis Mechanism// Processes. −2023. -Vol. 11(9): 2764. DOI 10.3390/pr11092764.
11. Riesco-Avila J.M., Vera-Rozo J.R., et.al. Effects of Heating Rate and Temperature on the Yield of Thermal Pyrolysis of a Random Waste Plastic Mixture//Sustainability. −2022.-Vol.14(15): 9026. DOI: 10.3390/su14159026.
12. Paavani K., Agarwal K., Alam S.S., Dinda S., Abrar I. Advances in plastic to fuel conversion: reactor design, operational optimization, and machine learning integration // Sustainable Energy & Fuels. −2025. Vol. 9(1). -P. 54-71. DOI 10.1039/D4SE01045K.
13. Daligaux V., Richard R., Manero M.-H. Deactivation and Regeneration of Zeolite Catalysts Used in Pyrolysis of Plastic Wastes-A Process and Analytical Review// Catalysts. −2021. -Vol. 11(7): 770. DOI 10.3390/catal11070770.
14. Ghodke P.K., Sharma A.K., Moorthy K., Chen W.-H., Patel A., Matsakas L. Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons// Processes. −2023. -Vol. 11(1): DOI 10.3390/pr11010071.
15. Kanattukara, B.V., Singh, G., Sarkar, P. et al. Catalyst-mediated pyrolysis of waste plastics: tuning yield, composition, and nature of pyrolysis oil// Environmental Science and Pollution Research. −2023. Vol. 30. -P. 64994-65010. DOI 10.1007/s11356-023-27044-8.
16. Tran T.T., Tran H.Q., Tran D.H., Nguyen T.N., Phung T.K., Do T.C. The effect of reaction conditions and catalysts on the pyrolysis of polyethylene// Journal of Science and Technology Development. −2024. Vol. 27(2). -P.3375-3384. DOI 10.32508/stdj.v27i2.4251.
17. Zhang Y., Chen X., Cheng L., Gu J., Xu Y. Conversion of Polyethylene to High-Yield Fuel Oil at Low Temperatures and Atmospheric Initial Pressure// International Journal of Environmental Research and Public Health. −2023. -Vol. 20(5): 4048. DOI 10.3390/ijerph20054048.
18. Xie X., Wang M., Mao N., et.al. Bridging plastic recycling and clean energy production: hydrogen-free catalytic pyrolysis of polyethylene over $CuMgAlO_x$ for high-yield diesel fuel generation//Green Chemistry. −2025.-Vol. 27(26). -P.7887-7896. DOI 10.1039/D5GC01967B.
19. Faisal F., Rasul M.G., Chowdhury A.A., et.al. Uncovering the differences: A comparison of properties of crude plastic pyrolytic oil and distilled and hydrotreated plastic diesel produced from waste and virgin plastics as automobile fuels //Fuel. −2023. -Vol. 350:128743. DOI 10.1016/j.fuel.2023.128743.
20. Gala A., Guerrero M., Guirao B., et al. Characterization and Distillation of Pyrolysis Liquids Coming from Polyolefins Segregated of MSW for Their Use as Automotive Diesel Fuel//Energy. −2020. Vol.34(5). -P.5969-5982. DOI 10.1021/acs.energyfuels.0c00403.
21. Hafeez S., Van Haute M., Manos G., et.al. Hydrotreatment over the Pt/Al2O3 Catalyst of Polyethylene-Derived Pyrolysis Oil and Wax//Energy and Fuels. −2023. -Vol.37(20). -P. 16181-16185. DOI 10.1021/acs.energyfuels.3c03152.
22. Yaqoob H., Muhammad Ali H., Sajjad U., Hamid K. Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis//Results in Engineering. −2024. -Vol.24: 103336. DOI 10.1016/j.rineng.2024.103336.
23. Erkmen B., Ozdogan A., Ezdesir A., Celik G. Can Pyrolysis Oil Be Used as a Feedstock to Close the Gap in the Circular Economy of Polyolefins //Polymers. −2023. -Vol.15(4): 859. DOI 10.3390/polym15040859.
24. Januszewicz K., Hunicz J., Kazimierski P., Rybak A., et.al. An experimental assessment on a diesel engine powered by blends of waste-plastic-derived pyrolysis oil with diesel// Energy. −2023. Vol.281:128330. DOI 10.1016/j.energy.2023.128330.
25. Kumagai S, Fujiwara K, Nishiyama T, Saito Y, Yoshioka T. Chemical Feedstock Recovery Through Plastic Pyrolysis: Challenges and Perspectives Toward a Circular Economy// ChemSusChem. −2025. Vol.18(16): e202500210. DOI10.1002/cssc.202500210.

26. Vinci G., Gobbi L., Porcaro D., Pinzi S., Carmona-Cabello M., Ruggeri M. Environmental Evaluation of Chemical Plastic Waste Recycling: A Life Cycle Assessment Approach// Resources. −2024. -Vol.13(12): 176. DOI 10.3390/resources13120176.
27. Plastic Energy. Operations: Almeria and Seville advanced recycling plants. URL: https://plasticenergy.com/operations/. - Date accessed: 01.04.2026.
28. OMV. OMV unveils innovative ReOil® plant to transform end-of-life plastics into circular feedstocks. −2025. URL: https://www.omv.com/en/media/press-releases/2025/250318-omv-unveils-innovative-reoil-plant-to-transform-end-of-life-plastics-into-circular-feedstocks. Date accessed: 01.04.2026.
29. Neste. Neste commissions the world's largest upgrading facility for liquefied waste plastic and scales up chemical recycling. −2026. URL: https://www.neste.com/news/neste-commissions-the-worlds-largest-upgrading-facility-for-liquefied-waste-plastic-and-scales-up-chemical-recycling. Date accessed: 01.04.2026.
30. Yadav G., Singh A., Dutta A., Uekert T., DesVeaux J.S., Nicholson S.R., Tan E.C.D., Mukarakate C., Schaidle J.A., Wrasman C.J., Carpenter A.C., Baldwin R.M., Román-Leshkov Y., Beckham G.T. Techno-economic analysis and life cycle assessment for catalytic fast pyrolysis of mixed plastic waste // Energy & Environmental Science. −2023. -Vol. 16(9). P. 3638–3653. DOI 10.1039/D3EE00749A.
31. Fivga A., Dimitriou I. Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment// Energy. −2018. Vol. 149. -P. 865-874, DOI 10.1016/j.energy.2018.02.094
32. García-Gutiérrez, Pelayo & Amadei, Andrea & Klenert, David & Nessi, Simone & Tonini, Davide & Tosches, Davide & Ardente, Fulvio & Saveyn, Hans. Environmental and economic assessment of plastic waste recycling and energy recovery pathways in the EU// Resources Conservation and Recycling. −2025. -Vol. 215:108099. DOI 10.1016/j.resconrec.2024.108099.

Сведения об авторах

Джасакбаев А.Т.-магистрант, Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан, e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com;

Султамуратова З.Б.-кандидат химических наук, ассистент-профессор, Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан, e-mail: zadasb@mail.ru;

Карешова Ж.К.-преподователь, Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан, e-mail: zh.kareshova@mail.ru;

Жумабекова А.К. - ассоциированный профессор, кандидат химических наук, Казахский, университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru.

Information about the authors

Jassakbayev A.-Master's student, Safi Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com;

Sultamuratova Z.-Candidate of Chemical Sciences, Safi Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: zadasb@mail.ru;

Kareshova Zh.-Teacher Safi Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: zh.kareshova@mail.ru;

Zhumabekova A. - Candidate of chemical sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru.

https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-5

STUDY OF CO_2 ABSORPTION BY AN AQUEOUS SOLUTION OF POTASSIUM HUMATE WITH MICROSILICA

M.K. Kazankapova[1,2]✉, B.T. Yermagambet[1,2]✉, U.M. Kozhamuratova[1], A.B. Malgazhdarova[1], Zh.M. Kassenova[1,2], A.S. Akshekina[1], A.B. Bekbosynov[1]

Received: 18 July 2026
Accepted: 17 September 2026
Published: 30 September 2026
Citation: M.K. Kazankapova, et al. « STUDY OF CO_2 ABSORPTION BY AN AQUEOUS SOLUTION OF POTASSIUM HUMATE WITH MICROSILICA ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-5
License CC BY 4.0

[1] *«Institute of Coal Chemistry and Technology» LLP, Astana, Kazakhstan*
[2] *K. Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan*
✉ *Corresponding author: coaltech@bk.ru, maira_1986@mail.ru*

The paper investigates the sorption of carbon dioxide by an aqueous solution of potassium humate with the addition of microsilica. Experimental studies of the kinetics of CO_2 sorption were conducted with different masses of microsilica (1, 5, 10, and 20 g) in the presence of 50 ml of potassium humate solution. The effect of contact time and the amount of sorbent on the efficiency of carbon dioxide sorption was determined. It was shown that an increase in the duration of the process leads to an increase in the amount of sorbed CO_2, with maximum efficiency achieved using 5 g of microsilica, for which the mass of sorbed carbon dioxide was 2.72 g. By the 160th minute of the experiment, the degree of CO_2 sorption reached approximately 15% based on the difference in gas concentrations at the inlet and outlet of the system. An analysis of the dynamics of changes in the CO_2 concentration was performed, and the integral values of the volume and mass of sorbed carbon dioxide were calculated. Based on experimental data, regression models were constructed and a generalized equation for predicting the sorption process was proposed. The results confirm the potential of the potassium humate-microsilica system for carbon dioxide capture and can be used in the development of technologies for reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: carbon dioxide, CO_2, potassium humate, microsilica, sorption, carbon capture, gas purification, greenhouse gases.

КАЛИЙ ГУМАТЫНЫҢ МИКРОКРЕМНИЙМЕН СУЛЫ ЕРІТІНДІСІМЕН CO_2 СІҢІРУІН ЗЕРТТЕУ

М.Қ. Қазанқапова[1,2]✉, Б.Т. Ермағамбет[1,2]✉, Ұ.М. Қожамұратова[1], А.Б. Малғаждарова[1], Ж.М. Касенова[1,2], Ұ.М. Қожамұратова[1], Ә.С. Акшекина[1], Ә.Б. Бекбосынов[1]

[1] *«Көмір химиясы және технология институты» ЖШС, Астана, Қазақстан*
[2] *Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан*
✉ *e-mail: coaltech@bk.ru, maira_1986@mail.ru*

Мақалада микрокремний қосылған калий гуматының сулы ерітіндісімен көмірқышқыл газының сіңуі зерттеледі. CO_2 сорбциясының кинетикасын эксперименттік зерттеу 50 мл калий гуматы ерітіндісінің қатысуымен әртүрлі микрокремний массаларымен (1, 5, 10 және 20 г) жүргізілді. Байланыс уақыты мен сорбент мөлшерінің көмірқышқыл газын сіңіру тиімділігіне әсері анықталды. Процестің ұзақтығының артуы сіңірілген CO_2 мөлшерінің артуына әкелетіні, ең жоғары тиімділікке 5 г микрокремнийді қолданғанда қол жеткізілетіні көрсетілді, ол үшін сіңірілген көмірқышқыл газының массасы 2,72 г болды. Тәжірибенің 160-шы минутында CO_2 сіңу дәрежесі жүйенің кіріс және шығысындағы газ концентрацияларының айырмашылығына негізделген шамамен 15%-ға жетті. CO_2 концентрациясының өзгеру динамикасын талдау

жүргізілді және сіңірілген көмірқышқыл газының көлемі мен массасының интегралдық мәндері есептелді. Тәжірибелік деректер негізінде регрессиялық модельдер құрылды және сорбция процесін болжауға арналған жалпыланған теңдеу ұсынылды. Нәтижелер калий гуматы-микрокремний жүйесінің көмірқышқыл газын ұстап қалу әлеуетін растайды және парниктік газдар шығарындыларын азайту технологияларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: көмірқышқыл газы, CO_2, калий гуматы, микрокремний диоксиді, сорбция, көміртекті ұстау, газды тазарту, парниктік газдар.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ CO_2 ВОДНЫМ РАСТВОРОМ ГУМАТА КАЛИЯ С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ

М.К. Казанкапова[1,2]✉, Б.Т. Ермагамбет[1,2]✉, У.М. Кожамуратова[1], А.Б. Малгаждарова[1], Ж.М. Касенова[1,2], У.М. Кожамуратова[1], А.С. Акшекина[1], А.Б. Бекбосынов[1]

[1] ТОО «Институт химии угля и технологии», Астана, Казахстан
[2] Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан
✉ *e-mail: coaltech@bk.ru, maira_1986@mail.ru*

В работе исследован процесс поглощения углекислого газа водным раствором гумата калия с добавлением микрокремнезёма. Проведены экспериментальные исследования кинетики сорбции CO_2 при различных массах микрокремнезёма (1, 5, 10 и 20 г) в присутствии 50 мл раствора гумата калия. Установлено влияние времени контакта и количества сорбента на эффективность поглощения углекислого газа. Показано, что увеличение продолжительности процесса приводит к росту количества поглощённого CO_2, при этом максимальная эффективность достигается при использовании 5 г микрокремнезёма, для которого масса поглощённого углекислого газа составила 2,72 г. К 160-й минуте эксперимента степень поглощения CO_2 достигала около 15 % по разности концентраций газа на входе и выходе системы. Выполнен анализ динамики изменения концентрации CO_2, рассчитаны интегральные значения объёма и массы поглощённого углекислого газа. На основе экспериментальных данных построены регрессионные модели и предложено обобщённое уравнение для прогнозирования процесса сорбции. Полученные результаты подтверждают перспективность применения системы «гумат калия – микрокремнезём» для улавливания углекислого газа и могут быть использованы при разработке технологий снижения выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: углекислый газ, CO_2, гумат калия, микрокремнезём, сорбция, улавливание углерода, газоочистка, парниковые газы.

Introduction. In recent decades, increasing atmospheric carbon dioxide (CO_2) concentrations have become one of the most serious environmental problems globally. The main causes of this process are the intensive combustion of fossil fuels, industrial development, and land-use change. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), atmospheric CO_2 concentrations have increased from approximately 280 ppm in the pre-industrial period to more than 415 ppm in recent years, an unprecedented level in hundreds of thousands of years [1].

The increase in greenhouse gas levels leads to an increase in the greenhouse effect and causes significant changes in the Earth's climate system. According to the IPCC Sixth Assessment Report, the average global surface temperature for the period 2011–2020 was 1.09 °C above the 1850–1900 level, which is accompanied by an increase in extreme weather events, rising sea levels, and the degradation of natural ecosystems. Carbon capture and storage (CCS) is considered one of the important approaches for reducing CO_2 emissions from large stationary sources. Current CO_2 capture technologies include chemical and physical absorption, adsorption using solid sorbents, membrane separation, cryogenic separation, and related hybrid processes. Recent reviews emphasize that the development of new capture materials is focused on improving CO_2 capacity and selectivity while reducing energy consumption, regeneration requirements, and material costs [2-4].

Among alternative sorbents, humic substances and their salts have attracted increasing attention because of their availability, low cost, and abundance of oxygen-containing functional groups. Recent experimental studies have demonstrated the ability of humic acid salts to absorb CO_2. Spietz et al. [5] investigated potassium and ammonium humates prepared from oxidized lignite and experimentally determined their CO_2 absorption capacity and absorption rate. The reported absorption capacity of the humic acid salts reached up to 10.9 g CO_2/kg, confirming the potential of humate-based

materials for CO_2 capture. In addition, a recent study of humic substances obtained from brown coal in Kazakhstan reported the potential of potassium humate for CO_2 absorption, supporting the relevance of coal-derived humic substances as low-cost CO_2 sorbents [6].

Silica-based materials represent another important class of CO_2 sorbents. Their application is associated with high surface area, developed pore structure, thermal stability, and the possibility of surface functionalization. Amaraweera et al. [7] reviewed porous silica materials for CO_2 capture and highlighted the role of pore structure, surface area, and surface functional groups in determining CO_2 adsorption performance. More recent studies have demonstrated that modification of mesoporous silica can further enhance its interaction with CO_2. In particular, amine-functionalized mesoporous silica has been investigated as a promising class of regenerable solid sorbents, while hierarchical silica-containing composites have also been developed to improve surface accessibility and CO_2 capture performance [8].

The combination of organic and inorganic components provides an additional approach for controlling the surface properties and mass-transfer characteristics of CO_2 sorbents. In such systems, the organic component can provide chemically active functional groups, whereas the inorganic phase can contribute surface area, pore structure, dispersion, and mechanical stability. However, the effect of increasing the inorganic fraction is not necessarily proportional to the increase in CO_2 uptake because excessive mineral loading may alter the ratio of active organic groups to the mineral phase and affect the accessibility of the active sites [9].

These findings provide a basis for investigating potassium humate-microsilica systems as combined organic–inorganic CO_2 capture materials. At the same time, because potassium humate is prepared using KOH, the possible contribution of residual alkalinity to CO_2 uptake should be considered separately. Therefore, distinguishing the contributions of humate functional groups, residual alkaline species, and microsilica requires additional measurements of pH and residual alkalinity as well as characterization of the sorbent before and after CO_2 exposure.

An additional increase in sorption capacity can be achieved by introducing highly dispersed mineral components into the system. Of particular interest is microsilica (silica fume), an ultrafine amorphous silicon dioxide with a large specific surface area and high reactivity. Due to the presence of a large number of surface silanol groups, microsilica can increase the number of interaction sites with carbon dioxide and alter the structure of the liquid phase, facilitating the intensification of mass transfer processes [10-11].

In light of the above, studying the absorption of CO_2 by aqueous solutions of potassium humate modified with microsilica is relevant. Studying the influence of component concentration, contact time, and absorption conditions will allow us to evaluate the potential of this system for the development of environmentally friendly and cost-effective carbon dioxide capture technologies.

Scientific novelty. The scientific novelty of this study lies in the experimental determination of the effect of microsilica mass (1, 5, 10, and 20 g) on the kinetics and cumulative CO_2 uptake by an aqueous potassium humate solution under a constant solution volume of 50 mL and controlled experimental conditions. A non-monotonic dependence of CO_2 uptake on the microsilica loading was observed. The highest absolute CO_2 uptake within the investigated range was obtained with 5 g of microsilica and amounted to 2.72 g CO_2 after 160 min. The experimental data were further used to develop regression relationships describing the kinetics of the CO_2 sorption process.

Materials and methods. To evaluate the effectiveness of an aqueous solution of potassium humate modified with microsilica for CO_2 sorption, a laboratory experimental study was conducted. The primary objective was to determine the effect of microsilica content on the system's sorption properties and identify optimal sorption conditions.

The experiments were conducted in the laboratory of the Institute of Coal Chemistry and Technology (Astana, Kazakhstan) under controlled conditions. Oxidized brown coal from the Maikube deposit (Shoptykol site), containing humic substances and mineral impurities, including SiO_2, was used as the feedstock. The feedstock was crushed to a fraction of <0.5 mm and analyzed using standard methods (ISO, ASTM), including thermogravimetric analysis and determination of humic acids by acid-base extraction.

Oxidized brown coal from the Maikube deposit (Shoptykol site) was used as raw material for the study. This coal contains humic substances with a low sulfur content and medium ash content (25-28%). It also contains significant amounts of aluminum oxide (up to 30%) and phosphorus.

The calorific value of the combustible fraction of coal ranges from 29.3 to 31.4 kJ/kg. Total recoverable coal

reserves are estimated at 5.3 billion tonnes, of which 1.8 billion tonnes are suitable for open-pit mining with a low overburden ratio. For each experiment, 50 mL of potassium humate extract obtained from the same batch was used. The extract was prepared under identical extraction conditions, and no additional dilution or concentration step was applied before the CO_2 sorption experiments. Therefore, all experiments were performed using the same potassium humate solution to ensure identical initial conditions.

The feedstock was crushed to particles smaller than 0.5 mm and analyzed for the following parameters: A_d - 66.09%; W_r - 5.73%; V_d - 17.78%; S_{td} - 0.71%; C_{td} - 21.01%; H_{td} - 1.68%; N_{td} - 2.09%.

Inorganic components included: Na (0.61%), Al (0.89%), K (0.58%), Ca (0.31%), Ti (0.22%), Fe (1.11%), and Zr (0.08%). Particle size distribution ranged from 2.95 μm (D_{10}) to 452 μm (D_{90}), with a median size of 63.8 μm. X-ray diffraction analysis revealed the presence of halloysite, SiO_2, and albite.

Potassium humate was obtained by alkaline extraction using a 3% KOH solution at a coal:solution ratio of 1:7. The residual alkalinity of the potassium humate extract was not separately adjusted before the sorption experiments; therefore, its contribution to CO_2 uptake was considered in the control experiments. The process was carried out at 50–55°C with mechanical and ultrasonic treatment, which ensured the transition of humic substances into a colloidal solution.

Modified samples were prepared by adding microsilica at concentrations of 1g, 5g, 10g and 20g to 50 ml of potassium humate solution, followed by stirring until homogeneous. The experimental design included four microsilica loadings (1, 5, 10, and 20 g) with a constant volume of potassium humate solution (50 mL). The contact time was varied from 10 to 160 min at 10-min intervals. The primary response parameter used for comparison was the cumulative mass of absorbed CO_2 at the end of the experiment. Because the potassium humate was prepared using KOH, determination of the pH and residual alkalinity of the resulting potassium humate solution would provide important information for evaluating the contribution of free alkaline species to CO_2 uptake. These parameters were not determined in the present experimental series and therefore represent an important limitation of the current interpretation. Further experiments should include pH measurements and, preferably, quantitative determination of residual alkalinity before and after CO_2 exposure. Microsilica was considered an active additive, increasing the contact area and intensifying CO_2 mass transfer. Microsilica is a highly dispersed amorphous silica with a predominant silicon dioxide content. The material is characterized by high chemical purity, a significant specific surface area, and the presence of trace amounts of alkali and alkaline earth metal oxides, as well as impurity elements. Due to this composition, it exhibits high reactivity and is widely used in composite and sorption systems (Table 1).

Table 1 - Chemical composition of microsilica

Chemical Component	Mass fraction, %
SiO_2	95–99.21
Al_2O_3	0.01–0.21
Fe_2O_3	0.05–0.10
CaO	0.53–0.68
MgO	0.20–0.30
Na_2O	0.05–0.10
K_2O	0.95–1.18
P_2O_5	0.05–0.07
TiO_2	0.02–0.04
C	0.5–1.10
LOI (Loss on Ignition)	1.30
Moisture	< 0.5
pH	8.0
Density	445–580

CO_2 sorption was carried out in a vertical glass column at 23°C. A gas mixture containing 30% CO_2 and 70% N_2 was continuously passed through the sorption solution. The inlet and outlet gas flow rates were monitored during the experiments and used in the calculation of CO_2 sorption. The inlet and outlet CO_2 concentrations were determined using a CrystalLux 4000-M gas chromatograph (Figure 1).

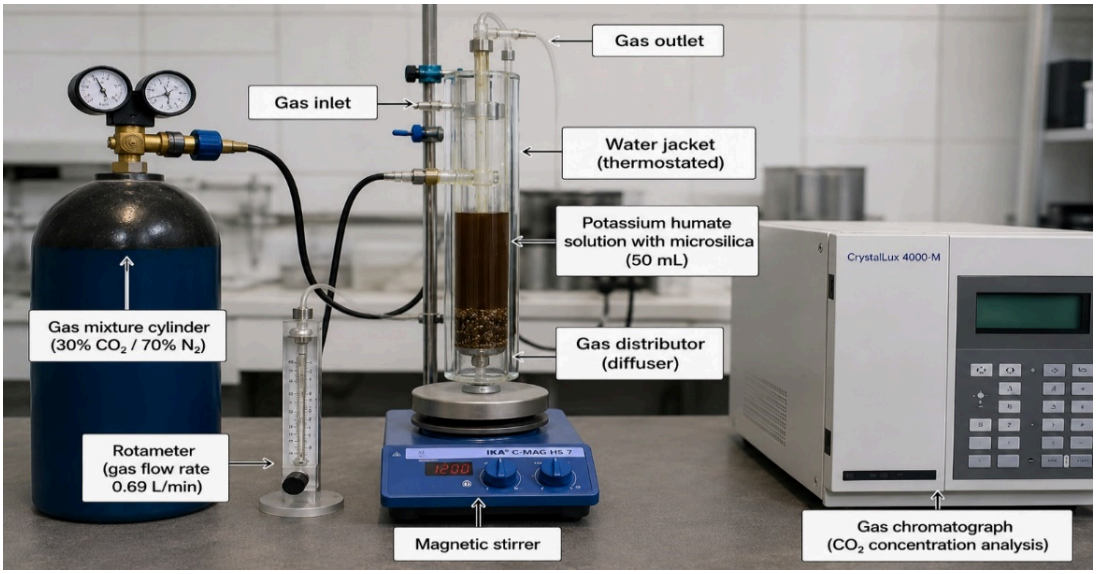


Fig. 1 - Schematic diagram of a laboratory setup for the sorption of carbon dioxide by potassium humate

The sorption capacity ($A_{(CO_2)}$) was calculated using the ideal gas equation, taking into account the volume of absorbed CO_2, pressure, and temperature. The process kinetics were described by a quadratic regression model as a function of time and microsilica concentration. The volume of absorbed CO_2 was expressed in m^3 in the calculation, while pressure was expressed in P_a and the gas constant in J/(mol·K), ensuring dimensional consistency of the equation.

The specific CO_2 absorption capacity of the potassium humate–microsilica system, $A(CO_2)$, expressed as g CO_2/kg of substance, was calculated using the ideal gas equation (Equation 1), taking into account the measured gas-phase parameters:

$$A_{CO_2} = \frac{PV}{RT} \cdot \frac{44.01}{m_s} \quad (1)$$

where:

- $A(CO_2)$ is the specific amount of absorbed CO_2 (g/kg);
- P is the absolute pressure (P_a);
- V is the volume of absorbed CO_2 (m^3);
- R is the universal gas constant (8.314 J/(mol K));
- T is the absolute temperature (K);
- 44.01 is the molar mass of CO_2 (g/mol);
- m_s is the mass of microsilica used in the experiment, kg (0.001, 0.005, 0.010, and 0.020 kg for the respective experimental samples).

The equation used allows us to quantify the sorption capacity of the potassium humate-microsilica system and compare the efficiency of various modified samples under identical experimental conditions. The calculation assumes ideal gas behaviour and uses the measured inlet and outlet gas flow parameters at each sampling interval. The inlet CO_2 flow rate was 0.69 L/min, corresponding to 0.00069 m^3/min. All gas volumes used in the calculation were converted to m^3 to maintain consistency with the SI units of pressure and the gas constant.

Results and discussion. The results of the CO_2 sorption experiments for potassium humate–microsilica systems are presented in Tables 2–6. The experiments were conducted using 50 mL of potassium humate solution with different amounts of microsilica (1, 5, 10 and 20 g). The CO_2 sorption was monitored at 10-minute intervals for a total duration of 160 min.

At the end of the experiment, the highest absolute amount of absorbed CO_2 was obtained for the system containing 5 g of microsilica and amounted to 2.72 g CO_2. For 1 g of microsilica, the absorbed amount reached 2.53 g CO_2, whereas increasing the microsilica loading to 10 and 20 g resulted in lower values of 1.76 and 1.06 g CO_2, respectively.

Therefore, under the investigated experimental conditions, increasing the microsilica loading did not result in a proportional increase in CO_2 uptake. The

maximum amount of absorbed CO_2 was observed at a microsilica loading of 5 g, reaching 2.72 g CO_2 after 160 min. Further increasing the microsilica loading to 10 and 20 g resulted in lower final CO_2 uptake values of 1.76 and 1.06 g CO_2, respectively. Thus, within the studied range, the dependence of CO_2 uptake on microsilica loading was non-monotonic, indicating that increasing the microsilica amount alone did not enhance the overall CO_2 capture capacity of the system (Figure 2).

Table 2 - CO_2 capture using microsilica sorbents in a 50 ml volume of potassium humate solution

Duration, min.	Mass of microsilica, g			
	1	5	10	20
10	0.22	0.23	0.21	0.17
20	0.43	0.46	0.42	0.35
30	0.62	0.67	0.65	0.54
40	0.79	0.88	0.88	0.74
50	0.96	1.09	1.10	0.91
60	1.12	1.28	1.33	1.06
70	1.28	1.47	1.54	1.06
80	1.44	1.66	1.76	1.06
90	1.59	1.82	1.76	1.06
100	1.74	1.97	1.76	1.06
110	1.90	2.12	1.76	1.06
120	2.07	2.27	1.76	1.06
130	2.22	2.42	1.76	1.06
140	2.38	2.57	1.76	1.06
150	2.53	2.72	1.76	1.06
160	2.53	2.72	1.76	1.06

Table 3 - Carbon dioxide sorption of 1 g of microsilica with 50 ml of potassium humate

Δt, min	Time of test (min)	V out gaz dm_3/ min	CO_2 % vol. outlet	CO_2 in - CO_2 out, % vol	Amount of absorbed CO_2, dm_3	Integral, calculation (total CO_2), dm_3	Absorbed g CO_2	g CO_2/ kg of the solution
10.000	10	0.05	5.25	24.75	0.013	0.122	0.22	0.010
10.000	20	0.05	7.18	22.82	0.012	0.241	0.43	0.019
10.000	30	0.05	7.52	22.48	0.012	0.351	0.62	0.028
10.000	40	0.05	11.12	18.88	0.010	0.450	0.79	0.035
10.000	50	0.06	12.78	17.22	0.010	0.543	0.96	0.043
10.000	60	0.06	13.71	16.29	0.009	0.635	1.12	0.050
10.000	70	0.06	13.32	16.68	0.009	0.726	1.28	0.057
10.000	80	0.06	14.13	15.87	0.009	0.813	1.44	0.064
10.000	90	0.06	14.91	15.09	0.009	0.899	1.59	0.071
10.000	100	0.06	15.07	14.93	0.008	0.985	1.74	0.077
10.000	110	0.06	14.55	15.45	0.009	1.075	1.90	0.084
10.000	120	0.06	13.24	16.76	0.009	1.169	2.07	0.092

10.000	130	0.06	13.18	16.82	0.009	1.259	2.22	0.099
10.000	140	0.06	14.74	15.26	0.009	1.344	2.38	0.106
10.000	150	0.06	15.16	14.84	0.008	1.429	2.53	0.112
10.000	160	0.06	15.08	14.92	0.008	1.429	2.53	0.112

Table 4 - Carbon dioxide sorption of 5 g microsilica with 50 ml potassium humate

Δt, min	Time of test (min)	V out gaz dm_3/ min	CO_2 % vol. outlet	CO_2 in - CO_2 out, % vol	Amount of absorbed CO_2, dm_3	Integral, calculation (total CO_2), dm_3	Absorbed g CO_2	g CO_2/ kg of the solution
10.000	10	0.05	3.14	26.86	0.013	0.132	0.23	0.010
10.000	20	0.05	4.06	25.94	0.013	0.259	0.46	0.020
10.000	30	0.05	6.19	23.81	0.012	0.381	0.67	0.030
10.000	40	0.05	6.57	23.43	0.012	0.499	0.88	0.039
10.000	50	0.05	7.94	22.06	0.012	0.614	1.09	0.048
10.000	60	0.05	8.45	21.55	0.011	0.725	1.28	0.057
10.000	70	0.05	10.75	20.25	0.011	0.831	1.47	0.065
10.000	80	0.05	10.69	19.31	0.010	0.937	1.66	0.074
10.000	90	0.05	10.29	19.71	0.011	1.032	1.82	0.081
10.000	100	0.06	15.14	14.86	0.008	1.117	1.97	0.088
10.000	110	0.06	14.89	15.11	0.009	1.200	2.12	0.094
10.000	120	0.06	15.1	14.1	0.008	1.283	2.27	0.101
10.000	130	0.06	15.23	14.77	0.008	1.368	2.42	0.108
10.000	140	0.06	14.69	15.31	0.008	1.454	2.57	0.114
10.000	150	0.06	15.17	14.83	0.009	1.539	2.72	0.121
10.000	160	0.06	15.04	14.96	0.009	1.539	2.72	0.121

Table 5 - Carbon dioxide sorption of 10 g microsilica with 50 ml potassium humate

Δt, min	Time of test (min)	V out gaz dm_3/ min	CO_2 % vol. outlet	CO_2 in - CO_2 out, % vol	Amount of absorbed CO_2, dm_3	Integral, calculation (total CO_2), dm_3	Absorbed g CO_2	g CO_2/ kg of the solution
10.000	10	0.05	8.89	21.11	0.011	0.116	0.21	0.009
10.000	20	0.05	6.78	23.22	0.012	0.240	0.42	0.019
10.000	30	0.05	4.94	25.06	0.013	0.368	0.65	0.029
10.000	40	0.05	4.54	25.46	0.013	0.497	0.88	0.039
10.000	50	0.05	4.61	25.39	0.013	0.625	1.10	0.049
10.000	60	0.05	4.96	25.04	0.013	0.750	1.33	0.059
10.000	70	0.05	5.78	24.22	0.012	0.874	1.54	0.069
10.000	80	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	90	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	100	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	110	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078

10.000	120	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	130	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	140	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	150	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078
10.000	160	0.05	6	24	0.012	0.998	1.76	0.078

Table 6 - Carbon dioxide sorption of 20 g microsilica with 50 ml potassium humate

Δt, min	Time of test (min)	V out gaz dm_3/ min	CO_2 % vol. outlet	CO_2 in - CO_2 out, % vol	Amount of absorbed CO_2, dm_3	Integral, calculation (total CO_2), dm_3	Absorbed g CO_2	g CO_2/ kg of the solution
10.000	10	0.06	12.41	17.59	0.010	0.097	0.17	0.008
10.000	20	0.06	12.43	17.57	0.010	0.200	0.35	0.016
10.000	30	0.05	I.66	20.34	0.011	0.307	0.54	0.024
10.000	40	0.05	10.41	19.59	0.011	0.417	0.74	0.033
10.000	50	0.05	8.19	21.81	0.011	0.518	0.91	0.041
10.000	60	0.06	14.81	15.19	0.009	0.601	1.06	0.047
10.000	70	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	80	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	90	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	100	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	110	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	120	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	130	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	140	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	150	0.06	15.78	14.22	0.008	0.601	1.06	0.047
10.000	160	0.06	15.78	17.59	0.008	0.601	1.06	0.008

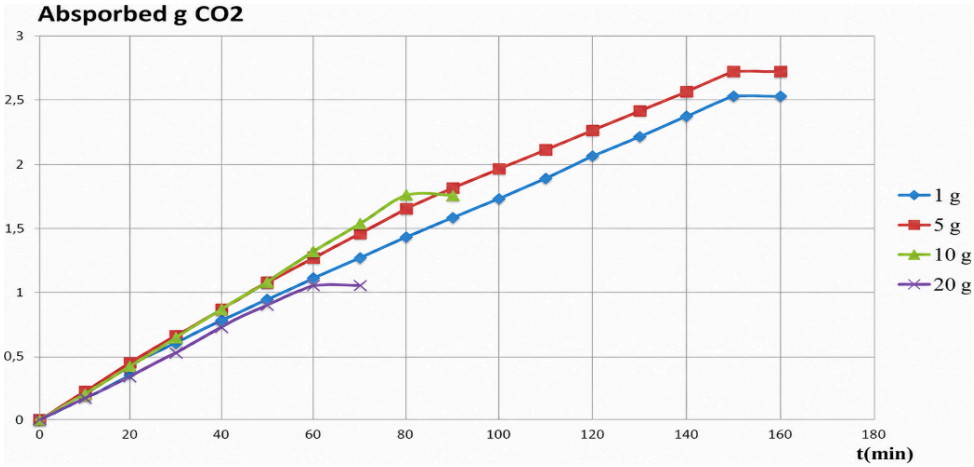


Fig. 2 - Dependence of CO_2 sorption on time during the interaction of potassium humate with microsilica (1 g, 5 g, 10 g, 20 g)

The difference between the inlet and outlet CO_2 concentrations varied during the experiment. This parameter represents the difference in gas-phase CO_2 concentration between the inlet and outlet streams and was used to estimate the amount of CO_2 removed from the gas stream over each sampling interval. It should not

be interpreted directly as the total CO_2 sorption capacity, which was calculated from the integral volume and corresponding mass of absorbed CO_2.

The enhanced CO_2 uptake observed for the potassium humate–microsilica system at a microsilica loading of 5 g may indicate a possible beneficial interaction between the components. However, the present experimental design does not provide sufficient evidence to conclusively establish a synergistic effect, since separate control experiments with potassium humate and microsilica under identical conditions were not included. Therefore, the observed improvement is described here as an enhanced CO_2 uptake of the modified system rather than as a confirmed synergistic effect.

The table presents the results of a laboratory experiment studying the dynamics of CO_2 sorption by a composite system based on silica and potassium humate. Measurements were carried out for 160 minutes with a 10-minute increment. The following parameters were recorded for each time point: the volume of outgoing gas, the outlet CO_2 concentration, the difference between the inlet and outlet carbon dioxide concentrations, the amount of absorbed CO_2 in dm^3, the integral cumulative value of the volume of absorbed CO_2, the mass of sorbed gas in grams, and the mass of sorbed CO_2 recalculated per 1 kg of solution. At the initial stages (up to 30 min), an active increase in CO_2 sorption is observed. Then, the rate of sorption increase stabilizes, and in the range from 140 to 160 minutes, a plateau is reached with an absorbed mass of carbon dioxide of approximately 2.53 g, which corresponds to 0.112 g CO_2/kg of solution. The experimental profiles demonstrate that CO_2 uptake increases with contact time, particularly during the initial stage of the experiment. With increasing contact time, the rate of uptake decreases, and a plateau-like region is observed for the systems containing 10 and 20 g of microsilica. For the 10 g system, the cumulative uptake reached approximately 1.76 g by 80 min, while for the 20 g system approximately 1.06 g was reached by 60 min. These observations may indicate that the readily accessible reactive or sorption sites had been substantially occupied under the experimental conditions. However, the observed plateau should be considered an apparent or quasi-equilibrium state rather than definitive evidence of thermodynamic equilibrium (Figure 3).

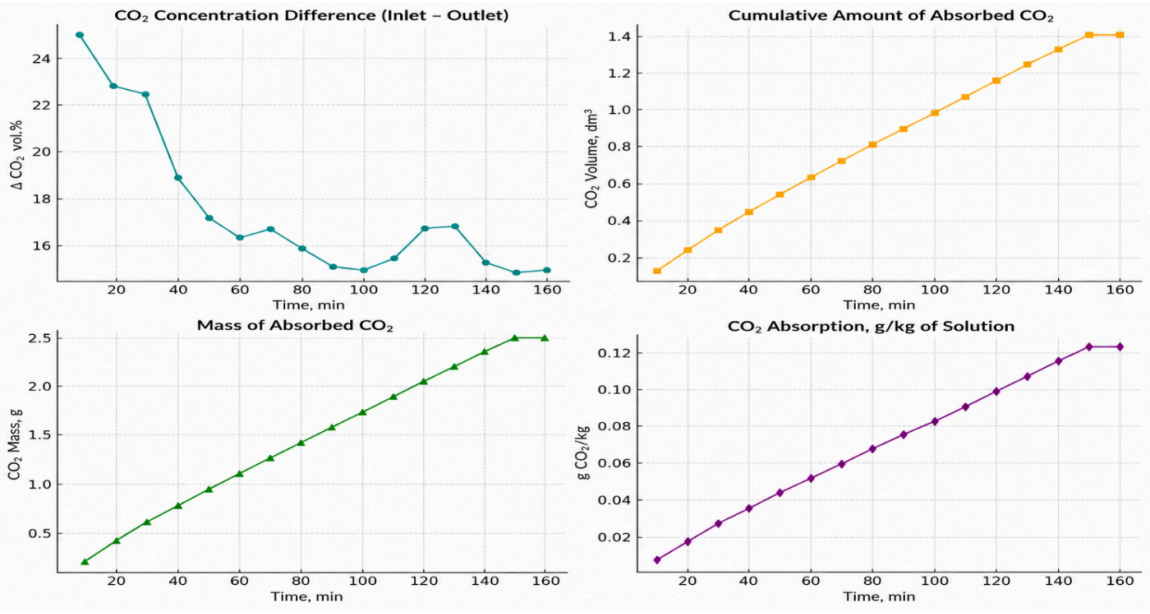


Fig. 3 - Dependence of CO_2 sorption rates on time for the "potassium humate – microsilica" system

CO_2 concentration difference (inlet - outlet) - shows how sorption efficiency changes over time.Integral amount of absorbed CO_2 (dm^3) - the cumulative value of the volume of gas absorbed. Mass of absorbed CO_2 (g) the increase in the mass of gas absorbed with increasing interaction time. CO_2 sorption per 1 kg of solution (g/kg) - the specific sorption capacity of the solution.

Below is a table 7 summarizing the regression equations for various parameters associated with the carbon dioxide (CO_2) sorption process by a silica-potassium humate composite. Each equation describes the dependence of the corresponding parameter on test time and can be used to analyze sorption kinetics.

These equations allow us to model and predict the behavior of a CO_2 sorption system over time, which is important for process optimization and sorbent efficiency assessment.

Table 7 – Regression equations for CO_2 sorption parameters

№	Parameter	Regression equation	Model Type	Symbols
1	CO_2 concentration difference (inlet-outlet), vol. %	$y = -0.067t + 25.35$	Linear	y – CO_2 concentration difference (% vol.), t – test time (min)
2	Integral amount of absorbed CO_2, dm³	$y = 0.0006t^2 + 0.010t + 0.01$	Polynomial	y – accumulated CO_2 (dm³), t – test time (min)
3	Mass of absorbed CO_2, g	$y = 0.011t + 0.01$	Linear	y – mass of sorbed CO_2 (g), t – test time (min)
4	CO_2 sorption per 1 kg of solution, g/kg	$y = 0.0007t + 0.0005y$	Linear	y – CO_2 sorption per 1 kg of solution (g/kg), t – test time (min)

Based on the regression equations presented for various parameters of the carbon dioxide (CO_2) sorption process by a silica-potassium humate composite, we can propose a generalized equation describing the kinetics of CO_2 sorption over time.

Since the integral amount of CO_2 absorbed (in dm³) reflects the cumulative nature of the process and takes into account changes in concentration, mass, and specific sorption, its equation can be considered generalized in formula 2:

$$V_{CO_2} = -1.159 \times 10^{-8}t^2 + 1.090 \times 10^{-5}t + 2.406 \times 10^{-5} \quad (2)$$

where:

1. $V_{CO2}(t)$ is the integral amount of absorbed CO_2 in dm³ at time t (min);
2. t is the test time in minutes.

This equation reflects the nonlinear nature of the accumulation of adsorbed CO_2 over time, consistent with experimental observations. The equation can be used for:

1. Predicting sorbent efficiency at various stages of the process;
2. Optimizing the contact time of the gas mixture with the sorbent to maximize CO_2 sorption;
3. Comparative analysis of various sorption systems and experimental conditions.

The equation serves as a useful tool for modeling and analyzing CO_2 sorption processes in laboratory and industrial settings.

Assuming a linear relationship between the sorbent mass and the volume of sorbed CO_2, the generalized equation for mass m (g) takes the formula 3:

$$\begin{aligned} V_{CO_2} = &-1.007 \times 10^{-4} + 1.358 \times 10^{-5}t - 2.070 \times 10^{-8}t^2 \\ &+3.015 \times 10^{-4}m - 1.362 \times 10^{-6}m^2 - 1.386 \times 10^{-8}mt - 2.093 \times 10^{-9}mt^2 \end{aligned} \quad (3)$$

where: m - mass of silica in grams.

Based on the data, the equations for different sorbent masses will be as follows:

For 1 g of sorbent (Formula 4):

$$V_{CO_2} = -1.159 \times 10^{-8}t^2 + 1.090 \times 10^{-5}t + 2.406 \times 10^{-5} \quad (4)$$

For 5 g of sorbent (Formula 5):

$$V_{CO_2} = -2.349 \times 10^{-8} t^2 + 1.361 \times 10^{-5} t - 5.179 \times 10^{-5} \quad (5)$$

For 10 g of sorbent (Formula 6):

$$V_{CO_2} = -7.445 \times 10^{-8} t^2 + 1.835 \times 10^{-5} t - 8.575 \times 10^{-5} \quad (6)$$

For 20 g of sorbent (Formula 7):

$$V_{CO_2} = -4.863 \times 10^{-8} t^2 + 1.095 \times 10^{-5} t + 3.333 \times 10^{-5} \quad (7)$$

An analysis of the results presented in Figures 4-5 shows that the carbon dioxide sorption process depends significantly on both the duration of contact between the gas and the sorbent and the mass of silica modified with potassium humate solution. As the experimental time increases, a steady increase in the amount of CO_2 absorbed is observed for all samples studied. However, the effect of sorbent mass is not proportional: under the investigated conditions, the maximum final CO_2 uptake was observed at a microsilica loading of 5 g, while further increases in microsilica loading to 10 and 20 g resulted in lower CO_2 uptake values.

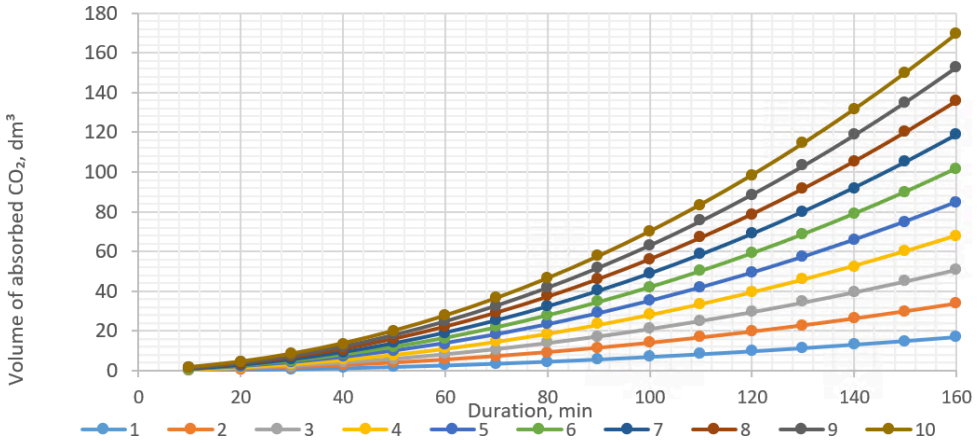


Fig. 4 - Dependence of the volume of absorbed CO_2 on time and the mass of the sorbent (silica) modified with a solution of potassium humate

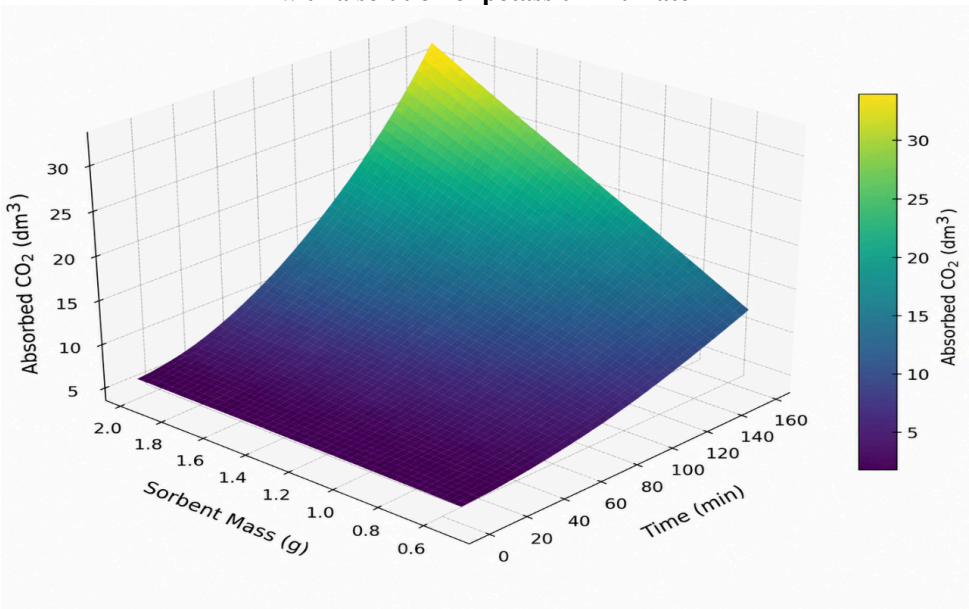


Fig. 5 - Graph of the dependence of the volume of absorbed CO_2 on time (X-axis) and the mass of the sorbent (silica) (Y-axis) modified with a potassium humate solution

Figures 4 and 5 illustrate the dependence of CO_2 uptake on contact time and microsilica loading. The graphical results confirm that contact time has a positive effect on cumulative CO_2 uptake during the initial stage of the experiment. However, the effect of microsilica loading is non-monotonic. The highest final CO_2 uptake was obtained at 5 g of microsilica, whereas increasing the loading to 10 and 20 g resulted in lower final uptake values.

Therefore, the graphical analysis does not support the assumption that increasing the microsilica mass continuously increases CO_2 capture. Instead, the results indicate the presence of an optimum microsilica loading under the selected experimental conditions. This optimum may reflect the balance between the amount of microsilica, the potassium humate concentration, the accessibility of active sites, and mass-transfer limitations within the system.

Overall, the obtained results demonstrate that the potassium humate–microsilica system is capable of capturing CO_2 under the investigated experimental conditions, with the highest measured uptake of 2.72 g CO_2 obtained at a microsilica loading of 5 g per 50 mL of potassium humate solution. Increasing the microsilica loading to 10 and 20 g decreased the measured CO_2 uptake to 1.76 and 1.06 g, respectively.

The results indicate that CO_2 uptake is controlled by the combined properties of the potassium humate and microsilica phases and does not depend solely on the amount of microsilica. Because KOH was used during humate preparation, the possible contribution of residual alkalinity cannot be excluded. Therefore, the present results should be interpreted as the overall CO_2 capture performance of the potassium humate–microsilica system. Determination of pH and residual alkalinity, together with characterization of the material before and after CO_2 exposure, is required to establish the relative contribution of alkaline species, humate functional groups, and microsilica to CO_2 capture.

Conclusion. The study examined the carbon dioxide sorption efficiency of an aqueous potassium humate solution supplemented with varying amounts of microsilica. The results showed that CO_2 sorption significantly depends on both the duration of contact between the gas mixture and the sorbent and the microsilica content in the system. All samples studied showed an increase in the amount of carbon dioxide absorbed over time, demonstrating the high sorption activity of the developed composite material.

Among the investigated microsilica loadings, the highest absolute CO_2 uptake was obtained at 5 g, reaching 2.72 g CO_2 after 160 min. This result identifies 5 g as the most effective loading within the tested range; further studies including control experiments and replicate measurements are required to establish statistical significance and determine the optimal composition of the system. For samples with microsilica masses of 1, 10, and 20 g, the amount of carbon dioxide adsorbed was 2.53, 1.76, and 1.06 g, respectively. However, for samples with 10 and 20 g of microsilica, earlier stabilization of the process was observed, indicating that sorption saturation had been reached.

Based on the experimental data, graphical dependences were constructed and regression equations were derived describing the kinetics of CO_2 sorption. It was shown that the accumulation of adsorbed carbon dioxide is nonlinear and can be described by a polynomial relationship, enabling prediction of process efficiency under various operating conditions.

Modeling for the silica-potassium humate system showed that the effect of sorbent mass on CO_2 uptake was non-monotonic under the investigated conditions. According to the calculations, increasing the silica content to 10 g resulted in a calculated CO_2 uptake value of 169.7 conventional units by the 160th minute. These results indicate that increasing the sorbent quantity alone does not necessarily lead to a proportional increase in the CO_2 sorption capacity of the material.

Based on the obtained data, the study confirms the potential of using a composite sorbent based on microsilica and potassium humate for carbon dioxide capture. Maximum CO_2 sorption efficiency was achieved with a microsilica content of 5 g, ensuring the extraction of up to 15% of CO_2 from the gas stream by the end of the experiment. These results can be used in the development of technologies for reducing greenhouse gas emissions and the creation of effective sorption materials for environmentally friendly applications.

Financing. *This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR34637102 "Development and implementation of technology for the integrated transformation of coal and coal waste, aimed at ensuring sustainable development and improving environmental safety").*

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021. DOI 10.1017/9781009157896.
2. Boot-Handford M.E., Abanades J.C., Anthony E.J. et al. Carbon capture and storage update// Energy & Environmental Science. −2014.- Vol.7.-P.130-189. DOI 10.1039/C3EE42350F.
3. Wu C., Huang Q., Xu Z. et al. A comprehensive review of carbon capture science and technologies//Carbon Capture Science&Technology.-2024.-Vol.1:100178. DOI 10.1016/j.ccst.2023.100178.
4. Raganati F. et al. CO_2 Post-combustion Capture: A Critical Review of Current Technologies and Future Directions// Energy & Fuels.- 2024.- Vol.38:13858-13905. DOI 10.1021/acs.energyfuels.4c02513.
5. Spietz T., Kazankapova M., Dobras S., Kassenova Z., Yermagambet B., Khalimon A.Y., Stelmach S. Characterization of Humic Acid Salts and Their Use for CO_2 Reduction//*Minerals*. −2024.- Vol.14(9):947. DOI 10.3390/min14090947.
6. Kazankapova M. Exploring the Potential of Humic Substances as Effective Sorbents for Reducing Greenhouse Gas Emissions//Eurasian Journal of Ecology.- 2023.-Vol.77(4).- P.41–51. DOI 10.26577/EJE.2023.v77.i4.04.
7. Amaraweera S.M., Gunathilake C.A., Gunawardene O.H.P., Dassanayake R.S., Cho E.-B., Du Y. Carbon Capture Using Porous Silica Materials//Nanomaterials.-2023.-Vol.13(14):2050. DOI 10.3390/nano13142050.
8. Bae J.Y., Jang S.G., Cho J., Kang M. Amine-Functionalized Mesoporous Silica for Efficient CO_2 Capture: Stability, Performance, and Industrial Feasibility//International Journal of Molecular Sciences.- 2025.- Vol.26(9):4313. DOI 10.3390/ijms26094313.
9. Wang B., Ajumobi O., He J. et al. Mesoporous Silica Skin on Clay Nanotubes for Carbon Capture//ACS Applied Nano Materials 2025.-Vol.8(25).- P.12885-12894. DOI 10.1021/acsanm.5c01071.
10. Sanna A., Uibu M., Caramanna G., Kuusik R., Maroto-Valer M.M. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO_2//Chemical Society Reviews.- 2014.- Vol.43(23).-P. 8049-8080. DOI 10.1039/C4CS00035H.
11. Wang T., Hovland J., Jens K.J. Amine-based nanofluids for CO_2 capture: A review//Nano Materials Science.-2020.-Vol.2(2).-P.96-109. DOI 10.1016/j.nanoms.2019.08.001.

Information about the authors

Kazankapova M.K. - PhD in Philosophy, Associate Professor, Academician of KazNANS,Institute of Coal Chemistry and Technology, Astana, Kazakhstan, e-mail: maira_1986@mail.ru;

Yermagambet B.T. - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of KazNANS, Institute of Coal Chemistry and Technology, Astana, Kazakhstan, e-mail: coaltech@bk.ru;

Kozhamuratova U.M. - Master of Natural Science, Institute of Coal Chemistry and Technology, Astana, Kazakhstan, e-mail: kozhamuratova.u@mail.ru;

Malgazhdarova A.B. - Master of Natural Science, Institute of Coal Chemistry and Technology, Astana, Kazakhstan, e-mail: malgazhdarova.ab@mail.ru;

Kassenova Zh.M. - Candidate of Chemical Sciences (PhD), Associate Professor, Member of KazNANS, Institute of Coal Chemistry and Technology", Astana, Kazakhstan, e-mail: zhanar_k_68@mail.ru;

Akshekina A.S. - Bachelor of Natural Science, Institute of Coal Chemistry and Technology, Astana, Kazakhstan, e-mail: akshekina11@gmail.com;

Bekbosynov A.B. - Master of Information Technology, Institute of Coal Chemistry and Technology», Astana, Kazakhstan, e-mail: adeka_mega@mail.ru;.

Информация об авторах

Казанкапова М.К. - PhD, асс. профессор, академик КазНАЕН, Институт химии и технологии угля, Астана, Казахстан, e-mail: maira_1986@mail.ru;

Ермагамбет Б.Т. - доктор химических наук, профессор, академик КазНАЕН, Институт химии и технологии угля, Астана, Казахстан, e-mail: coaltech@bk.ru;

Қожамұратова Ұ.М. - магистр естественных наук, старший научный сотрудник, Институт химии угля и технологии, Астана, Казахстан, e-mail: kozhamuratova.u@mail.ru;

Малғаждарова А.Б.- магистр естественных наук, старший научный сотрудник, Институт химии угля и технологии, Астана, Казахстан, e-mail: malgazhdarova.ab@mail.ru;

Касенова Ж.М. - кандидат химических наук (PhD), асс. профессор, член КазНАЕН, Институт углехимии и технологии, Астана, Казахстан, e-mail: zhanar_k_68@mail.ru;

Акшекина Ә.С. - бакалавр естественных наук, Институт химии угля и технологии», Астана, Казахстан, e-mail: akshekina11@gmail.com;

Бекбосынов Ә.Б. - магистр информационных технологии, Институт химии угля и технологии», Астана, Казахстан, e-mail: adeka_mega@mail.ru;.

Ответственный редактор: Оспанова М. К.
Верстка: Ундасынов Р. Е.

Подписано в печать: 29.09.2026

Издание: АО «Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова», 010000, г. Астана, Есильский район, ул. Кайыма Мухамедханова, 37 «А»
Рабочий телефон: +7(7172)72-58-12 (134)
E-mail: ct@kaztbu.edu.kz