



Қазақстан Республикасы
Ұлттық инженерлік академиясының

ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК

Национальной инженерной академии
Республики Казахстан

№ 4 (82)

Алматы
2021

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ РК**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
академик Б. Т. ЖУМАГУЛОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. К. Надиров – академик, заместитель главного редактора; **Е. И. Имангалиев** – ответственный секретарь; академик **Ж. М. Адилев**, академик **А. Ч. Джомартов**, академик **Р. А. Алшанов**, академик **М. Ж. Битимбаев**, академик **А. В. Болотов**, академик **А. И. Васильев** (Украина), академик **Б. В. Гусев** (Россия), академик **Г. Ж. Жолтаев**, академик **В. Ч. Вуйцик** (Польша), академик **К. К. Кадыржанов**, академик **К. С. Кулажанов**, академик **А. А. Кулибаев**, академик **М. М. Мырзахметов**, академик **Х. Милошевич** (Сербия), академик **Г. А. Медиева**, академик **А. М. Пашаев** (Азербайджан), академик **Н. М. Темирбеков**, академик **А. К. Тулешов**, академик **Б. Б. Телтаев**, академик **Ю. И. Шокин** (Россия).

**INTERNATIONAL
SCIENTIFICALLY-TECHNICAL JOURNAL
HERALD TO NATIONAL ENGINEERING ACADEMY
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

B. T. ZHUMAGULOV
Editor-in-Chief, academician

THE EDITORIAL BOARD:

N. K. Nadirov – academician, Deputy Editor; **Y. I. Imangaliyev** – Managing Editor; **Zh. M. Adilov**, academician; **A. Ch. Dzhomartov**, academician; **R. A. Alshanov**, academician; **M. Zh. Bitimbayev**, academician; **A. V. Bolotov**, academician; **A. I. Vasilyev**, academician (Ukraine); **B. V. Gusev**, academician (Russia); **G. Zh. Zholtayev**, academician; **Wójcik Waldemar** academician (Poland); **K. K. Kadyrzhanov**, academician; **K. S. Kulazhanov**, academician; **A. A. Kulibayev**, academician; **M. M. Myrzakhmetov**, academician; **H. Miloshevich**, academician (Serbiya); **G. A. Mediyeva**, academician; **A. M. Pashayev**, academician (Azerbaijan); **N. M. Temirbekov**, academician; **A. K. Tuleshov**, academician; **B. B. Teltayev**, academician; **Yu. I. Shokin**, academician (Russia).

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Республиканское общественное объединение
«Национальная инженерная академия Республики Казахстан».

Издается с 1997 года.

Выходит 4 раза в год.

Свидетельство о регистрации издания № 287 от 14.11.1996 г.,
выдано Национальным агентством по делам печати и массовой информации
Республики Казахстан.

Свидетельство о перерегистрации № 4636-Ж от 22.01.2004 г.,
выдано Министерством информации Республики Казахстан.

Журнал включен Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан
в перечень изданий для публикации основных результатов научно-технических работ соискателей
ученых степеней доктора философии PhD и доктора по профилю и ученых званий
доцента и профессора.

Журнал включен в международную англоязычную базу реферативных данных по техническим
наукам INSPEC.

Подписку на журнал можно оформить в отделениях связи АО «Казпочта»,
ТОО Агентстве «Евразия пресс» и ТОО Агентстве «Еврика пресс».

Подписной индекс:

для физических лиц – **75188**,
для юридических лиц – **25188**.

Подписка продолжается в течение года.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 80, к. 415.

Тел. 8-7272-915290, факс: 8-7272-915190,

e-mail: nia_rk@mail.ru, ntpneark@mail.ru, www.neark.kz

FOUNDER:

Republic public association
“National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan”.

Published since 1997 year.

Issued 4 times a year.

Certificate about registration the edition N 287, November, 14, 1996,
was given by National agency on affairs of press and mass information
of the Republic of Kazakhstan.

Certificate about re-registration N 4636-Zh, January, 22, 2004,
was given by Ministry of information of the Republic of Kazakhstan.

The Committee of Science of Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan has included the Journal into the list of issues for publication of the main results of scientific-technical investigations of applicants for scientific degrees (Doctor philosophy PhD, Doctor on specialization) and academic ranks (Professor and Associate professor).

The Journal was included into international English-language abstracts database on technical sciences “INSPEC”.

Subscription to journal may be drawn up at post offices of OJSC “Kazpochta”,
in PLL Agency “Evraziya press” and PLL Agency “Evrika press” .

Subscription index:

for natural persons – **75188**,
for juristic persons – **25188**.

Subscription continues during a year.

Address of editorial offices: 050010, Almaty city, Bogenbay Batyr str., 80, off. 415.

Tel. 8-7272-915290, fax: 8-7272-915190,

e-mail: nia_rk@mail.ru, ntpneark@mail.ru, www.neark.kz

30 ЛЕТ НЕЗАВИСИМОСТИ КАЗАХСТАНА И РОЛЬ НИА РК В ФОРМИРОВАНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ СТРАНЫ



*Жумагулов Б.Т.
Президент НИА РК
Депутат Сената Парламента РК, академик
Доклад к Сессии Общего собрания НИА РК
Ноябрь 2021*

Итоги деятельности НИА РК за 2020-2021 годы и задачи, вытекающие из Послания Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана 2021 года

Уважаемые коллеги!

В Национальной инженерной академии Республики Казахстан представлен **весь цвет казахстанской инженерной науки.**

Академия со дня своего основания стремится выполнять **важнейшую миссию.**

Она в том, чтобы **помогать государству и бизнесу** в технологическом обновлении производства, стать **«мостом» между наукой и практикой**, системно содействовать разработке и внедрению научных достижений в производство, совершенствованию законодательно базы науки.

А значит активно участвовать в формировании и реализации **научно-технологической политики страны.**

Эта миссия Инженерной академии **неизменна** на протяжении всего времени с обретения Казахстаном независимости.

И она **очень четко видна** в контексте стратегического курса развития нашей страны.

В 1991 году при поддержке Нурсултана Абишевича Назарбаева было создано Казахское отделение Инженерной академии СССР, которое затем было реорганизовано в Национальную инженерную академию Республики Казахстан.

Хочу напомнить, что у истоков создания Академии стояли люди, представлявшие собой цвет казахстанской науки и инженерии, внесшие большой вклад в экономику, образование и науку республики.

В числе первых инициаторов были А.А. Абдулин, К.М. Аухадиев, С.М. Байболов, У.Б. Баймуратов, Ш.Х. Бекбулатов, Г.Р. Бекжанов, А.В. Болотов, Ф.Х. Галимов, У.А. Джолдасбеков, А.Ч. Джомартов, Б.Т. Жумагулов, Т.Ж. Жунусов, Х.Р. Казыха-

нов, У.К. Караманов, С.М. Кожаметов, А.А. Кулибаев, Н.К. Надилов, Б.Г. Нуржанов, М.Е. Нурумов, Б.П. Паримбетов, И.Р. Польшанский, О.С. Сабденов, А.А. Скаков, С.Т. Такежанов, Я.С. Тлевесов, М.Ф. Уркумбаев.

В соответствии с Постановлениями Кабинета Министров РК от 13 августа 1991 года № 475 и от 22 января 1992 года № 56 Национальная инженерная академия РК была определена высшим научно-методическим и координационным центром инженерного дела в Казахстане.

Знаковым событием в истории Национальной инженерной академии РК стал Первый съезд инженеров Казахстана, состоявшийся в 1993 году с участием Нурсултана Абишевича Назарбаева, Президента Республики Казахстан.

В своем выступлении Глава Государства обозначил стратегический курс развития инженерной мысли, технологического и инновационного прорыва.

Он поддержал идею укрепления и повышения авторитета общественного объединения, консолидировавшего в своих рядах ведущих ученых и специалистов, отметив, что мы должны оказывать помощь государству и бизнесу в технологическом обновлении производства.

Президент страны Н.А. Назарбаев предложил для сохранения прикладных научных исследований создать Межотраслевой научно-технический совет по проблемам развития промышленности, энергетики, строительства, транспорта и коммуникаций РК (МНТС).

Совет был создан Постановлением Правительства РК. Рабочим органом МНТС была определена Национальная инженерная академия РК. В самые тяжелые годы реформ она сыграла большую роль в сохранении базового потенциала ведущих НИИ и научных организаций Казахстана.

За 30 лет под руководством **Первого Президента Казахстана – Елбасы Нурсултана Абишевича Назарбаева мы кардинально продвинулись** по пути формирования и совершенствования успешного, стабильного и авторитетного на мировой арене государства.

4 сентября 2009 года Нурсултан Абишевич выдвинул кардинально новые подходы и решения в сфере науки. Они были озвучены на совещании под руководством Президента Республики Казахстан и произвели эффект «разорвавшейся бомбы». По сути, была предложена принципиально новая модель управления научной сферой. Этого уже давно ждали наши ученые. И выдвинутые Главой государства положения не только оправдали, но и намного превзошли такие ожидания. Они кардинально изменили базовые принципы взаимоотношений государства и науки, резко повысили роль ученых и проводимых ими исследований в развитии страны.

В целях системной реализации этих установок Главой государства была разработана принципиально новая законодательная модель, и в 2011 году был принят новый Закон «О науке». Тем самым отечественная наука получила **современную модель управления**, приближающуюся к передовой мировой методологии и практике.

В таком же ключе была принципиально пересмотрена **система подготовки квалифицированных кадров**, в том числе и для науки.

В этих непростых процессах непосредственно участвовала и наша Академия, многие и многие ее представители.

Большое им за это спасибо!

История подтвердила прогрессивность и жизненность такой модели, ее основные положения выдержали проверку временем, показали высокую способность к модернизации и актуализации.

Но многое еще предстоит сделать.

Наука еще не заняла подобающее ей место в экономике страны, в эффективном и востребованном внедрении своих достижений в практику.

Но стремление государства выйти на эту планку есть, и оно последовательно реализуется в документах стратегического курса нашей страны.

Уже есть **обнадеживающие практические шаги.**

Еще в 2019 году были заметно увеличены объемы грантового и программно-целевого финансирования научных исследований.

А на 2022-2024 годы МОН РК на науку предусмотрено **526 млрд тенге, из них в 2022 году – 62 млрд тенге.**

То есть только на 2022 год запланировано повышение программно-целевого финансирования на 12%, а грантового – почти на 24%.

Для дальнейшего развития страны и науки сегодня ставятся и **новые качественные ориентиры.**

Вы их знаете из **Послания народу Казахстана** Главы государства К.К.Токаева от 1 сентября текущего года.

Послания Президента занимают особое место в развитии нашей страны, они стали де-факто документами стратегического планирования высшего уровня.

Еще в первом своем Послании как Президента Республики Казахстан от 2 сентября 2019 года К.К. Токаев особо подчеркнул: «Особого внимания требует ситуация в науке. Без нее мы не сможем обеспечить прогресс нации».

Эту проблему надо рассматривать, прежде всего, через призму **повышения уровня научных исследований и их применения на практике.**

Главой государства показан и ряд **важнейших практических направлений развития**, особо актуальных для страны.

В них, безусловно, может и должна **сказать свое слово и отечественная наука.**

Исследовательская деятельность находится в числе важнейших направлений работы НИА РК.

За 30 лет ученые академии выполнили более **5900** проектов по важнейшим фундаментальным и прикладным научным направлениям, **447** научно-целевых программ и **62** международных проектов.

Проведены более **10 тысяч** конференций, издано более **31 тысячи** публикаций.

И это не просто цифры – за ними большой труд членов нашей академии и трудовых коллективов, где они работают и часто – возглавляют.

Это пример реальной консолидации научно-инженерного сообщества.

Ее итогом является чрезвычайно широкий спектр **достижений**: от новых технологий обработки горно-металлургического и углеводородного сырья и получения новых материалов до производства суперкомпьютеров, от программных комплексов для оценки антропогенного загрязнения до возобновляемых источников энергии нового типа (солнечных, ветровых и комбинированных) и успехов в АПК (Байсерке-Агро).

И главное для нас – не только научный уровень исследований, но и их переход в технологические разработки для производства.

В этом, как и в других направлениях, наша Академия была и устойчиво остается на острие требований времени.

Весьма важным направлением нашей работы стало участие в законотворческой и законодательной деятельности.

1 сентября текущего года Президент страны подчеркнул, что **«Важнейший приоритет – развитие науки. Для решения накопившихся проблем в этой сфере нужно до конца года внести изменения в законодательство»**.

Во исполнение поручений Главы государства членами Академии была проведена очень серьезная работа:

– Предложена норма о создании апелляционной комиссии, утверждении ее положения и состава. Данная норма будет способствовать повышению **объективности и прозрачности решений** национальных научных советов.

– В целях развития науки срок финансирования проектов и программ продлен до **пяти лет**. Для выполнения серьезных и качественных научно-исследовательских работ трехгодичного срока недостаточно.

Само предложение о продлении сроков научных исследований было очень хорошо воспринято учеными, так как этот вопрос поднимался далеко не первый год.

– Для постоянной наработки отечественными научными организациями опережающего и системного задела по ключевым направлениям **фундаментальной науки** предложена норма о ее **прямом финансировании**.

Уполномоченный орган в области науки на конкурсной основе будет формировать перечень научных учреждений, осуществляющих фундаментальные исследования.

– За счет базового финансирования науки решится вопрос поддержки **ведущих ученых** и выплаты им достойной заработной платы.

Из публикаций в СМИ и бесед с учеными мы видим, что вопросы прямого финансирования фундаментальных исследований и непрерывной оплаты труда ведущих ученых находят большую поддержку в научном сообществе.

Бесспорно, что стремительная динамика новых вызовов, с которыми сегодня сталкивается весь мир, требует конкурентоспособной науки, повышения ее роли в социально-экономическом развитии страны и внедрении инноваций.

Именно в этом контексте мы должны рассматривать пути дальнейшего развития казахстанской науки.

В связи с этим нами продолжается законотворческая работа по следующим основным направлениям:

Первое – повышение эффективности и результативности казахстанской науки, освоения ее достижений в практике.

Второе – повышение и реструктуризация финансирования исследований и работ.

Третье – улучшение условий труда ученых и престижа их профессии.

Четвертое – повышение действенности, объективности и прозрачности системы управления наукой. В этом вопросе важным является расширение научного самоуправления и участия ученых в определении научной политики.

Уверен, что эта работа окажет большую помощь ученым и будет способствовать обеспечению соответствия научной отрасли требованиям времени и повышению уровня проведения научных исследований, их результативности, статуса науки и ученого.

Отмечу, что члены Академии внесли и продолжают вносить заметный вклад в **совершенствование законодательства** о науке и коммерциализации ее достижений, об образовании, об инновационной и патентной деятельности, о статусе педагога, об экологии и по многим другим направлениям.

Это приносит вполне конкретную пользу, и такую задачу мы должны решать и далее.

Также важное направление работы Академии – искать и использовать механизмы для поддержки талантливых инженеров и ученых, стимулирования их творчества, прежде всего, в научно-практической плоскости.

Уже седьмой год мы будем присуждать почетные звания **«Лучший инженер года»**.

В целях поощрения выдающихся достижений в области научно-инженерной деятельности учреждены такие награды НИА РК, как Большая золотая медаль «Инженерная Слава», почетное звание и нагрудный знак «Почетный инженер Казахстана», нагрудный знак «За заслуги в развитии инженерного дела в Казахстане».

Для поощрения лучших студентов предназначены **стипендии имени академика У.А.Джолдасбекова** и стипендии Национальной инженерной академии Республики Казахстан.

Это целый комплекс взаимоувязанных мер поддержки реального научно-инженерного творчества.

Не менее важны направления повышения качества и целенаправленности обучения будущих специалистов производства, укрепления связи вузов с бизнесом.

Здесь наше продвижение еще недостаточно, надо работать активнее, задуматься над созданием в регионах **механизмов и центров взаимодействия Академии и вузов с бизнесом**, как по науке и инновациям, так и по подготовке кадров.

Ежегодно Академия проводит большое количество международных, республиканских конференций.

В нашем активе – Всемирный конгресс WSEC-2017 беспрецедентного для казахстанской науки уровня, форумы по строительной индустрии, транспортным проблемам и многим другим вопросам.

На Конгрессе WSEC-2017 был представлен весь цвет мировой науки и инженерной мысли в сфере энергии будущего:

- 4 Нобелевских лауреата,
- 18 лауреатов премии «Глобальная энергия»,

• Более 1000 видных ученых, инженеров, руководителей бизнеса и органов управления,

Были представлены 51 страна мира и крупнейшие международные организации.

Всемирный конгресс прошел очень успешно и стал одним из важнейших достижений нашей Академии.

Это результат 3-летней напряженной работы, в которую были активно вовлечены многие члены нашей Академии.

Много внимания мы уделяем и будем уделять развитию международных связей Академии.

Можно с уверенностью сказать, что они у нас самые развитые среди всех академий Казахстана.

Мы активно работаем с Международной инженерной академией (МИА) в Москве, с Федерацией инженерных институтов исламских стран (ФЕИС), занимаем там авторитетные позиции и даже председательствовали в ФЕИС.

Академия сотрудничает с Европейским союзом инженерных академий, является ассоциированным членом CAETS – Всемирного совета академий инженерных и технологических наук (США), имеет научные контакты с десятками авторитетных международных и национальных организаций мира.

Активно работают **Отделения и Филиалы Академии**, многие из их членов руководят и участвуют в ответственных грантовых проектах и программно-целевых исследованиях.

В рамках задач **цифровизации экономики** Национальная инженерная академия РК наработала большой потенциал для создания «умных» нефтепромыслов и решения задач по таким направлениям как:

1. Разработка интеллектуальных систем для реальных месторождений.
2. Оцифровка объектов нефтепромысла.
3. Разработка электронной геологической модели залежи в динамике добычи нефти (для реального месторождения).
4. Разработка технологии интенсификации нефтеотдачи (также для реального месторождения).
5. Разработка и внедрение новых технологий по другим вопросам нефтегазового сектора страны.

В 2019 году творческая группа ученых НИА РК получила диплом на **научное открытие «Явление низкотемпературной вакуумно-волновой конверсии углеродородного сырья»**.

Эта революционная для нефтехимической, нефтеперерабатывающей и энергетической отраслей технология ведет к упразднению целого ряда звеньев из традиционной технологической цепи, в разы удешевляет производство высококачественных топлив и, что не менее важно, отвечает строжайшим современным требованиям энергетической и экологической безопасности.

Сейчас ведется работа по внедрению этой технологии.

Хочу остановиться на еще одном стратегическом направлении – **агропромышленном секторе**.

Академия прекрасно понимает его значимость.

В 2019 году у нас было создано новое **отделение инновационных технологий и агропромышленный комплекс**.

Более того, участие в развитии **АПК** мы считаем одной из самых приоритетных задач Академии.

Эту работу в Академии курировал наш вице-президент, выдающийся общественный и государственный деятель **Досмухамбетов Темирхан Мынайдарович**.

Ведь новый уникальный этап в его жизни был связан с сельскохозяйственной отраслью. Он организовал агрохолдинг «Байсерке Агро». Объединив под своим началом талантливых ученых и практиков, внедряя самые новейшие мировые достижения аграрной науки, он добился невероятных результатов. Научно-производственный агрохолдинг «Байсерке Агро» за короткое время получил самые высокие результаты. По всем показателям растениеводства и животноводства **превышены практически все национальные, региональные и значительная часть мировых достижений**. Впервые привлечены американские инвестиции в получении новых репродуктивных биоматериалов. Создана уникальная лаборатория, позволяющая вывести селекционную работу на невиданный в нашей стране уровень.

Сейчас агрохолдинг стал настоящим центром передовой науки и практики для всего агропромышленного комплекса страны. В 2019 году за выдающиеся достижения в аграрном секторе Досмухамбетов Т.М. был удостоен Государственной премии РК в области науки и техники.

Я очень рад видеть здесь его соратников и учеников. Уверен, что они достойно продолжают его дело.

Очень большую работу выполняет отделение **Транспорта и коммуникаций**. Ими ведутся работы по улучшению технических свойств дорожного асфальтобетона. Были разработаны новые эффективные технологии получения ряда наноматериалов, получены отечественные углеродный нанопорошок, нанобитумы и наноасфальтобетоны, которые исследованы в аккредитованных научных лабораториях и успешно апробированы на производстве – построены участки автомобильных дорог в гг. Нур-Султан и Алматы.

Активную работу ведет **Горно-геологическое** отделение.

Согласно поручению Главы государства К.К. Токаева, озвученного в Послании народу Казахстана 1 сентября 2021 года, члены отделения активно участвуют в работе по созданию **Национальной геологической службы**.

Хочу отметить работы по актуализации геологической карты приграничной территорий РК – Китай и работы по геологической разведке на территории Центральной Азии (включая и территорию Казахстана) с участием 5-ти стран (Казахстан, Россия, Китай, Южная Корея, Монголия).

Глава государства особо отмечает, что развитие цифровой индустрии обеспечит импульс всем другим отраслям.

В этом отношении отделение **Вычислительных и информационных технологий** совместно с Горно-геологическим отделением ведет работу по разработке модуля геоинформационной системы (ГИС), основанного на методах интеллектуального выявления аномалий, для глубинного прогнозно-поискового моделирования месторождений.

Построена комплексная прогнозно-минерагеническая модель, состоящая из геохимической и геофизической части и цифрового моделирования методами обратных задач геохимии и геофизики.

Работа ведется в очень тесном сотрудничестве с ТОО «Академсеть», где имеется современный центр обработки данных (Дата центр).

В отделении **Машиностроения** ведутся успешные работы в области космических технологий. К примеру, членами отделения были разработаны:

- экспериментальный образец комплекта целевой аппаратуры научно-технологического космического аппарата,
- экспериментальный образец системы управления движением и навигации микроспутника,
- экспериментальный образец звездного датчика для космических аппаратов,
- опытный образец системы высокоточной пространственной ориентации объектов средствами спутниковой навигации.

Были выполнены опытно-конструкторские работы по созданию дифференциальных станций и специального программного обеспечения для системы высокоточной спутниковой навигации Республики Казахстан и многие другие.

Членами отделения **Экономики** разработаны:

- Методический подход к оценке потенциала социально-экономического регионов;
- Методология рейтинговой оценки устойчивости экономики и социальной сферы городов;
- Карта рисков устойчивого развития городов;
- Концептуальные основы и рекомендации по внедрению модели инклюзивного регионального развития экономики и социальной сферы.

Ученые Национальной Инженерной Академии вносят свой весомый вклад в реформирование и повышение качества образовательной системы Республика Казахстан.

Например, **Западно-Казахстанский филиал**, центром деятельности которого является Казахстанский университет инновационных и телекоммуникационных систем, разрабатывает и предлагает к внедрению в образовательный процесс вузов новых IT-технологий. Информатизация научной, учебной и управленческой деятельности вуза здесь рассматривается как средство повышения их эффективности и качества. Разработки ученых филиала создают учебно-методическую базу данных, позволяющую успешно работать в условиях информационного общества; обеспечивать равный доступ к образовательным услугам; повышать уровень образования в сфере IT-технологий и так далее.

Кстати КУИТС, благодаря разработкам ученых – членов Западно-Казахстанского филиала, получил **одним из первых в стране лицензию на право обучать студентов по дистанционным образовательным технологиям.**

Коллектив **Жамбылского филиала** продолжал активно принимать участие в реализации проекта производства комплексных минеральных удобрений в Жамбылской области, в создании крупнейшего Химического кластера.

При этом особое внимание уделялось вопросу развития возобновляемых источников электроэнергии. При участии ученых филиала в области за последние годы введены в действие 9 объектов возобновляемых источников энергии.

В том числе запущена самая крупная в Центральной Азии солнечная электростанция «Бурное солар-1», мощностью 50 МВт, которая уже вышла на 100%-ную мощность.

Карагандинский филиал действует на базе Карагандинского технического университета.

Его деятельность вносит весомый вклад в технологическую модернизацию промышленности региона. В результате эффективного сотрудничества с производством объем финансирования НИОКР, выполняемых учеными университета, составляет 850-900 млн тг ежегодно, разрабатываются и внедряются в производство импортозамещающие наукоемкие и цифровые технологии. Университет занимает особое место в решении проблем подготовки кадров

Актюбинский филиал, действующий на базе Актюбинского университета им. К.Жубанова ведет работы по отработке технологии и определению технико-экономических показателей переплава (в насыпном виде) пыли от дробления высокоуглеродистого феррохрома Актюбинского завода ферросплавов в слитки.

Реализуется проект по количественной оценке содержания хрома в атмосферном воздухе г. Актобе с использованием метода высокофункциональных измерений.

И это далеко не все направления деятельности НИА РК. По всем им мы будем продолжать работу, эффективно коррелируя со стратегическими установками развития страны.

Дорогие друзья!

Сегодня Академия объединяет золотой фонд научно-инженерного потенциала – сотни видных ученых, руководителей и специалистов являются ее членами.

Это наша опора, лучшие представители научно-инженерного сообщества.

И в этом немалая заслуга Президиума НИА РК и Конкурсной комиссии во главе с ее бессменным руководителем академиком А.А.Кулибаевым.

За эти годы Лауреатами Государственной премии в области науки и техники стали 49 членов нашей Академии, более 100 человек стали Лауреатами различных Международных премий.

Мы приобрели высокий авторитет в стране и на международной арене.

На сегодня, следуя стратегическому курсу развития Республики, Академия стала центром, генерирующим идеи и решения в области техники и технологий, крупным и авторитетным объединением, развивающим научно-инженерную деятельность в Казахстане.

Желаю всем членам Академии, работникам возглавляемых ими организаций, счастья и новых достижений!

УДК: 621.833.2

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.113>

С. М. АХМЕТОВ^{1*}, М. Т. УСЕРБАЕВ², А. Б. БОЛАТОВА², Ж. У. ИКЛАСОВА³

¹*Казахстанское отделение по г. Нур-Султан Международной научной школы устойчивого развития им. акад. П.Г. Кузнецова*

²*Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина*

³*Атырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЯ С НЕОДНОРОДНОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние (НДС) стержня с неоднородно-слоистой структурой. На основе краткого обзора и анализа современного состояния исследований стержневых систем обосновывается актуальность исследования НДС слоисто-неоднородных деревянных конструкций с учётом наличия различной сопротивляемости слоев на растяжение и сжатие. На этом основании авторами решается задача определения НДС слоисто-неоднородных деревянных стержней в условиях ползучести, где учитываются такие факторы, как влажность и температура, а также разность сопротивляемости слоев древесины растяжению и сжатию. При решении задачи учтены также механо-сорбционная ползучесть древесины.

Установлена последовательность расчета НДС для каждого узла поперечного сечения слоев стержня.

Ключевые слова: *математическая модель, напряженно-деформированное состояние, стержень с неоднородной слоистой структурой, растяжение, сжатие, ползучесть.*

Вопросы исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции с неоднородными слоистыми структурами являются одним их актуальных задач современной механики упругого деформируемого тела. Хорошими научными основами при таких исследований являются энергетические методы исследования, в которых на основании применения закона сохранения энергии разработаны методики численного НДС стержней с учетом температурных расширений [1 - 5].

В работе [1] показан расширенный метод изменения энергии поперечной деформации для оценки повреждений, связанных с ограниченными модальными данными в балочно-подобных конструкциях, где учитывается корреляция между аналитическими модальными данными и измеренными неполными модальными данными. Пред-

* E-mail корреспондирующего автора: axmetov_aing@mail.ru

ложенный авторами метод успешно применяется для оценки серьезности единичных повреждений в балочно-подобной конструкции и может быть полезен в технологии технического обслуживания и в системе мониторинга состояния конструкций.

В работах [2, 3] рассматриваются методы исследования термонапряженно-деформированного состояния стержня ограниченной длины при одновременном наличии локальных тепловых потоков, теплообмена и теплоизоляции, которые основаны на законе сохранения энергии. Методы позволяют определять поле распределения температуры и три составляющие деформаций и напряжений, а также величину удлинения стержня переменного сечения по длине и результирующую осевую силу с точностью, удовлетворяющей законам сохранения энергии. С такими же успешными результатами исследованы также и стержни с постоянными сечениями по ограниченной их длине при различных условиях температурных расширений [4, 5].

Приведенные выше методики исследования НДС стержневых систем рассчитаны для случаев, когда рассматриваемый элемент преимущественно моделирует металлические конструкции.

Однако в технике, особенно при создании уникальных конструкций, чаще используются конструктивные элементы с неоднородными слоистыми структурами. В качестве примера можно привести деревянные конструкции со слоистыми элементами, в частности клефанерные элементы.

В работах [6, 7] достаточно подробно освещена методика исследования влияния упруго-пластических свойств древесины на длительные процессы деформирования изгибаемых деревянных и клефанерных элементов покрытий зданий. Изучены характеристики ползучести от времени ползучести древесины при воздействии природных нагрузок.

Однако в практике проектирования несущих элементов конструкций встречаются случаи, когда при малых напряжениях и деформациях необходимо достаточно точно описать изменения их НДС, а также прочностные характеристики материала на основе применения теории ползучести.

Учёт возможности расчёта разной сопротивляемости древесины растяжению и сжатию при ползучести слоисто-неоднородных конструкций даст большие возможности для оптимизации, а также рационального использования различных пород древесины.

Современные методы решения задач расчёта конструкций с учётом ползучести представлены в обзорах [8 - 10].

Анализ указанных выше работ показал, что в них недостаточно полно рассмотрены задачи определения НДС слоисто-неоднородных деревянных конструкций с учётом наличия различной сопротивляемости слоёв на растяжение и сжатие.

Схема бруса в трехмерной декартовой прямоугольной системе координат представляет собой стержень, состоящий из нескольких слоёв. Слои могут быть выполнены из различных материалов и могут располагаться как горизонтально, так и вертикально (рис. 1). Общее число слоёв принципиально не ограничено. Условия контакта слоёв считаются совершенными – отсутствуют взаимные смещения любого направления в плоскости контакта.

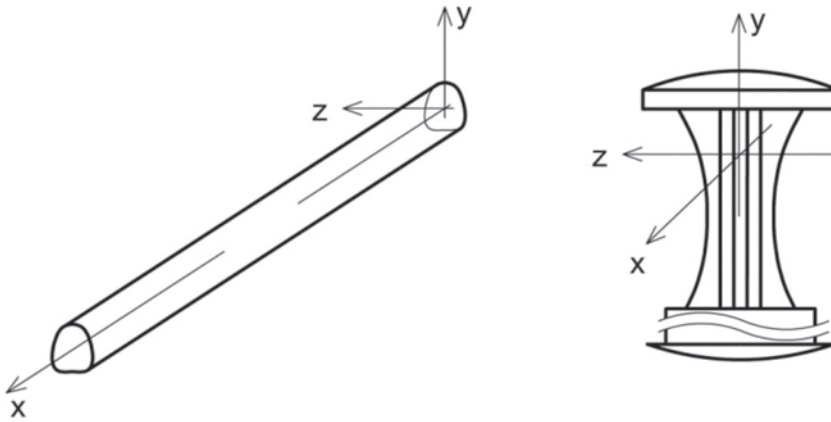


Рисунок 1 – Общий вид и форма поперечного сечения слоистого стержня

Начало системы координат xuz помещаем в левый конец стержня. Ось x совпадает с продольной осью стержня и имеет определённую геометрическую привязку к поперечному сечению.

Для упрощения получающихся в дальнейшем решений будем считать, что структуры гибридных стержней и распределений внешних нагрузок согласованы так, что они в процессе нагружения либо вовсе не вызывают эффектов закручивания, либо они столь незначительны, что ими можно пренебречь. В общем случае стержень испытывает изгиб в плоскостях xu и xz с растяжением-сжатием. Все нагрузки приведены к продольной оси стержня – оси x .

Деформации и перемещения будем считать малыми. Это позволит записывать уравнения равновесия для недеформированного состояния:

$$\frac{d^2 M_z}{dx^2} = q_y - \frac{dm_z}{dx}, \quad \frac{d^2 M_y}{dx^2} = q_z - \frac{dm_y}{dx}, \quad \frac{dN}{dx} = -qx. \quad (1)$$

Здесь N – проекция вектора внутреннего усилия на ось x , M_z, M_y – проекции вектора внутреннего момента на оси z и y . Точка приложения вектора внутренних усилий лежит на оси стержня. Величины q_x, d_y, q_z – проекции вектора распределённой нагрузки, приложенной к оси стержня, m_z, m_y – проекции вектора распределённого момента на оси z и y .

Интегрируя уравнения (1), получим выражения для внутренних усилий:

$$N(x) = N(0) - \int_0^x q_x dx,$$

$$M_z(x) = M_z(0) - Q_y(0)x - \int_0^x m_z dx + \int_0^x \left(\int_0^x q_y dx \right) dx, \quad (2)$$

$$M_y(x) = M_y(0) - Q_z(0)x - \int_0^x m_y dx + \int_0^x \left(\int_0^x q_z dx \right) dx,$$

В случае, если стержень статически определимый, то значения внутренних усилий в начале координат определяем из условий равновесия узлов. Иначе необходимо составлять дополнительные условия совместности деформаций.

Принимается справедливой теория плоских сечений Бернулли и упрощённое выражение кривизны плоской кривой. В соответствии с данными ограничениями связь между деформациями и перемещениями стержня выражается следующими известными соотношениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, y, z) &= \varepsilon_0 - y \cdot k_z - z \cdot k_y, \\ \varepsilon_0(x) &= \frac{du_0}{dx}, \quad k_y = \frac{d^2v_0}{dx^2}, \quad k_z = \frac{d^2w_0}{dx^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ε_0 , k_z , k_y – продольная деформация на уровне оси стержня и изменение кривизны оси стержня в проекции на оси z и y , $u_0(x)$, $v_0(x)$, $w_0(x)$ – компоненты перемещений точек на выбранной осевой линии. Интегрируя соотношения (3), получим:

$$\begin{aligned} u_0(x) &= u_0(0) + \int_0^x \varepsilon_0 dx, \\ v_0(x) &= v_0(0) + \varphi_y(0) \cdot x + \int_0^x \left(\int_0^x k_y dx \right) dx, \\ \varphi_y(x) &= \varphi_y(0) + \int_0^x k_y dx, \\ w_0(x) &= w_0(0) + \varphi_z(0) \cdot x + \int_0^x \left(\int_0^x k_z dx \right) dx, \\ \varphi_z(x) &= \varphi_z(0) + \int_0^x k_z dx, \end{aligned} \quad (4)$$

Величины $u_0(0)$, $v_0(0)$, $w_0(0)$, $\varphi_y(0)$ и $\varphi_z(0)$ находим из условий закрепления стержня.

Связь между нормальными напряжениями и деформациями опишем следующим образом. Деформации древесины состоят из следующих частей: ε_{el} – упругие деформации, ε_{pl} – пластические деформации, ε_{visk} – деформации ползучести, ε_{ms} – деформации механо-сорбционной ползучести и деформации усадки/набухания ε_u .

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{visk} + \varepsilon_{ms} + \varepsilon_u. \quad (5)$$

Соответственно приращение деформаций на соответствующем шаге по времени состоит из следующих компонент:

$$\Delta\varepsilon(t) = \Delta\varepsilon_{el} + \Delta\varepsilon_{pl} + \Delta\varepsilon_{visk} + \Delta\varepsilon_{ms} + \Delta\varepsilon_u. \quad (6)$$

где $\Delta\varepsilon_{el}$ – приращение упругих деформаций, $\Delta\varepsilon_{pl}$ – приращение пластических деформаций, $\Delta\varepsilon_{visk}$ – приращение деформаций ползучести, $\Delta\varepsilon_m$ – приращение деформаций механо-сорбционной ползучести, $\Delta\varepsilon_u$ – приращение деформаций усадки/набухания.

Связь между нормальными напряжениями и деформациями ε_{el} и ε_{pl} выражается степенным многочленом вида:

$$\sigma = E_1(\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}) + E_2(\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl})^2 + E_3(\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl})^3 \tag{7}$$

где E_i – константы, зависящие от механических свойств материала, а также температуры (T) и относительной влажности (u).

$$E_i = E_{iref} [1 + a_{i1}(T - T_{ref}) + b_{i1}(u - u_{ref})] \tag{8}$$

Коэффициенты E_{iref} , a_{i1} и b_{i1} должны определяться экспериментально на предмет растяжение-сжатие при различных значениях температуры и влажности древесины. Константы T_{ref} и u_{ref} выбираются в процессе планирования испытаний.

Деформации ползучести задаются шестью элементами Кельвина:

$$\varepsilon_{visk}(t) = J_0(u_{ref}) \int_0^t \left\{ \sum J_n^\pm \left(1 - e^{-\frac{t-t'}{\tau_n^\pm}} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial t'} \right\} dt' \tag{9}$$

Численные значения J_n^\pm и τ_n^\pm определяются также на основе экспериментов отдельно для растяжения и отдельно для сжатия древесины. Приращение деформаций ползучести можно вычислить, используя правило трапеций:

$$\Delta \varepsilon_{visk} = J_0(u_{ref}) \sum J_n^\pm \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_n^\pm}} \right) \left(\frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_n^{hist} \right) \tag{10}$$

где σ_n^{hist} обновляется после каждой итерации

$$\sigma_n^{hist} = \left(\sigma_{n-1}^{hist} + \frac{\Delta \sigma}{2} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_n^\pm}} + \frac{\Delta \sigma}{2} \tag{11}$$

Модель механо-сорбционной ползучести:

– для деформаций растяжения:

$$\varepsilon_{ms}(t) = J^\infty \int_0^t \left\{ 1 - e^{-c(\sum_0^t |\Delta u| - \sum_0^{t'} |\Delta u|)} \right\} d\sigma(t') \tag{12}$$

– для деформаций сжатия:

$$\varepsilon_{ms}(t) = J^\infty \int_0^t \left\{ 1 - e^{-c(\sum_0^t |\Delta u| - \sum_0^{t'} |\Delta u|)} \right\} d\sigma(t') + J_0(u_{ref}) e^{\int_0^t \sigma(t') |du(t')|} \tag{13}$$

где $J^\infty = 0.7 J_0(u_{ref})$. При сжатии добавляется линейная часть деформаций, отвечающая за потерю устойчивости микрофибрил и, следовательно, считается полностью не восстанавливаемой. Оставшаяся часть механо-сорбционных деформаций может полностью восстанавливаться при изменении влажности и разгрузке.

Для механо-сорбционных деформаций также используем при интегрировании правило трапеций. Приращение деформаций определяется выражением для отрицательных напряжений:

$$\Delta \varepsilon_{ms} = J^\infty \left(1 - e^{-c|\Delta u|} \right) \left(\frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_{hist} \right) + \sigma J_0(u_{ref}) e^{|\Delta u|} \quad (14)$$

$$\sigma_n^{hist} = \left(\sigma_{n-1}^{hist} + \frac{\Delta \sigma}{2} \right) e^{-c|\Delta u|} + \frac{\Delta \sigma}{2} \quad (15)$$

Если в (13) напряжения растягивающие, то последнее слагаемое удаляется. Как для ползучести, так и для механо-сорбционной ползучести считается применимым принцип суперпозиций Больцмана за тем исключением, что последний член в (13) является невосстанавливаемым.

Деформации усадки/набухания древесины, параллельные волокнам, подразумеваются зависящими от деформации, которая определяется по формуле:

$$\varepsilon_u = (\alpha - b\varepsilon(t))\Delta u \quad (16)$$

где $b = 1,3$, a – коэффициент усушки параллельно волокнам, Δu – приращение относительной влажности древесины.

Рассмотрим систему разрешающих уравнений.

Упругие и пластические деформации находим из уравнения (7) по известной методике, где, преобразуем данное кубическое уравнение к стандартному виду (17).

$$\varepsilon_0^3 + a\varepsilon_0^2 + b\varepsilon_0 + c = 0 \quad (17)$$

$$a = \frac{E_2}{E_3}, \quad b = \frac{E_1}{E_3}, \quad c = \frac{-\sigma}{E_3}, \quad E_3 \neq 0. \quad (18)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$

Делаем замену переменной

$$\varepsilon_0 = y - a/3, \quad (19)$$

и приводим (17) к «неполному» виду:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (20)$$

$$p = -\frac{a^2}{3} + b, \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c, \quad Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{3}\right)^2. \quad (21)$$

В зависимости от знака Q и p получим следующие значения корней «неполного» кубического уравнения (20), т.е. если:

– $Q < 0$, то $p < 0$

$$y_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \frac{\alpha}{3}, \quad y_{2,3} = -2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} \pm \frac{2\pi}{3} \right), \quad \cos \alpha = -\frac{q}{2\sqrt{-(p/3)^3}} \quad (22)$$

– $Q \geq 0$, то $p > 0$

$$y_1 = -2\sqrt{\frac{p}{3} \operatorname{ctg}(2a)}, \quad y_{2,3} = \sqrt{\frac{p}{3}} \left(\operatorname{ctg}(2a) \pm i\sqrt{3} \operatorname{cosec}(2a) \right). \quad (23)$$

$$\operatorname{tga} = \sqrt[3]{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \left(|a| \leq \frac{\pi}{4} \right), \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{2}{q} \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3} \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2} \right).$$

– $Q \geq 0$, то $p < 0$

$$y_1 = -2\sqrt{-\frac{p}{3} \operatorname{cosec}(2a)}, \quad y_{2,3} = \sqrt{-\frac{p}{3}} \left(\operatorname{cosec}(2a) \pm i\sqrt{3} \operatorname{ctg}(2a) \right). \quad (24)$$

$$\operatorname{tga} = \sqrt[3]{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \left(|a| \leq \frac{\pi}{4} \right), \quad \sin\beta = \frac{2}{q} \sqrt{\left(-\frac{p}{3}\right)^3} \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2} \right).$$

Во всех случаях берётся действительное значение кубического корня и расчет НДС происходит для каждого узла поперечного сечения в следующей последовательности:

1. Определяем относительное содержание влаги в древесине – принимаем равным относительной влажности воздуха;
2. Обновляем свойства материала относительно данной влажности и температуры;
3. Вычисляем распределение напряжений. Начальное распределение напряжений определяется из технической теории изгиба стержней;
4. Вычисляем приращение деформаций на данном шаге по времени, используя распределение напряжений в начальный момент шага;
5. Определяем приращение напряжений в каждом узле. Возвращаемся к шагу 3 и обновляем значение приращений деформаций. Шаги 3-5 повторяются до тех пор, пока не произойдет сходимости по напряжениям и деформациям;
6. Вычисляем внутренние усилия в поперечных сечениях путем интегрирования по площади функции нормальных напряжений. Сравниваем полученные значения с вычисленными из уравнений равновесия. Если критерий сходимости не выполняется, возвращаемся к пункту 3 и изменяем распределение деформаций.
7. Выводим значения деформаций, напряжений и перемещений для данного момента времени t .
8. Продолжить расчеты для следующего шага по времени и вернуться к пункту 1.

Для расчета различных примеров деревянных стержней нами составлена программа в пакете прикладных программ *Matlab*.

Выводы. Решена задача определения НДС слоисто-неоднородных деревянных стержней в условиях ползучести. При этом учтены такие факторы, как влияние влажности и температуры, разной сопротивляемости древесины растяжению и сжатию. Учтены также механо-сорбционная ползучесть древесины.

ЛИТЕРАТУРА

1 N. Mellela, M. Oualib, M. Dougdaga and B. Mohammedia. Non destructive damage severity estimation in beam using change in extended cross modal strain energy // J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. Vol. 11. No. 1, pp. 57-65, 2021. DOI: 10.22061/JCARME.2020.6854.1881

2 A. Kudaykulov, E. Arinov, N. Ispulov, A. Qadir, and K. Begaliyeva. Numerical Study of a Thermally Stressed State Of a Rod // Advances in Mathematical Physics. Vol 2019. Article ID 8986010, p. 9.

<https://doi.org/10.1155/2019/8986010>

3 S. Akhmetov, A. Kudaykulov, D. Bizhanov Determination of thermally stressed state of rod elements of variable cross section under the impact of a lateral heat flow, heat exchange and surface thermal insulation. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020) // E3S Web Conferences. Vol. 216, 2020.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601073>

4 S. Akhmetov, A. Kudaykulov Methodology of Accounting for the Local Surface Heat Exchanges for Investigation of Non-stationary Thermomechanical Processes in the Structure Elements of the Construction. - International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), ISSN: 2394-3661, 2017, Vol. 4, No. 7, pp. 94-98.

<https://www.ijeas.org/vol/Volume-4-Issue-7>

5 S. Akhmetov, A. Kudaykulov On the Method of Construction of the Dependence of the Heat Extension Coefficient on Temperature in Heat-resistant Alloys. - International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), ISSN: 2395-6992, 2017, Vol. 3, No. 8, pp. 20-29. <http://ijoer.com/issue-august-2017.php>

6 Житушкин В.Г., Рябухин А.К. Расчет элементов деревянных и клее-фанерных конструкций. Краснодар. Изд-во: КубГАУ им. Трубилина. 2019. 134 с. [Zhytushkin V.G. Ryabukhin A.K. Raschet elementov derevyanyh i klee-fanernyh konstrukcyi. Krasnodar. Izd-vo: KubGAU im. Trubilina. 2019. 134 s.]

7 Житушкин В.Г. Расчет прогибов деревянных и клеефанерных элементов покрытий зданий // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXVII междунар. науч.-практ. конф. №5 (21). – Новосибирск: СибАК, 2020. – С.: 44-54. [Zhytushkin V.G. Raschet progibov derevyannyh i klee-fanernyh elementov pokrytyi zdaniy // Voprosy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk v svete sovremennyh issledovaniy: sb. st. po mater. XXVII mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. №5 (21). – Novosybirsk: SibAK, 2020. – S.: 44-54.]

8 Иванов А.М., Алгазинов К.И., Мартинец Д.В. и др. Строительные конструкции с применением пластмасс. Примеры проектирования и расчета. М.: Высшая школа. 1988. 21 с. [Ivanov A.M., Algazinov K.I., Martinec D.V. i dr. Stroyitel'nye konstrukcyi s primeneniem plastmas. Primery proektirovaniya i rascheta. M.: Vysshaya shkola. 1988. 21 s.]

9 Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат. 1995. С.: 98-114. [Raizer V.D. Raschet i normirovanie nadejnosti stroyitel'nyh konstrukcyi. M.: Stoyizdat. 1995. S.: 98-114]

10 Болтаев А.И. Моделирование ползучести слоисто-неоднородных деревянных стержней // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXV-XXVI междунар. науч. - практ. конф. №3-4 (20). – Новосибирск: СибАК, 2020. – С.: 64-74. [Boltaev A.I. modelirovanie polzuchesti sloyisto-neodnorodnyh derevyannyh sterznej // Voprosy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk v svete sovremennyh issledovaniy: sb. st. po mater. XXVII mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. №3-4 (20). – Novosybirsk: SibAK, 2020. – S.: 64-74]

С. М. АХМЕТОВ¹, М. Т. ӨСЕРБАЕВ², Ж. У. ИКЛАСОВА², А. Б. БОЛАТОВА³

- ¹Нұр-Сұлтан қаласындағы Қазақстан филиалы Академик П.
г. Кузнецов атындағы Тұрақты даму мектебі
²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті
³С. Өтебаев атындағы Атырау Мұнай және газ университеті

БІРТЕКТІ ЕМЕС ҚАБАТТЫ ҚҰРЫЛЫМЫ БАР ӨЗЕКТІҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Мақалада біртекті емес қабатты құрылымы бар өзектің кернеулі-деформацияланған күйі (КДК) қарастырылған. Өзекті жүйелерді зерттеудің қазіргі жай-күйін қысқаша шолу және талдау негізінде қабаттардың созылуға және сығылуға әртүрлі қарсыласуының болуын ескере отырып, қабатты-біртекті емес ағаш конструкцияларының КДК зерттеуінің өзектілігі негізделеді. Осы негізде авторлар ылғалдылық пен температура сияқты факторларды, сондай-ақ ағаш қабаттарының созылу мен сығылуға төзімділігінің айырмашылығын ескеретін сырғанау жағдайында қабатты біртекті емес ағаш өзектердің КДК анықтау мәселесін шешеді. Мәселені шешу кезінде ағаштың механикалық сорбциясы да ескеріледі. Өзек қабаттарының көлденең қимасының әр түйіні үшін КДК есептеу реті анықталған.

Түйін сөздер: математикалық модель, кернеулі-деформацияланған күй, біртекті емес қабатты құрылымы бар өзектер, созылу, қысу, сырғанау.

S. M. AKHMETOV¹, M. T. USERBAYEV², ZH. U. IKLASOVA², A. B. BOLATOVA³

- ¹Kazakhstan Branch for the city of Nursultan of the International Scientific School of Sustainable Development named after academician P.G. Kuznetsova
² Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin
³Atyrau University of Oil and Gas named after S. Utebayev

MATHEMATICAL MODEL OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A ROD WITH AN INHOMOGENEOUS LAYERED STRUCTURE

The stress-strain state (SSS) of a rod with an inhomogeneous layered structure is considered. On the basis of a brief review and analysis of the current state of research of rod systems, the relevance of the study of the SSS of layered-heterogeneous wooden structures is substantiated, taking into account the presence of different resistance of layers to tension and compression. On this basis, the authors solve the problem of determining the SSS of layered-heterogeneous wooden rods in creep conditions, where factors such as humidity and temperature, as well as the difference in the resistance of wood layers to stretching and compression are taken into account. When solving the problem, the mechanical-sorption creep of wood is also taken into account.

The sequence of SSS calculation for each node of the cross-section of the rod layers is established.

Keywords: mathematical model, stress-strain state, rods with inhomogeneous layered structure, stretching, compression, creep.

М. ИСКАКОВ, А. Н. ТОМИЛОВ*

Карагандинский технический университет

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ

На основе системного подхода формализованы цели и функциональные задачи анализа установившегося гидравлического режима как апробированной практикой методологии принятия решений в сфере наладки и перспективного развития сложных теплоснабжающих систем мегаполисов. Использование системного подхода к постановке и совершенствованию задач анализа режима позволило разработать и реализовать прикладную информационную систему с эффективной анализирующей методологией для решения профессиональных задач.

Ключевые слова: *теплоснабжающая система, гидравлический режим, системный анализ, задача анализа, формализация, компьютеризация, информационно-графическая система.*

Введение. В проектировании и эксплуатации теплоснабжающих систем мегаполисов (ТСМ) технологи, руководители (ЛПР – лица, принимающие решение) теплоснабжающих систем постоянно и эффективно используют анализирующую методологию для решения профессиональных задач. Тем более, что при моделировании сложных систем в теплоэнергетике задачи разработки допустимых режимов сводятся к многократному решению задач анализа [1,2], то есть анализирующий стиль мышления ЛПР теплоснабжающих систем стал определяющим не только в профессиональной их деятельности, но и при разработке прикладных информационных систем.

Разработка новых задач анализа и совершенствование методов их решения становится ведущей проблемой методологии сложных систем, в том числе и класса сложных теплоснабжающих систем, какими являются ТСМ [3].

Задачи анализа стационарного (установившегося) режима ТСМ также являются главными задачами диспетчерского управления технологическим процессом системы и процессом эксплуатации её технологического оборудования.

Компьютеризация на современном этапе материально и капиталоемких производств, какой является ТСМ, позволяет использовать системный подход при постановке и совершенствовании методов решения задач анализа установившегося режима ТСМ.

Формализация общей задачи анализа стационарных режимов. Использование системного подхода к постановке и совершенствованию задач анализа режима с помощью прикладных информационных систем требует проведения тщательного исследования и классификации системных понятий и определений, необходимых для формирования и решения проблем в этой области.

Приведенные в таблице 1 содержательные определения получены на основе исследования понятий систематологии, практики разработки и реализации режимов теплоснабжающих систем [4,5].

* E-mail корреспондирующего автора: tom44487@mail.ru

Формирование цифровой структуры сложных теплоэнергетических систем и происходящих в ней процессов с помощью математического моделирования, используемого в системном подходе, невозможно без введения структурных понятий, приведенных в таблице 2.

При формировании структуры системы будем производить декомпозицию системы, то есть разделение ее на подсистемы и задание структурных отношений между ними. На множестве выделенных подсистем выделим два следующих подмножества:

- подмножество внешних подсистем, взаимодействующих со средой и с другими подсистемами;
- подмножество внутренних подсистем, взаимодействующих только с другими подсистемами системы.

Таблица 1 – Словарь системных понятий задачи анализа режимов ТСМ

Системное понятие	Содержательное определение системного понятия задачи анализа установившегося режима ТСМ
1	2
Состояние ТСМ	Совокупность значений существенных технологических свойств параметров режима и параметров технологических элементов, отражающих функционирование системы в фиксированный момент времени.
Параметры режима ТСМ	Физические величины, представляющие потоки энергии и вещества в гидравлических трактах технологических элементов и контактирующих с ними элементами окружающей среды.
Параметры технологических элементов ТСМ	Совокупность конструктивно-технологических величин тепломеханического оборудования для подготовки, транспорта и распределения теплоносителя.
Процесс	Переход ТСМ из одного технологического состояния в другое под влиянием возмущающих или управляющих воздействий.
Режим ТСМ	Совокупность состояний и процессов на фиксированном временном интервале функционирования системы.
Установившийся режим ТСМ	Состояние системы, в котором значения существенных технологических свойств остаются постоянными на фиксированном временном промежутке (Примечание 1).
Гидравлический установившийся режим	Состояние ТСМ, при котором в трубопроводных трактах всех технологических элементах устанавливается и остается постоянным на фиксированном временном отрезке изотермический характер течения теплоносителя (течение с постоянной плотностью и вязкостью), определяемый следующими параметрами режима: напорами и производительностью источников тепла и сетевых насосных станций, напорами в узлах тепловой сети и расходами на её участках, располагаемыми напорами и гидравлическими характеристиками потребителей (Примечание 2).
Параметры технологических элементов гидравлического режима	Совокупность геометрических характеристик, номинальных и гидравлических констант насосов, теплообменных аппаратов, дроссельных регулирующих органов, гидравлических трактов участков трубопроводов сети и теплопотребляющих систем.

Окончание таблицы 1

1	2
Параметры технологических элементов теплового режима	Совокупность геометрических характеристик гидравлических трактов, теплофизических параметров теплоносителя, материалов гидравлического тракта и элементов окружающей среды.
Тепловой установившийся режим	Состояние ТСМ, при котором в трубопроводном тракте всех технологических элементов устанавливается и остается постоянным на фиксированном временном отрезке процесс переноса тепла и массы теплоносителя, определяемый следующими параметрами режима: температурными перепадами и теплопроизводительностями источников тепла, температурами в узлах, тепловыми потоками и тепловыми потерями на участках трубопроводов сети, располагаемыми температурными перепадами, тепловыми нагрузками и тепловыми потерями с утечкой в теплопотребляющих систем потребителей (Примечание 3).
Эксплуатационный режим	Состояние ТСМ при температурах окружающей среды окружающей среды и тепловых нагрузок потребителей отличающихся от расчетных.
Расчетный режим	Состояние ТСМ при расчетных значениях окружающей среды и тепловых нагрузок потребителей.
Допустимый режим	Состояние ТСМ, в котором контролируемые параметры режима удовлетворяют технологическим ограничениям.
Аварийный режим	Состояние ТСМ, в котором контролируемые параметры режима не удовлетворяют технологическим ограничениям, уровню и качеству теплоснабжения потребителей в связи с выходом из строя основного технологического оборудования источников тепла, сетевых теплораспределительных подстанций, магистральных или распределительных теплопроводов.

Примечания:

1 Режим отображает технологический процесс функционирования ТСМ и является средством представления его характерных технологических состояний, поэтому разработка и реализация режимов стали постоянным видом профессиональной деятельности технологов при проектировании и эксплуатации сложных теплоснабжающих систем.

2 Гидравлический режим отображает только гидравлическую сторону сложных процессов тепло и массопереноса в технологических элементах и установках ТСМ, поэтому он физически наблюдаем, так как в суточном графике нагрузок системы преобладают неизотермические процессы с небольшим отклонением температур от некоторого базового.

3 Физически наблюдаемый тепловой режим отражает тепловые характеристики процессов тепломассопереноса, что позволяет в процессе анализа акцентировать внимание только на внутренней энергии потоков теплоносителя и разделительных стенках теплообменных аппаратов.

Таблица 2 – Словарь системных технологических категорий структуры ТСМ

Структурное понятие	Содержательное определение системной технологической категории формирования структуры ТСМ
Технологический элемент (ТЭ) ТСМ	Функционально ориентированный объект в технологии производства, транспорта, распределения и использования тепла.
Технологическая подсистема	Совокупность определенным образом соединенных ТЭ, предназначенных для реализации конкретной системной функции в технологии подготовки, транспорта и использования тепла.
Структура ТСМ	Конечное множество возможных отношений между технологическими подсистемами и технологическими элементами внутри подсистем.
Технологическая структура ТСМ	Совокупность отношений «принадлежности» и «следования» между технологическими подсистемами и технологическими элементами внутри подсистем.

Примечания:

1 Типичными представителями ТЭ в ТСМ являются трубы, трубопроводная арматура, насосные агрегаты, теплообменные аппараты, теплоизоляционные конструкции и др.

2 Типичными представителями технологических подсистем (технологических установок) ТСМ являются источники тепла, насосные станции, магистральные и распределительные трубопроводные сети, контрольно-распределительные, групповые, индивидуальные тепловые пункты и др.

Формализованная задача анализа установившегося гидравлического режима. При этом все виды взаимодействия реализуются посредством вещества, энергии, и информации. Технологическая структура ТСМ как системная технологическая категория, во-первых, требует специальных формальных методов для своего описания, хранения и преобразования, во-вторых, она является тем «каркасом», по которому возможно автоматическое формирование математических моделей режимов и автоматическая имитация разнообразных режимных ситуаций системы [6,7].

Именно профессиональная деятельность технологов ТСМ выделила следующие характерные виды установившихся режимов: гидравлический, тепловой, теплогидравлический, зимний, летний, расчетный, аварийный и перспективный. В общих технологических терминах задачу анализа установившегося гидравлического режима сложной ТСМ можно формализовать следующим образом (рисунок 1):

задано:

– полная технологическая структура ТСМ, включая технологические структуры всех основных технологических установок;

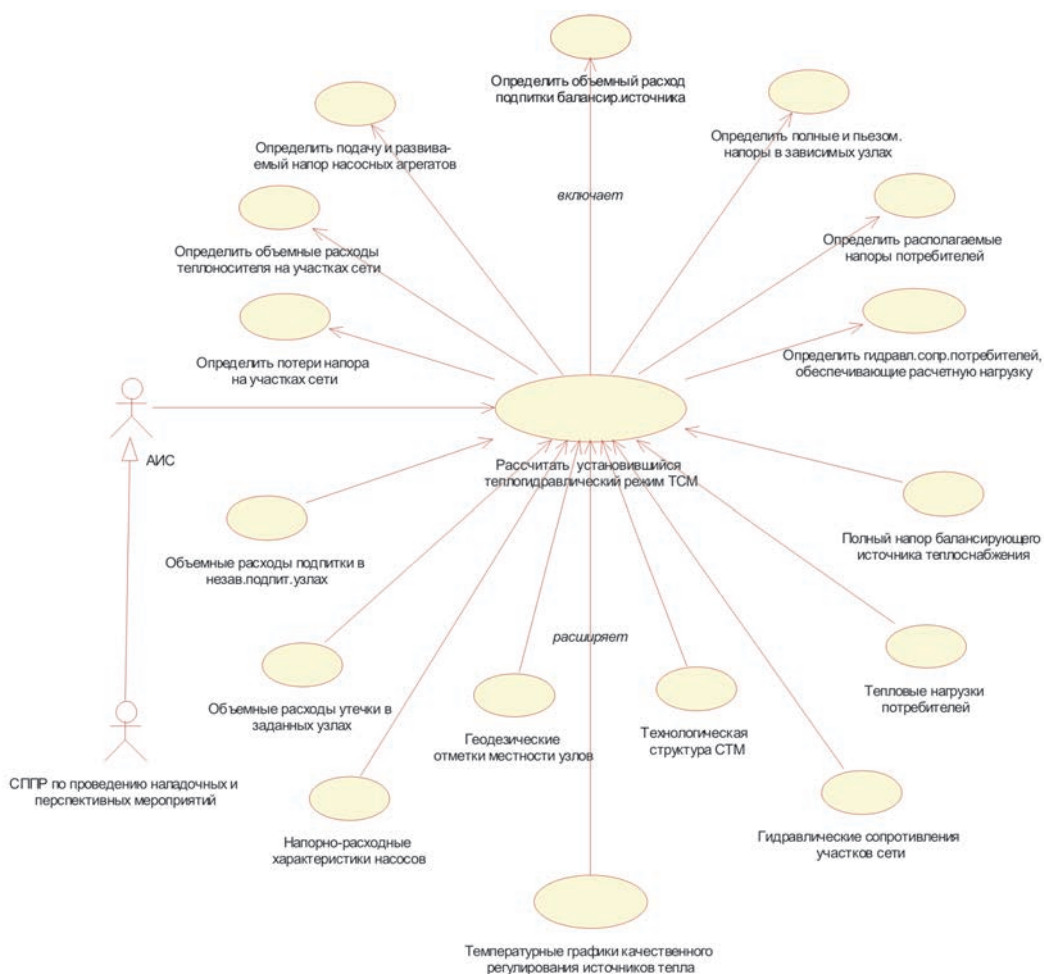


Рисунок 1 – Задачи анализа установившегося гидравлического режима ТСМ

- параметры напорно-расходных характеристик насосов водоподогревательных установок источников теплоснабжения, сетевых подкачивающих насосных станций, смесительных и подкачивающих насосов групповых и индивидуальных тепловых пунктов;
- гидравлические сопротивления всех участков магистральных и распределительных тепловых сетей;
- гидравлические сопротивления потребителей (если расходы через гидравлические тракты потребителей в некоторой аварийной ситуации являются искомыми);
- тепловые нагрузки присоединённых потребителей, приведенные к единицам массового расхода теплоносителя (если рассчитывается эксплуатационный режим при фиксированных нагрузках потребителей);
- объемные расходы утечки в заданных узлах расчетной схемы (при моделировании аварийных ситуаций с разрывами теплопроводов в открытых и закрытых системах);

– объемные расходы подпиток в независимых подпиточных узлах источников теплоснабжения, либо рассредоточенных по сети баков-аккумуляторов (в открытых ТСМ);

– назначен балансирующий источник теплоснабжения (в ТСМ с несколькими источниками тепла, работающими на одну сеть) и задан полный напор в его узле подпитки;

– геодезические отметки местности всех узлов расчетной схемы;

определены температурные графики качественного регулирования всех источников тепла,

требуется определить:

– объемные расходы теплоносителя на всех участках трубопроводной сети и через гидравлические тракты потребителей (если задавались гидравлические сопротивления потребителей в некоторой аварийной ситуации);

– подачу и развиваемый напор насосов во всех насосных станциях;

– объемный расход подпитки в подпиточном узле балансирующего источника теплоснабжения;

– полные и пьезометрические напоры во всех зависимых узлах;

– располагаемые напоры потребителей;

– потери напора на всех участках магистральных и распределительных сетей;

– гидравлические сопротивления потребителей, обеспечивающие их расчетные нагрузки.

Решая общую задачу анализа гидравлического режима для различных технологических структур ТСМ и различных параметров технологических элементов, представляется возможным получать новые знания для ответов на всё многообразие вопросов типа: «Как изменится установившееся состояние ТСМ, если изменить в заданном направлении структуру ТСМ и независимые параметры требуемых технологических элементов?».

Именно конкретные ответы на подобные вопросы и являются тем знанием, которое необходимо ЛППР для подготовки и принятия профессиональных решений при постоянно решаемых функциональных задачах технологами диспетчерских и производственных служб предприятий тепловых сетей.

Формализованный перечень функциональных решений, подготавливаемых ЛППР сферы эксплуатации ТСМ в процессе анализа имитируемых режимных ситуаций приведен на рисунке 2:

– определить параметры дроссельных устройств, обеспечивающих расчетные расходы теплоносителя в трактах теплотребляющих систем потребителей с разнородной тепловой нагрузкой;

– определить требуемое число работающих насосов и схему их включения в заданной насосной станции системы для имитируемой режимной ситуации;

– определить новое место установки подкачивающей насосной станции, а также число, схему включения и характеристики насосных агрегатов для конкретной режимной ситуации;

– определить возможность присоединения новой разнородной тепловой нагрузки заданного уровня для предстоящего сезонного режима и подготовить технические условия на присоединение этой нагрузки;

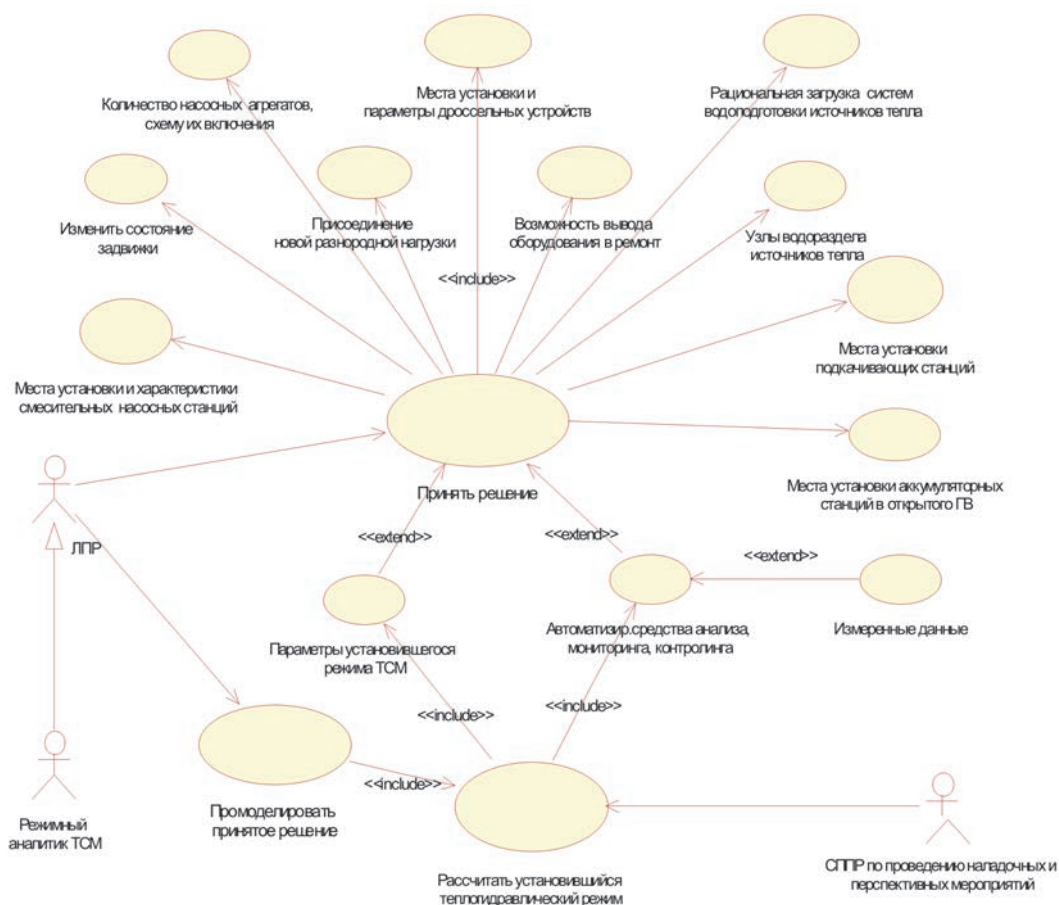


Рисунок 2 – Функциональные решения, подготавливаемые ЛПР служб режимов ТСМ

- определить место установки и параметры аккумуляторных станций горячего водоснабжения в открытых теплоснабжающих системах;
- определить рациональную загрузку систем водоподготовки источников тепла, работающих на одну сеть;
- определить узлы водораздела для источников теплоснабжения, работающих на одну сеть;
- определить место установки и характеристики смесительных насосных станций для реализации нового температурного графика;
- определить параметры ряда аварийных режимов с целью разработки технологии ликвидации аварий и методологии противоаварийных тренировок диспетчерского персонала;
- определить возможность вывода заданного технологического оборудования в ремонт или испытания;
- определить и оперативно собрать с помощью коммутационных задвижек рациональную технологическую структуру ТСМ при выводе заданного стационарного или сетевого технологического оборудования в ремонт.

Заключение. Осуществить полную формализацию общей задачи анализа гидравлического режима ТСМ не представляется возможным, поэтому при разработке информационно-графической системе ТГИД-07 [8] было выделено содержательное ядро, на основе которого было получено адекватное формальное представление общей задачи анализа разработки допустимых режимов ТСМ как апробированной практикой методологии принятия решений в сфере наладки и перспективного развития сложных теплоснабжающих систем мегаполисов.

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке статьи сотрудникам кафедры информационно-вычислительных систем Карагандинского технического университета, ПКФ «Сириус» и основателю данного научного направления – Карасёву Н.И.

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09562666).

ЛИТЕРАТУРА

1 Карасев Н.И., Крицкий А.Б., Томилова Н.И., Цок Г.Н. «Информатизация систем централизованного теплоснабжения в инфраструктуре жизнеобеспечения мегаполисов РК» // Труды международной научной конференции «Состояние, проблемы и задачи информатизации в Казахстане». – Караганда, 2005. – С.207-217. [Karasev N.I., Krickij A.B., Tomilova N.I., Cok G.N. «Informatizaciya sistem centralizovannogo teplosnabzheniya v infrastrukture zhizneobespecheniya megapolisov RK» // Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sostoyanie, problemy i zadachi informatizacii v Kazahstane». – Karaganda, 2005. – S.207-217.]

2 Карасёв Н.И., Фольгарт В.И., Алёхин А.Ф. и др. Пакет прикладных программ для решения задач расчета параметров стационарного гидравлического режима систем централизованного тепло-водоснабжения промышленных центров // Управляющие системы и машины. – 1982, –№1. – С. 113-116. [Karasyov N.I., Fol'gart V.I., Alyohin A.F. i dr. Paket prikladnyh programm dlya resheniya zadach rascheta parametrov stacionarnogo gidravlicheskogo rezhima sistem centralizovannogo teplo-vodosnabzheniya promyshlennyh centrov // Upravlyayushchie sistemy i mashiny. – 1982, –№1. – S. 113-116.]

3 Карасев Н.И., Томилова Н.И., Крицкий А.Б. Направление исследований теплосберегающих систем мегаполисов средствами программно-информационных комплексов. // Труды университета. – Караганда, 2007. – Вып. 2. – С.90-94. [Karasev N.I., Tomilova N.I., Krickij A.B. Napravlenie issledovaniy teplosberegayushchih sistem megapolisov sredstvami programmno-informacionnyh kompleksov. // Trudy universiteta. – Karaganda, 2007. – Vyp. 2. – S.90-94.]

4 Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебн. для вузов. – 6-е изд., перераб. – М.: МЭИ, 1999. – 472 с. [Sokolov E.YA. Teplofikaciya i teplovye seti: uchebn. dlya vuzov. – 6-e izd., pererab. – M.: MEI, 1999. – 472 s.]

5 Яковлев Б.В. Повышение эффективности теплофикации и теплоснабжения. – М.: Новости теплоснабжения, 2008. – 446 с. [Yakovlev B.V. Povyshenie effektivnosti teplofikacii i teplosnabzheniya. – M.: Novosti teplosnabzheniya, 2008. – 446 s.]

6 Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. и др. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей. – М.: Энергия, 1978. – 176 с. [Hasilev V.YA., Merenkov A.P., Kaganovich B.M. i dr. Metody i algoritmy rascheta teplovyh setej. – M.: Energiya, 1978. – 176 s.]

7 Карасев Н.И., Томилова Н.И. Математическая модель узловых напоров для задач поточного распределения в теплоснабжающих системах мегаполисов // Труды университета. – Караганда, 2008. – Вып. 1. – С.75-77. [Karasev N.I., Tomilova N.I. Matematicheskaya model' uzlovyyh

naporov dlya zadach potokoraspredeleniya v teplosnabzhayushchih sistemah megapolisov // Trudy universiteta. – Karaganda, 2008. – Вып. 1. – S.75-77.]

8 N.I. Tomilova, A.A.Kalinin, A.N. Tomilov. Automated Control System for Operational and Perspective Modes of Heat Supplying Systems of Megalopolises // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, May 19-20, 2016.

М. ИСКАКОВ, А. Н. ТОМИЛОВ

Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан

КҮРДЕЛІ ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ СТАЦИОНАРЛЫҚ РЕЖИМДЕРІН ТАЛДАУ МІНДЕТІН РЕСІМДЕУ

Жүйелі тәсіл негізінде қалыптасқан гидравликалық режимді талдаудың мақсаттары мен функционалдық міндеттері мегаполистердің күрделі жылумен жабдықтау жүйелерін реттеу және перспективалық дамыту саласында шешімдер қабылдаудың дәлелденген практикасы ретінде ресімделді. Режимді талдау міндеттерін қоюға және жетілдіруге жүйелі тәсілді қолдану кәсіби мәселелерді шешу үшін тиімді талдау әдіснамасы бар қолданбалы ақпараттық жүйені жасауға және іске асыруға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: жылумен жабдықтау жүйесі, гидравликалық режим, жүйелік талдау, Талдау міндеті, формализация, компьютерлендіру, ақпараттық-графикалық жүйе.

M. ISKAKOV, A. N. TOMILOV

Karaganda Technical University, Kazakhstan

FORMALIZATION OF THE PROBLEM OF ANALYSIS OF STATIONARY MODES OF COMPLEX HEAT SUPPLY SYSTEMS

On the basis of a systematic approach, the goals and functional tasks of the analysis of the steady-state hydraulic regime are formalized, as a proven practice of the methodology of decision-making in the field of commissioning and prospective development of complex heat supply systems of megacities. The use of a systematic approach to setting and improving the tasks of mode analysis allowed us to develop and implement an applied information system with an effective analyzing methodology for solving professional problems.

Keywords: heat supply system, hydraulic mode, system analysis, analysis task, formalization, computerization, information and graphic system.

А. К. ТУЛЕШОВ¹, Г. Я. ПАНОВКО², Б. И. АХМЕТОВА^{1*}

¹Институт механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова,
Алматы, Казахстан

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Москва, Россия
atan_58@mail.ru, balzhanibragimovna@mail.ru, gpanovko@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО РАЗМЕРА НА ВЫСОТУ ШТАМПА КРИВОШИПНОГО ПРЕССА

Расширение технических и технологических возможностей кузнечно-штамповочных машин и оборудования можно проводить за счет внедрения новых конструкций исполнительных механизмов с широкими функциональными возможностями. Эти разработки начинаются с решения задач кинематического синтеза и анализа механизмов.

В данной работе показан сравнительный анализ показателей высоты кривошипного пресса с механизмом преобразования движения Стефенсона II в зависимости от упругой податливости шатунов и деформации поковки. В этой связи в работе исследуются особенности кинематики кривошипного пресса с приводом от двигателя асинхронного типа при учете податливости шатунов и заготовки.

Ключевые слова: кривошипный пресс, кривошипно-шатунный механизм, штамп, деформация, заготовка, фаза.

Введение и постановка задачи. Кривошипный пресс, предназначенный для штамповки разнообразных деталей, содержит кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение привода в поступательное движение ползуна (штампа). В зависимости от назначения, развиваемым усилиям, требований к габаритам, вида штамповки используются различные кинематические схемы механизма преобразования движения, различающиеся числом и конфигурацией своих звеньев [1,2,3].

Одной из важнейших характеристик пресса является жесткость его конструктивных элементов [5,6]. Жесткость пресса существенно влияет на продолжительность нагрузочной и разгрузочной фаз: чем больше жесткость звеньев, тем меньше время контакта штампа с поковкой. Это особенно важно для увеличения стойкости штампов в процессах горячей штамповки [5].

Продолжительность нагрузочной и разгрузочной фаз рабочего хода штампа (так называемый «выстой» штампа) можно увеличить за счет введения в конструкцию пресса дополнительных упругих элементов.

Влияние жесткости штампа можно проиллюстрировать графиками, приведенными на рис. 1, где схематично показана связь между технологической силой F , развиваемой в процессе прессования, и перемещением штампа $y(t)$. На рис. 1 обозначено: $\Delta t = (t_2 - t_1)$ – выстой штампа, t_1 – момент времени начала нагрузочной фазы, t_2 – момент времени окончания разгрузочной фазы, δ – упругая деформация системы пресс-штамп (жесткость пресса), δ_{pl} – пластическая деформация поковки, e – исходный размер заготовки [5].

* E-mail корреспондирующего автора: balzhanibragimovna@mail.ru

Из рассмотрения представленных графиков следует, что чем меньше жесткость прессы, тем меньше упругая деформация δ и, соответственно, больше время контакта штампа с поковкой.

Необходимый выстой штампа можно обеспечить за счет введения в конструкцию прессы специальных упругих элементов, снижающих жесткость системы пресс-штамп.

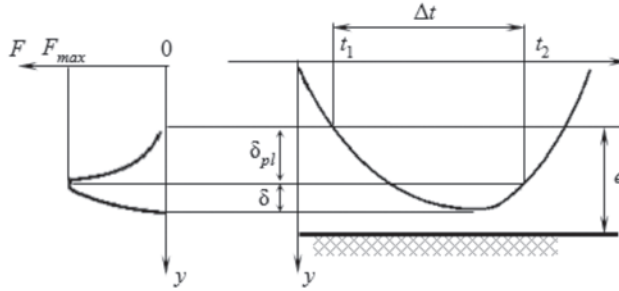


Рисунок 1 – Влияние жесткости прессы на продолжительность нагрузочной и разгрузочной фаз

Одной из перспективных схем, преобразующих вращательное движение привода в поступательное движение ползуна, является шестизвенный механизм Стефенсона II [5].

Преимущество этого механизма заключается в расширении функциональных возможностей за счет двух параллельных шатунов, которые позволяют исключить конструктивный «перекос» ползуна. Кроме того, в конструкцию шатунов механизма Стефенсона относительно просто ввести упругие элементы, что позволяет обеспечить регулируемый выстой штампа [4,5].

Расчетная схема. На рис. 2 представлена кинематическая схема кривошипного прессы с механизмом Стефенсона II. Вертикальная ось перемещения штампа проходит через ось вращения кривошипа.

В расчетной схеме приняты следующие обозначения основных геометрических размеров звеньев механизма: r – длина кривошипа, a и $2b$ – высота и основание жесткого треугольного звена, l – натуральная длина шатунов, образующих параллелограмм размерами $2b \times l$, h – высота штампа, e – высота (условная) заготовки, L – расстоянию от оси вращения приводного двигателя до основания прессы.

Максимальное расстояние от оси вращения кривошипа до положения штампа в нижней мертвой точки

$$S = r + a + l + h = 370 \tag{1}$$

Для описания движения всех элементов механизма используется неподвижная система координат xOy , начало которой связано с центром вращения шатуна (точка O на рис. 2,а), а вертикальная ось Oy направлена вниз по направлению рабочего хода штампа. Угол поворота шатуна φ отсчитывается от положительного направления оси Ox по ходу часовой стрелки. Угол наклона шатуна к основанию треугольника (параллельного оси Ox) – ψ , также отсчитывается по ходу часовой стрелки. Перемеще-

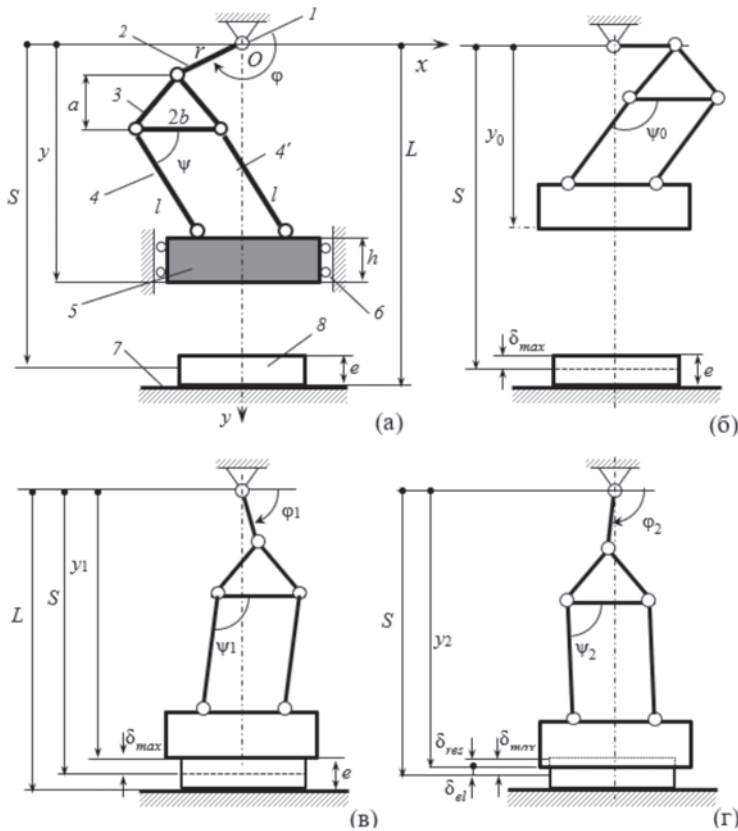


Рисунок 2 – Схема кривошипного пресса с механизмом Стефенсона: а – произвольное положение, б – начальное положение, в – начало нагрузочной фазы, г – конец разгрузочной фазы (штриховой линией показана заготовка до прессования)

ние штампа будем описывать координатой y , отсчитываемой от оси Ox до положения нижней кромки штампа.

Все элементы (звенья) механизма, кроме шатунов и заготовки, будем считать абсолютно жесткими. Таким образом, длина деформируемых шатунов l будет зависеть от действующих сил тяжести штампа mg и технологической силы F , возникающей при прессовании заготовки.

Упруго-диссипативные свойства шатунов в их осевом (продольном) направлении будем описывать линейной моделью Фохта с коэффициентом жесткости c_r и линеаризованным (эквивалентным) коэффициентом внутреннего трения b_r . Деформационные свойства материала заготовки будем описывать моделью идеального упругопластического тела с модулем упругости E и пределом текучести σ_T (рис. 3).

При максимальном перемещении штампа в крайнее нижнее положение, заготовка деформируется на величину $\delta_{max} = S - L + e = 5$. Если $\delta_{max} > \sigma_T e / E$, то при снятии нагрузки в поковке возникнет остаточная упругая деформация $\delta_{el} > \sigma_T e / E = 0,22 = \delta_{max} - \delta_{pl}$, где $\delta_{pl} = 4,78$ – пластическая деформация поковки. В противном случае, когда прессование ограничивается упругой зоной, то $\delta_{pl} = 0$ и остаточная упругая де-

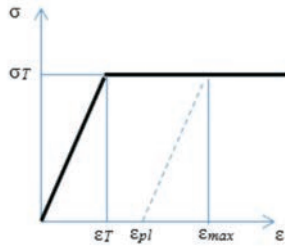


Рисунок 3 – Диаграмма деформирования материала поковки

формация $\delta_{el} = \delta_{max}$. Наличие остаточной деформации при заданных размерах пресса L и S зависит от геометрических параметров заготовки – эффективной площади $A_f = \pi r^2$ и толщины $e = 85\text{мм}$, модуля упругости $E = 115\text{ГПа}$ предела текучести материала заготовки $\sigma_T = 30\text{МПа}$.

В соответствии с принятым законом деформирования материала заготовки, при прессовании в пределах упругой зоны $\delta \leq \sigma_T e/E$ развивается технологическая сила $F = c_f \delta + b_f \dot{\delta}$, где $c_f = F/\delta = \frac{m_1 + m_2 + m_{3,4} + m_5}{\delta} = 1,19$ коэффициент жесткости заготовки, b_f – линеаризованный коэффициент внутреннего трения в материале заготовки.

Кинематический анализ. Движение штампа будем рассматривать (двигателя) от исходного положения механизма при угле поворота шатуна $\varphi = \varphi_0 = 0$ (рис. 2, б). В этом положении нижняя кромка штампа находится на расстоянии y_0 от оси Ox , которое определяется размерами шатуна r , высотой a и основанием b треугольника, натуральной длиной шатунов l , высотой штампа h .

В течение одного оборота шатуна весь процесс можно подразделить на четыре основных этапа: свободный ход, нагрузочная фаза, разгрузочная фаза, обратный ход. Свободный ход заканчивается в момент первоначального контакта штампа с поковкой при угле повороте кривошипа $\varphi = \varphi_1$ (рис. 2, в). Нагрузочная фаза будет происходить при $\varphi_1 \leq \varphi \leq \pi/2$, когда возникает усилие прессования (технологическая сила) F , определяемая в зависимости от деформации поковки. В конце нагрузочной фазы деформация поковки достигает максимального значения $\delta = \delta_{max}$. При угле поворота кривошипа $\pi/2 < \varphi \leq \varphi_2$ происходит разгрузка механизма, где φ_2 – угол поворота кривошипа в конце разгрузочной фазы (рис. 2, г). Процесс завершается в конце обратного хода механизма при угле поворота шатуна $\varphi_2 < \varphi \leq 2\pi$.

Кинематический анализ будем проводить с учетом деформируемости заготовки, но пренебрегая податливостью шатунов, считая их абсолютно жесткими телами. Движение всех звеньев механизма определяется углом поворота кривошипа $\varphi = \omega t$, где ω – угловая скорость вращения приводного двигателя, которую на этапе кинематического анализа будем считать постоянной.

Уравнения связи между углом поворота углом поворота кривошипа φ , углом поворота шатунов ψ и положением штампа y запишем в следующем виде

$$\begin{cases} r \cos \varphi + l \cos \psi = 0, \\ y = r \sin \varphi + l \sin \psi + a + h. \end{cases} \quad (2)$$

Откуда

$$\psi = \arccos\left(-\frac{r}{l} \cos \varphi\right) = \pi - \arccos\left(\frac{r}{l} \cos \varphi\right), \quad (3)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{r^2 + (y - a - h)^2 - l^2}{2r(y - a - h)}. \quad (4)$$

Положение штампа в зависимости от угла поворота кривошипа φ вычисляется из второго уравнения системы (2) при учете (3):

$$y = r \sin \varphi + l \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \cos \varphi\right)^2} + a + h. \quad (5)$$

В исходном положении механизма (рис. 2, б) при $\varphi = 0$ положение шатунов ψ_0 и штампа y_0 определяется следующими формулами

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \arccos(-r/l) = \pi - \arccos(r/l) = 107^\circ, \\ y_0 &= l \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2} + a + h = 194,08 \end{aligned} \quad (6)$$

Важным элементом расчета является определение интервала углов поворота $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, в котором возникает выстой штампа.

На этапе нагрузки при $\varphi_1 < \varphi < \pi/2$ перемещение штампа можно выразить через деформацию поковки:

$$y = L - (e - \delta) = 376 \quad (7)$$

Тогда в начале нагрузочной фазы, при $\delta = 0$, из (4) и (6) следует

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arcsin \frac{r^2 + (L - e - a - h)^2 - l^2}{2r(L - e - a - h)} 67^\circ, \\ \psi_1 &= \arccos\left(-\frac{r}{l} \cos \varphi_1\right) = \pi - \arccos\left(\frac{r}{l} \cos \varphi_1\right) = 96^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

Нагрузочная фаза заканчивается при $\varphi = \pi/2$ и $\psi = \pi/2$, когда штамп оказывается в положении нижней мертвой точки механизма $y_{max} = S = 370$. В этом положении штампа деформация заготовки $\delta = \delta_{max} = S - L + e = 5$ или $\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = 0,22 + 4,78 = \sigma_T e / E + \delta_{pl}$.

Если $\delta_{max} > \varepsilon_T e$, то в конце этапа разгрузки при $\varphi = \varphi_2$ и $\psi = \psi_2$ (см. рис. 2, в), положение штампа определяется координатой

$$y_2 = L - (e - \delta_{pl}) = 369,78, \quad \delta_{pl} = \delta_{max} - \varepsilon_T e. \quad (9)$$

На рис. 4 представлены результаты расчета перемещения штампа y и угловой координаты шатунов ψ в зависимости от угла поворота кривошипа φ . Алгоритм расчета был реализован в программном комплексе Maple при следующих значениях параме-

тров механизма: $L = 450$ мм; $S = 370$ мм; $r = 55$ мм; $a = 80$ мм; $l = 185$ мм; $h = 50$ мм; $e = 85$ мм. Для определенности в расчете были приняты следующие значения параметров условного материала заготовки: $\sigma_T = 30$ МПа, $E = 115$ ГПа координаты шатунов ψ в зависимости от угла поворота кривошипа φ при $e = 85$ мм.

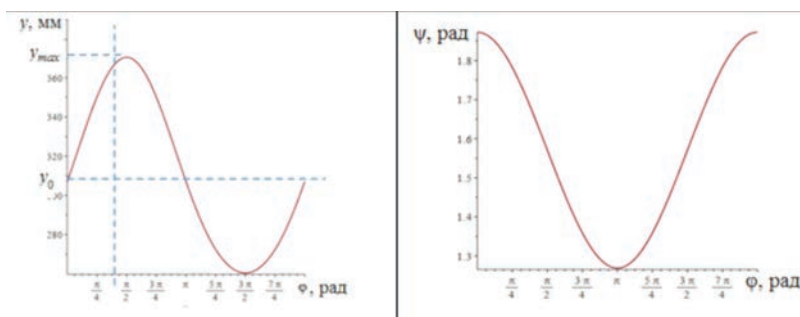


Рисунок 4 – Перемещение штампа $210 \leq y \leq 370$ и изменение угловой

На рис. 5 показано влияние исходного размера поковки $e = [85 \div 100]$ мм на угловую координату φ_1 и φ_2 , характеризующих интервал угла поворота кривошипа, при котором будет происходить выстой штампа.

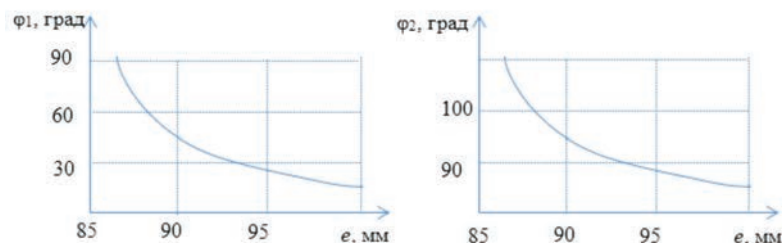


Рисунок 5 – Влияние размера поковки e на угловую координату φ_1 и φ_2

На рис. 6 показано влияние исходного размера поковки на относительный интервал $\varphi_2 - \varphi_1$, характеризующий выстой штампа.

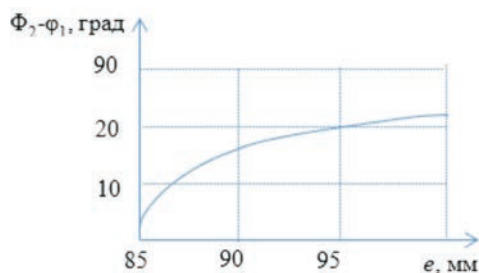


Рисунок 6 – Влияние исходного размера поковки на выстой штампа

Заключение. В работе были исследованы особенности кинематики кривошипного пресса с приводом от двигателя асинхронного типа при учете податливости

шатунов и заготовки. При этом были построены расчетные кинематические схемы кривошипного пресса с механизмом Стефенсона II, проведен кинематический анализ с учётом деформируемости заготовки, а также реализован алгоритм расчета в программном комплексе Maple.

ЛИТЕРАТУРА

1 Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 480 с.[Bocharov YU.A. Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie. - M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2008. – 480 s.]

2 Wen-Hsiang Hsieh, Chia-Heng Tsai. Optimum design of a novel press system with Stephenson-I mechanism//Computers & Mathematics with Applications, Volume 64, Issue 5, September 2012, Pages 897-907

3 Ye-jian Li, Yu Sun, Shuan-hu Wang. Dimensional synthesis for multi-linkage of high-speed mechanical press//11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan

4 Кривошипно-ползунный механизм пресса// Патент РК на изобретение №33874 от 04.09.2019 г., бюл. №36, авторы: Тулешов А.К., Джамалов Н.К., Джомартов А.А., и др.[Krivoshipno-polzunnyj mekhanizm pressa// Patent RK na izobretenie №33874 ot 04.09.2019 g., byul. №36, avtory: Tuleshov A.K., Dzhamalov N.K., Dzhomartov A.A., i dr.]

5 Recep Halicioglu, Lale Canan Dulger, Ali Tolga Bozdana. Structural design and analysis of a servo crank press//Engineering Science and Technology, an International Journal. Volume 19, Issue 4, December 2016, Pages 2060-2072

6 V.V. Telegina, A.M. Kozlova, V.I. Sakalob, Solid Modeling and Dynamic Analysis of Mechanisms of Pressforging Machines// Peer-review under responsibility of the scientific committee of the International Conference on Industrial Engineering . International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017.

7 Тулешов А.К., Дракунов Ю.М. Диалоговая система синтеза кривошипно - ползунного механизма по коэффициенту изменения средней скорости выходного звена. Материалы III международной конференции «Проблемы механики современных машин». Улан - Уде. 2006. - С. 121-127.[Tuleshov A.K., Drakunov YU.M. Dialogovaya sistema sinteza krivoshipno - polzunnogo mekhanizma po koefficientu izmeneniya srednej skorosti vyhodnogo zvena. Materialy III mezhdunarodnoj konferencii «Problemy mekhaniki sovremennyh mashin». Ulan - Ude. 2006. - S. 121-127.]

8 Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин. М.:1967.[Baranov G.G. Kurs teorii mekhanizmov i mashin. M.:1967.]

9 Теория механизмов и машин: учебное пособие/[М.З.Евграфов, Ю.А.Семёнов, А.В.Слоущ]. – М.: Издательский центр «Академия», 2006.- 560 с.[Teoriya mekhanizmov i mashin: uchebnoe posobie/[M.Z.Evgrafov, YU.A.Semyonov, A.V.Slouschh]. – M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2006.- 560 s.]

А. К. ТУЛЕШОВ¹, Г. Я. ПАНОВКО², Б. И. АХМЕТОВА¹

¹Академик *Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан*

²*А. А. Благоднаров атындағы Машинатану институты, Мәскеу, Ресей atan_58@mail.ru, balzhanibragimovna@mail.ru, gpanovko@yandex.ru*

БАСТАПҚЫ ӨЛШЕМНІҢ ИІНДІ ПРЕСС МӨРІНІҢ БИІКТІГІНЕ ӘСЕРІ

Соғу және штамптау машиналары мен жабдықтарының техникалық және технологиялық мүмкіндіктерін кеңейту функционалдығы жетектердің жаңа конструкцияларын енгізу арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл дамулар кинематикалық синтез және механизмдерді талдау мәселелерін шешуден басталады.

Бұл жұмыста байланыстырушы шатундардың серпімді сәйкестігі мен соғудың деформациясына байланысты Стефенсон II қозғалысын түрлендіру механизмімен иінді пресстің төзімділік көрсеткіштерінің салыстырмалы талдауы көрсетілген. Осыған байланысты, мақалада асинхронды қозғалтқышпен қозғалатын қосиінді пресстің кинематикасының ерекшеліктері, байланыстырушы шатундар мен дайындаманың икемділігін ескере отырып зерттелген.

Түйін сөздер: қосиінді пресс, қосиінді механизм, штамп, деформация, дайындама, фаза.

A. K. TULESHOV¹, G. YA. PANOVKO², B. I. AKHMETOV¹

*¹Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician
U.A. Dzholdasbekov, Almaty, Kazakhstan*

*²A. A. Blagonravov Institute of Machine Science, Moscow, Russia
aman_58@mail.ru, balzhanibragimovna@mail.ru, gpanovko@yandex.ru*

THE EFFECT OF THE INITIAL SIZE ON THE HEIGHT OF THE CRANK PRESS DIE

The expansion of the technical and technological capabilities of forging and stamping machines and equipment can be carried out through the introduction of new designs of actuators with wide functionality. These developments require solving the problems of kinematic synthesis and analysis of mechanisms.

In this work a comparative analysis of the endurance indicators of a crank press with the mechanism for transforming the motion of Stephenson II depending on the elastic compliance of the connecting rods and the deformation of the forging was shown. In this regard, the features of the kinematics of a crank press driven by an asynchronous motor taking into account the flexibility of the connecting rods and the workpiece was investigated.

Keywords: Crank press, crank mechanism, die, deformation, billet, phase

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

UDC 004.01

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.133>

B.YE. AMIRGALIYEV*, G. K. YEGEMBERDIYEVA

Astana IT University, Nursultan, Kazakhstan

beibut.amirgaliyev@astanait.edu.kz, gulzhan.yegemberdiyeva@astanait.edu.kz

RESEARCH AND ANALYSIS OF CARSHARING SERVICE

The article is devoted to the research and analysis of the car-sharing service. Great attention is paid to the literature review, and different business models suitable for building a car-sharing service are examined. Based on existing business models for different types of car sharing, the authors have justified and presented a new business model canvas. Another focus of the article is the study of the legal aspects for the establishment of a carsharing service in Kazakhstan, as well as the analysis of potential risks and methods for their management.

Key words: *Carsharing, business model, transport infrastructure, micromobility, sustainability, carsharing literature review*

Introduction. Nowadays, one of the tasks in improving transport infrastructure is to develop a shared consumption economy, including carsharing and micromobility services. Carsharing is considered as a potential lever to reduce car dependency and traffic congestion, improve the ecological environment, develop transport infrastructure and contribute to the promotion of sustainable urban development [1]. For example, a decrease in greenhouse gas emissions, as well as a reduction in vehicle ownership and mileage, are often associated with the development of micromobility services, especially car sharing [2-5]. Articles [6-9] also point out that the use of car sharing supports a shift towards the use of multimodal, environmentally friendly transport modes that complement public and active transport modes (cycling, walking). Following the results of the study [8], a summary report of the social and environmental impacts of car sharing was produced (Table 1).

Table 1 – Report on the social and environmental impact of car sharing

Impact	Europe	North America	Australia
1	2	3	4
Reducing carbon dioxide emissions	from 39 to 54%	from 27% to 56%	–

* E-mail корреспондирующего автора: beibut.amirgaliyev@astanait.edu.kz

1	2	3	4
The number of personal cars that can be replaced by car sharing	from 4 to 10 cars	from 9 to 13 cars	from 7 to 10 cars
The car was sold because of car sharing	15.6% до 34%	25%	21.3%
Cancellation of a car reservation due to car sharing	–	25%	28.1%

Literature review. The research conducted towards car sharing and the number of articles published in the last four years are more than double the number of all previous years combined [10]. Looking at the published articles, they can be conditionally divided into two groups: Articles dealing with the technical aspects and modeling [11, 12], and articles dealing with the business aspects of carsharing [13]. In the article [14], the developed taxonomy was used to review 137 articles in two categories: Journals (94 articles) and Newsletters (43 articles). Most of the articles were from the journal Transportation Research Record and Transportation Research Part A-F. The article [14] describes general tendencies, trends and research perspectives towards car sharing. Specifically, it addresses issues of user behavior and a factor influencing the choice of carsharing over traditional transportation; demand analysis as a description of methods for determining supply and demand; optimization of carsharing services - designing service, infrastructure, and fleet management for optimization; and business models, business development, and the economics of carsharing.

Research methodology. Before direct development of the information system, it is necessary to conduct a review of existing solutions, a literature review, a review of existing business models of various car-sharing services, a study of the legal aspects regulating this activity in Kazakhstan, and a risk analysis using the example of foreign car-sharing services. These sections are the result of the application of various research methods: the method of analysis, the systematic approach, the method of deduction, and classification. In particular, quantitative and numerical methods are used to evaluate the degree of risk to identify the risks associated with the introduction of the service. For example, each risk is described by the following factors: Frequency, cost of risk occurrence, source of risk, scenarios in which the risk occurs. In this aspect, we do not address the solution issues as this is beyond the scope of our article.

The project plans to use a modular approach to the development of an information system, as this approach allows flexibility, consistency between modules, and ease of testing. The developed models, such as the data transfer between the car and the server, the determination of the driver's portrait and driving behavior, and the payment system, will be integrated into the developed system as separate modules (microservices) and tested on a real car.

Carsharing business models. Free-Float-Carsharing model. In this type of carsharing customers can rent a car at a location where a car is available and park it at any location within the service's permitted coverage area. Car rental is done through a mobile application and users gain access to the car through keyless entry (via Bluetooth). The billing system for rented cars works per minute.

One of the disadvantages of this type of car sharing is that the service must have a large enough fleet of vehicles to meet demand. These vehicles must also be equipped with special technical means (GPS, keyless access, GSM communication).

Examples of companies operating under the free-floating business model are Zipcar (USA), Enterprise Carshare (USA), Car2Go (USA), BelkaCar (Russia), Anytime (Russia, also available in Kazakhstan). DosCar (Kazakhstan) is an excellent example of car-sharing operating on this model. The article [15] gives an overview of the business model of the Car2Go service.

Stationary carsharing model. In this type of car sharing, customers rent a car at a fixed location and return to it as well. Cars are charged by the hour, and sometimes there is a flat annual fee. Examples of companies working on the model of stationary car-sharing: Car City Club (Italy) [16], DosCar (Kazakhstan).

Peer-to-peer carsharing model. This type of carsharing requires renting and returning a car at a fixed location. Unlike stationary carsharing in the business model, the peer-to-peer carsharing model allows individuals and legal entities to offer their cars for carsharing. The car is rented for several hours, usually for a day. Turo (USA) [17], GetAround (USA).

While investigating the business models of the different services, we concluded that when developing a car-sharing service, a peer-to-peer car-sharing model is the best option. Taking into account the advantages and disadvantages of the different models described in [18], the advantages of the peer-to-peer model include the relatively low cost of 'entry', the provision of different options for cars, and the fact that there is no need to maintain staff or premises for the maintenance and parking of cars. A new business model was developed based on the Turo business model (Table 2).

Table 2 – Canvas of the business model of our service. Version 1

Key partners	Key activities	Key values	Relationship with customers	Customer segments
Car owners Payment systems Insurance companies Akimat of Nur-Sultan Astana Innovations	Platform development IT system support Users support Marketing and promotion Attracting car owners and users Legal Aspects	Customers have a safe and secure way to travel Possibility of additional income for car owners when the car is idle	Peer-to-peer car sharing marketplace Checking car owners and users using Know your customer (KYC) system -> security, reduce fraud The car owner selects the available car time in the calendar The user chooses the free time of the car, makes reservations and makes payments	Car owners Travelers Corporate clients

	Key Resources IT system Qualified team Akimat support		Channels Mobile application iOS, Android Direct channels through car rental companies	
Cost structure Car damage coverage by insurance, Salary of workers IT infrastructure support, Product development Marketing, Users support, Security Service			Sources of income Car owners can set their own price Service charge 20%	

Regulatory Authorization. After deciding on a business model, it is necessary to study the existing legal framework in the city where the car-sharing service will be used, especially the rules for parking on public roads, car rental rules, and insurance. In most countries, parking is controlled and managed by local municipal authorities [19]. Fluctuo has developed a report, the European Shared Mobility Index, which paints a quarterly picture of the shared mobility market in 16 European cities, selected to highlight diversity in terms of size, geography, and market characteristics [20].

The main set of rules regulating the legal framework and general conditions for the functioning of road transport and ensuring its safety in the Republic of Kazakhstan is the Law on Road Transport (Law of the Republic of Kazakhstan of April 17, 2014, No. 194-V ZRK). The law contains 14 chapters, one of which is directly related to car-sharing: Rights and Obligations of Road Users (Chapter 8), Admission to Participate in Road Traffic (Chapter 10), Admission of Persons to Drive Vehicles (Chapter 11), Mandatory Roadworthiness Testing (Chapter 13), Management of Activities to Ensure Road Safety and Eliminate the Consequences of Road Accidents (Chapter 5). Thus, Chapter 5 contains Article 30 on sustainable transport. According to this article, sustainable transport means vehicles (cars, bicycles, ecological vehicles) that reduce the negative impact of road transport on the environment.

Risk management. A variety of risks can arise when implementing a peer-to-peer car-sharing system. Common causes are shown in the table below. It shows the risks, the frequency of the risks, the cost of the risks, the source of the risks, the scenarios that usually lead to the risks, and the corresponding solutions.

Table 3 – Description and cost of widely faced risks

Risks	Risks probability	Risks effect	Source of risk	Scenario	Risk Management
1	2	3	4	5	6
Car theft	Low	Extremely high	Customer	The person took the stolen ID and driving license and used them as KYC. Once a person has penetrated the system, he can easily dis	Selfie compliance with KYC. Before using the vehicle, the person must take a selfie and that selfie must match the KYC images. However, if

1	2	3	4	5	6
				connect use it for other purposes (selling it in parts, etc.).	the person has a selfie photo, we need to add an aliveness detection feature that determines whether the person is a living person or not (by pretending to perform certain actions and tracking whether the person performs those actions)
Theft of car auto parts	High	Average	Customer	The person took the stolen ID and driving license and used them as KYC. Once a person has entered the system, he can easily steal parts, as well as through ID and the driver's license after using the car.	1) Frequent vehicle inspection (before and after posting). 2) Add ML a solution that can prevent such use cases in advance. 3) Selfie matching with KYC. 4) Determination of liveness for KYC.
Replacement of car auto parts	Average	Low	Customer	The person took the stolen ID and driving license and used them as KYC. Once a person gets into the system, he can easily replace the parts, as well as through ID and the driver's license after using the car.	1) Frequent vehicle inspection (before and after posting). 2) Add ML a solution that can prevent such use cases in advance. 3) Selfie matching with KYC. 4) Determination of liveness for KYC.
Vandalism	Average	Low	Customer	The person took the stolen ID and driving license and used them as KYC. Once a person has entered the system, he can easily vandalize with ID and a driving license after using the vehicle.	1) Take a photo of the vehicle before and after posting (from 8 sides). 2) Frequent vehicle inspection (before and after the booking). 3) Add an ML solution that can prevent such use cases in advance 4) Selfie matching with KYC 5) Determination of liveness for KYC.
Car accident	Average	High	Customer	Any road user can have an accident while driving a car.	1) Take a photo of the vehicle before and after booking (from 8 sides). 2) Frequent vehicle inspection (before and after the booking). 3) Add a machine learning solution that can prevent such use cases in advance (understanding driver behavior and

1	2	3	4	5	6
					informing bad driver behavior in advance). 4) Use of insurance
Fraud (use of someone else's cards, documents)	Average	Average	Customer	A person may be successfully registered but use stolen cards (e.g. from the black market) and drive vehicles with them. This will lead to a bad reputation for the company.	1) Add a function that determines if a payment method is used for other customers. 2) Check if the customer has a large number of payment methods that might raise suspicion. 3) Add a machine learning model that notifies you in advance if a subscriber's behavior is suspicious.
Transfer of vehicle control to unauthorized persons	High	Low	Unregistered customer	The person can be successfully registered, but other people (relatives and friends) can use this vehicle in the name of the registered person. This situation can lead to various scenarios such as accidents, improper driving, etc.	Selfie matching, when the customer needs to take a selfie and this selfie needs to be matched with the KYC images. If the faces belong to the same person, allow him/her to drive, otherwise block the member.
Aggressive driving	Extremely high	High	Customer	A person may be successfully registered, but he may damage the car by bad driving. This leads to various types of damage to vehicles.	Using a machine learning model that can inform participants about bad behavior. The functions can be done by GPS, gyroscope, etc.
Violation of traffic rules	Extremely high	Average	Customer	A person may successfully register but commit an offense while driving or parking the vehicle. This will result in additional fines for cars and some types of accidents.	Check before and after booking to see if the vehicle is breaking any rules (third parties may be involved). If this is the case, please inform the buyer.
Vandalism from 3 persons	Average	Average	Strangers	While the car is parked in the lot, third parties can damage the car and commit various types of vandalism with it.	Add only those cars that have a DVR. If third parties commit vandalism, we can fix it with the help of video recorders and solve the problem.
Driving while drunk or under the influence of drugs	Average	High	Customer	A person may be successfully connected to the system, but while driving, the driver may be intoxicated or using drugs. This leads to a variety of random events.	Use the expanded definition of survivability before driving. People who are intoxicated and under the influence of drugs cannot easily perform the actions required by the

1	2	3	4	5	6
					system. Consequently, intoxicated clients (including drug users) cannot drive.
Improper behavior on the part of the owner	Average	Low	Car owner	While adding the vehicle to the system, the vehicle documents may not be correct, the photos of the vehicle may not match the real vehicle or the vehicle may be stolen, etc. This leads to customer dissatisfaction and poor results of the company.	While adding the host, it is necessary to check and confirm whether the host is verified or not. Required also add a "Verified" tag next to the hosts if there is no suspicious behavior/documents.
Fake hosts	Low	Low	Car owner	While the vehicle is added to the system, a situation may arise where there is actually no vehicle. This leads to customer dissatisfaction and a bad reputation for the company.	While the host is being added, we need to double-check and confirm whether the host has been verified or not (if the machine actually exists). We can also add a "Verified" tag next to the hosts if there are no suspicious behaviors/documents.

Conclusion. Car sharing as a form of the sharing economy is becoming increasingly popular and is one of the most important links in the transport infrastructure of smart cities. The development offers great opportunities for car manufacturers, suppliers, and other players in the field of mobility. As practice shows, the use of car-sharing not only reduces the "ecological footprint" (damage caused by activities) but also contributes to the development of other modes of transport - public transport, bicycles, scooters.

The article examined the business models of the different types of car sharing and also provides links to the business models of the most popular services. For example, part of the operating costs of the car-sharing service Car City Club (Italy) [16] is subsidized by the Italian Ministry of Environment, which in turn shows the need for active involvement of the state and local authorities in supporting such initiatives. From the legislative side, the activities of sharing services require the development of new laws, and those that open opportunities for such services are regulated.

In the future, it is necessary to conduct interviews with potential customers, conduct a survey to validate hypotheses. As a result of the analysis, a technical specification and a minimum viable product will be created, which will implement the main functions of the product.

Acknowledgment. This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR10965311). Affiliation: Astana IT University, 010000, 55/11 Mangilik Yel Ave., Nur-Sultan, Kazakhstan

REFERENCES

- 1 Ciari, F. (2012). Sharing as a key to rethink urban mobility: Investigating and modeling innovative transport systems. PhD thesis, ETH
- 2 Martin, E., Shaheen, S. A., & Lidicker, J. (2010). Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings: Results from North American Shared-Use Vehicle Survey. *Transportation Research Record*, 2143(1), 150–158.
- 3 Susan A. Shaheen, Andrew Schwartz Kamill Wipyewski. (2004). Policy Considerations for Carsharing and Station Cars: Monitoring Growth, Trends, and Overall Impacts // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 1887(1):128-136.
- 4 Shaheen, S. and Cohen, A. (2013). Carsharing and Personal Vehicle Services: Worldwide Market Developments and Emerging Trends. *International Journal of Sustainable Transportation*. Vol. 7(1), p.5-34. DOI: 10.1080/15568318.2012.660103.
- 5 Barbora Bondorov⁶ & Greg Archer. (2017). Does sharing cars really reduce car use? *Transport & Environment*.
- 6 Susan A. Shaheen & Adam P. Cohen (2013). Carsharing and Personal Vehicle Services: Worldwide Market Developments and Emerging Trends, *International Journal of Sustainable Transportation*, 7:1, 5-34
- 7 The official website of the WHO in Russian. (2014). <https://www.who.int/ru/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>
- 8 Navidi, A., & Khatami, F. A. S. (2017). Energy management and planning in smart cities. *CIREP-Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 2723-2725.
- 9 Lom, M., & Pribyl, O. (2021). Smart city model based on systems theory. *International Journal of Information Management*, 56, 102092.
- 10 Brenda Nansubuga, Christian Kowalkowski. (2021). Carsharing: a systematic literature review and research agenda // *Journal of Service Management Issue(s)* available: 69 – From Volume: 20 Issue: 1, to Volume: 32 Issue: 6
- 11 Jorge, D. and Correia, G. (2013). Carsharing systems demand estimation and defined operations: a literature review. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 13(3):201–220
- 12 Laporte, G., Meunier, F., and Wolfler Calvo, R. (2015). Shared mobility systems. *4OR*, 13:341–360
- 13 Shaheen, S. A. and Cohen, A. P. (2013). Carsharing and personal vehicle services: worldwide market developments and emerging trends. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7:5–34.
- 14 Francesco Ferrero, Guido Perboli, Mariangela Rosano, Andrea Vesco. (2018). Car-sharing services: An annotated review // *Sustainable Cities and Society*, Volume 37, Pages 501-518
- 15 Guido Perbolid, a, Francesco Ferreroc, Stefano Mussod, Andrea Vesco. (2017). Business models and tariff simulation in car-sharing services // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.
- 16 Francesco Ferrerod , Guido Perbolic,b, Stefano Mussoc // Andrea Vescoa. (2015). Business models and tariff simulation in car-sharing services // *Car-Sharing Services - Part B Business and Service Models*.
- 17 Remane, Gerrit & Nickerson, Robert & Hanelt, Andrř & Tesch, Jan & Kolbe, Lutz. (2016). *A Taxonomy of Carsharing Business Models*.
- 18 The Current State of Carsharing: An Industry Overview: <https://invers.com/en/blog/the-current-state-of-carsharing-an-industry-overview>
- 19 The official website fleeturope: Germany enacts car-sharing law. (2021). <https://www.fleeturope.com/en/news/germany-enacts-car-sharing-law>,

The official website cityofvancouver: Residential parking permits. (2021). <https://vancouver.ca/streets-transportation/residential-parking-permits.aspx>

20 Flucto: European Shared Mobility Index. (2021). <https://www.am-today.com/sites/default/files/articles/59270/european-shared-mobility-index-1-2021-04-ok.pdf>

Б. Е. АМИРГАЛИЕВ, Г. Қ. ЕГЕМБЕРДИЕВА

Astana IT University, Нұр-Сұлтан қаласы

АВТОКӨЛІКТІ БӨЛІСУ ҚЫЗМЕТІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

Мақала автокөлікті бөлісу қызметін зерттеу мен талдауға арналған. Мақалада әдебиеттерді шолуға көп көңіл бөлінеді, сондай-ақ көлікті бөлісу қызметін құруға қолданылатын әртүрлі бизнес үлгілері зерттеледі. Автокөлікті бөлісу түрлері бойынша қолданыстағы бизнес-модельдер негізінде авторлар жаңа бизнес-модель канвасын әзірледі. Сондай-ақ, мақалада Қазақстанда сервисті енгізудің құқықтық аспектілерін зерделеуге маңызды көңіл бөлінген, сонымен қатар ықтимал тәуекелдер мен оларды басқару әдістері талданған.

***Түйін сөздер:** автокөлікті бөлісу, бизнес-модель, көлік инфрақұрылымы, микромобильділік, тұрақтылық, автокөлікті бөлісу туралы әдебиеттерге шолу.*

Б. Е. АМИРГАЛИЕВ, Г. Қ. ЕГЕМБЕРДИЕВА

Astana IT University, г. Нур-Султан

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ СЕРВИСА КАРШЕРИНГА

Статья посвящена исследованию и анализу сервиса каршеринга. Значительное внимание в статье уделяется литературному обзору, а также исследуются различные бизнес-модели, применимые для построения сервиса каршеринга. На основе существующих бизнес-моделей по типам каршеринга авторы обосновали и представили новый канвас бизнес-модели. Также немаловажное внимание в статье уделено изучению правовых аспектов для развертывания сервиса в Казахстане, а также проанализированы потенциальные риски и методы управления ими.

***Ключевые слова:** каршеринг, бизнес-модель, транспортная инфраструктура, микромобильность, устойчивость, обзор литературы по каршерингу.*

ZH. A. BURIBAYEV², ZH. AMIRGALIYEVA¹, S. K. JOLDASBAYEV^{1,2*},
M. S. ZHASSUZAK^{1,2}, A. S. TUREGALI², D. D. DAULETIYA²

¹*Institute of information and computational technologies,*
²*Al-Farabi Kazakh National University,*
Almaty, Kazakhstan

TOMATO MATURITY RECOGNITION USING YOLOv5 MACHINE LEARNING

The implementation of robotic systems and digitalization in agriculture are important tasks today. In this paper, the possibility of using pattern recognition and machine learning methods as a computer model of an agricultural robot for harvesting is considered. The grading of tomato fruits can be classified based on their ripeness according to their life cycles, which can be identified by their color: green in the growing stage, yellow in the pre-ripening stage, and red when ripe. Conventional skill-based methods cannot meet the exact selection criteria for modern production management in the agricultural sector as they are time-consuming and of low accuracy. Automatic feature extraction behavior using machine learning is most effective in image classification and recognition tasks. Thus, the article presents the results of a study on the recognition of ripe tomato fruits by a robotic system, carried out within the framework of the grant project of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan AP08857573 and implemented classical algorithms based on the HSV color model and color segmentation using the k-means algorithm as comparative algorithms and based on machine learning, a universal intelligent tomato classification system is proposed for practical use using Yolo 5.

This study aims to provide an inexpensive solution with the best performance and accuracy for assessing tomato ripeness. The results are collected in terms of accuracy, loss curves and confusion matrix. The results showed that the proposed model outperforms other machine learning (ML) methods used by researchers for tomato classification problems, providing 99% accuracy.

Keywords: *machine learning, tomato recognition, robotic systems, agricultural robot, HSV segmentation, YOLO.*

Introduction. Over the past decade, machine learning (ML) has become widely known for the implementation of a wide variety of applied problems. One of the topical directions today is the introduction of intelligent machines in the agro-industrial sector: care and collection of culture. In this work, we use ML to recognize ripe tomato fruits by comparing classical recognition algorithms and ML.

The development of robotic solutions for agriculture requires advanced sensing capabilities that can reliably operate at any stage of the harvest. For example, to automate the process of harvesting tomatoes in greenhouses, the visual perception system must detect a tomato at any stage of its life cycle (from a flower to a ripe tomato). Modern tomato visual detection equipment is mainly focused on ripe tomatoes that have a distinctive color from the background. This document supplements the annotated green and reddish tomato visual dataset. Such a dataset is rare and not available for research purposes. This will enable the further development of advanced artificial intelligence to visually locate tomatoes in situ and in real time needed to develop cleaning robots. With this dataset in

* E-mail корреспондирующего автора: zholdas_87@mail.ru, serykjoldasbaev@mail.ru

mind, five deep learning models were selected, trained and tested to detect green and reddish tomatoes grown in greenhouses. Taking into account the technical characteristics of our robotic platform, the work of experienced specialists was considered, which are briefly described below.

Literature Review. In the course of the study, the work of foreign scientists in this area was considered as [1], a segmentation algorithm was developed to control the robot arm for picking ripe tomatoes and the recognition algorithm adapts to the lighting conditions of the greenhouse, where 110 color images of tomatoes were used in greenhouse lighting, the algorithm works in two steps: (1) by removing the background in RGB color space, followed by extraction of a ripe tomato using a combination of RGB, HSI and YIQ spaces; and (2) localization of a ripe tomato using morphological features of the image.

One of the vulnerabilities on the way to reliable product recognition in agriculture is to reduce the impact of the main obstacles: lighting and overlap. In order to recognize a tomato in the crown of a plant using an inexpensive camera, a robust tomato recognition algorithm based on several characteristic images and image fusion was studied in [2]. Two new characteristic images, an a^* -component image and an I -component image, were extracted from the $L^*a^*b^*$ color space and the luminance, in-phase, quadrature (YIQ) color space. Also in the work, a wavelet transform was adopted to merge two characteristic images at the pixel level, which combined information about the features of the two original images. To separate the target tomato from the background, an adaptive thresholding algorithm was used to obtain the optimal thresholding. The final segmentation result was processed with a morphology operation to reduce a small amount of noise. This indicates that we could use the proposed method for robotic harvesting of tomatoes in an uncontrolled environment. Studies conducted in [3], where data from 600 tomatoes at six stages of maturity were taken and used for the test, absorption and reduced scatter coefficients for tomato fruits were extracted using spatially resolved spectroscopy, partial least squares discriminant analysis (PLSDA) models were built to assess the maturity of tomatoes. The authors have shown that optical absorption and scattering spectra can effectively classify the ripeness stages of tomatoes and have provided new means of non-destructive detection in agricultural products. In [4], the same authors propose a different approach, where partial least squares discriminant analysis PLSDA and support vector machine discriminant analysis SVMDA. Also, in [5], a study of measuring the optical properties of tomato fruit in the wavelength range using the method of spatially resolved diffuse reflection to estimate density, soluble solids content (SSC) and pH. In reviewing this study, we learned that the SRS method, along with the absorption and scattering coefficients, has the potential for non-destructive measurement of quality characteristics, especially the hardness of tomato fruit, which we could then use for the picker arm.

In [6] discusses the detection of ripe and inverted tomato fruits using computer vision and image processing techniques using Raspberry Pi and Pi Camera, Raspbian software using python3. Ripeness is determined using OpenCV and HSV. Researchers are going to connect this equipment to Turtlebot, to a robot that will move around the field to find ripe plants. Since the development ideas are similar for us, the results of this study on the implementation of the development in a mobile robot are important for us.

In [7], the proposed system performs the classification of tomatoes in three stages. Due to the complexity of solving a nonlinear problem, the proposed system is implemented as a cascade of two machine support vector classifiers. The performance of this system is assessed using metrics for accuracy, specificity, sensitivity, and accuracy. Experimental results and comparative analysis of similar methods testify to the effectiveness of the proposed system in comparison with existing systems for sorting and identifying tomatoes. The results obtained at each of the three stages of classification, i.e. tomato/non-tomato, good/defective and the type of defect in the event of a defect, are transmitted to the microcontroller to turn on the corresponding motor, so that the given fruit can be classified and harvested in the corresponding basket.

The work [8] researchers proposed a classification system using a pair of binary SVM classifiers to sort tomato ripeness and defects. The first SVM classifier is unique regardless of the ripeness level for the separation of tomato species. The ripeness level of tomatoes is determined based on the average green component. Thereafter, defective and healthy tomatoes are distinguished using a superpixel segmentation operation. A second SVM classifier is then used to detect black spot defects and ulcers separately in ripe and immature fruits. Although the same feature vectors are used to detect defects regardless of ripeness, the reference image used to create feature afterimages is different for ripe and unripe tomatoes.

Researchers in [9] proposed a fuzzy Mask R-CNN model to automatically determine the ripeness levels of cherry tomatoes. For automatic image annotation, a fuzzy K-means model was used to store the spatial information of various elements of the foreground and background of the image. The Hough transform method was applied to determine the position of the geometric edges of the tomatoes. Each data point in image space has been annotated into a JavaScript object notation file. The annotated images were trained with Mask R-CNN to accurately identify each tomato. To prevent tomato shedding before harvest, the hue-saturation-value color model and fuzzy inference rules were used to predict tomato ripeness. The trigonometric function with Euclidean distance was calculated from the beginning of the calyx and stem to the bottom of the tomato to get the position of the stem head and cut the fruit in time.

In [10], a machine vision system for an apple picking robot was developed based on the YOLOv3 and YOLOv5 algorithms with special pre and post processing. We took this publication as a basis for the development and tested these solutions on tomatoes only using YOLOv5.

In work [11] proposes a method for determining the ripeness of tomatoes by using several streams of a convolutional neural network (ConvNet) and their methodology of stochastic combination of solutions (SDF). The authors named the general pipeline SDF-ConvNets, which can correctly determine the ripeness of tomatoes by performing the sequential steps: (1) determining the initial ripeness of tomatoes for multi-view images based on a deep learning model, and (2) stochastically combining these initial results to obtain the final classification result. No follow-up study was undertaken in this paper to develop an integrated system that can determine the appropriate harvest time and monitor the growing state of the crop by recognizing and assessing the ripening stage in real time by observing the tomatoes before harvest.

Experimental

Segmentation of tomato according to the HSV model. Two main filters were used to segment the tomato - the first filter determines the shape of the object and the second filter to determine the color. In this study, we selected the HSV color model for the color segmentation of tomatoes (Figure 1).

A comparative analysis is performed using a color model (HSV), which changes the hue, saturation and intensity of the pixel of the image in question. After determining the dominant property based on these three parameters to segment the extracted image. This color space model is very close to human perception when compared to other models such as RGB or CMYK. The analysis shows that with the help of this segmentation it is possible to obtain a more accurate identification of objects in comparison with other algorithms. The HSV model can be visualized as a cylinder, where the intensity will be located on the central vertical axis, and the values of the shadow parameters will be determined by the tilt angle in the range of 0-360°. For red, green and blue, the values correspond to 0, 120°, 240°, and the saturation parameter is responsible for determining the depth or purity of a color, which is measured as the radial distance with a value from center to center. outer surface, calculated from 0 to 1. If written as a percentage, 0 will be black and 100% will be white. By decreasing the saturation, each color could be converted to a shade of gray. For low saturation values, the color may correspond to gray.

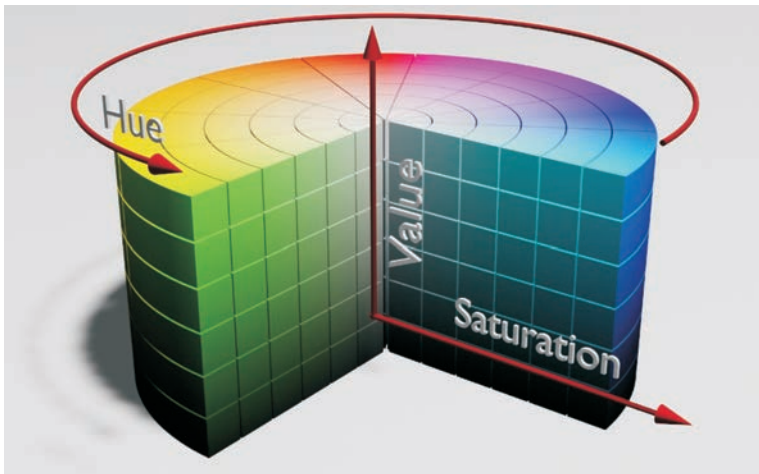


Figure 1 – HSV color model for color segmentation of tomatoes.

The advantages of the HSV model over RGB are in Figure 2 that the hue of a color (hue) is specified by only one coordinate - hue, which makes it easier to filter out only the necessary colors from the picture. In addition, using the saturation and value coordinates, you can minimize or completely eliminate the effect of low light, darkening or shadows in the working area of the camera. This significantly increases the efficiency of determining the ripeness of a tomato by its color.



Figure 2 – Image conversions from BGR to HSV color space

Then we need to define the lower and upper range of values for a particular color, which in turn consists of three values (hue, saturation, intensity). After that we create a mask for the image by setting the threshold and adding the required range to the value.

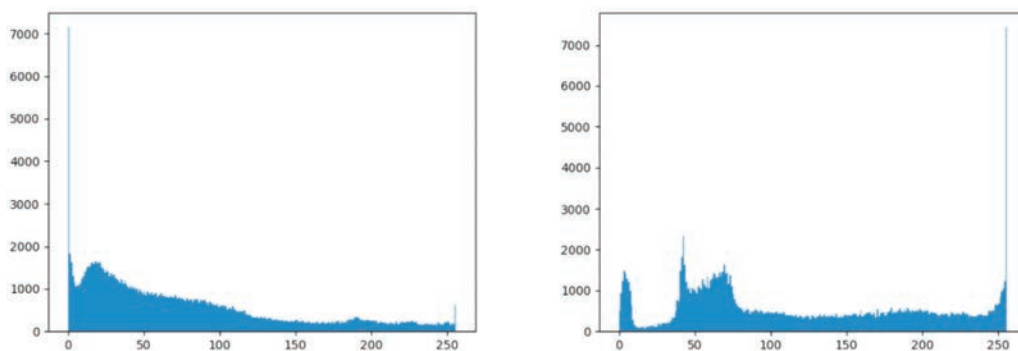


Figure 3 – Histogram of an image in RGB and HSV format

In Figure 3, you can clearly see the difference in the intensity distribution. In the histogram, the pixel values are on the abscissa, and the ordinate corresponds to the number of pixels. We can see that in the first picture there were quite a lot of intensity values in the area of pixels from 0 to 100, and after converting the intensity values from 0 to 50, very little. The maximum value can be seen in section 50. Also, if in the first image the value from 50 has decreased, then in the second, starting from 100 to 250, it leads the same way.

Next, you will need to make morphological transformations using the OpenCV library. We need this operation to remove white noise, separate and establish the boundary of two related objects. Morphological operations are performed on binary images. To do this, we need to give our original image and a threefold image at the input, which is called a structural element. A structural element or core does the operation we need.

There are several morphological operators, and in order to choose the most suitable one it is necessary to consider all of them.

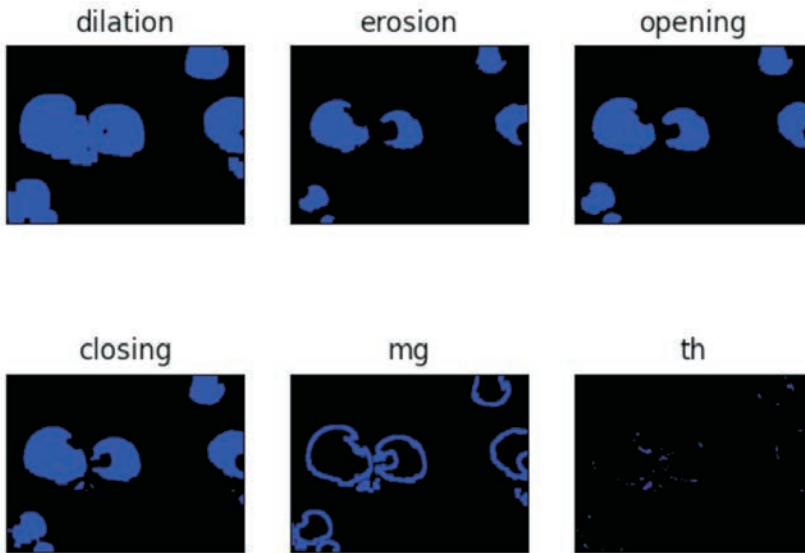


Figure 4 – Morphological transformation of the original image

The first image is the result of the Dilation operation, which enlarges the white area in the original image. Also, this operation increases the size of the foreground object. It is also useful for connecting separated parts of an object. In our case, we see that indeed the size of the foreground objects has increased significantly. However, this is unnecessary for us, since our main task is to divide the boundaries of objects in such a way as to segment them separately. The second image is Erosion. This operation blurs the boundaries of the foreground object, which is the exact opposite of the first. The main advantage of which is the separation of the two areas, which is what we need. However, it is hard not to notice that this operation, although it separates two objects, it also reduces their size. This is not what we want at all. The third image is Opening, the principle of which is the same as for erosion, but after that it increases the white area in the image in question. A feature of this operation is the removal of noise. The fourth is Closing, which is the reverse of closing. The main advantage is the removal of small holes inside foreground objects and unnecessary pixels. Fifth Image The Morphological Gradient is the result of the difference between Dilation and Erosion. In the original image, you can see that only the border of our object has been received. The last Top-hat image is the result of the work between the original image and the Closing operation. In the figure, we see that this operation does not quite give a good result.

Having received all the results, it was decided to choose the Closing operation for our segmentation. After we can segment objects by color, a function was written for each color we needed (red and green). After segmentation, we can define their outline and use the boundingRect function to constrain them to a rectangle.

It is clear that it is impossible to simultaneously determine two colors on the input image, since during the detection of one color everything else becomes a black background and goes to the background.

Therefore, to solve this problem, two images were created, one which consists entirely of black pixels Fig5a, and the other is a copy of the input and both of them are identical in size with the input Fig5b. We don't need the first image, but it doesn't hurt for comparison and visualization. After that, while detecting each color, we write down the coordinates of the bounding rectangle and also draw them on the two images we just created (Figure 5).

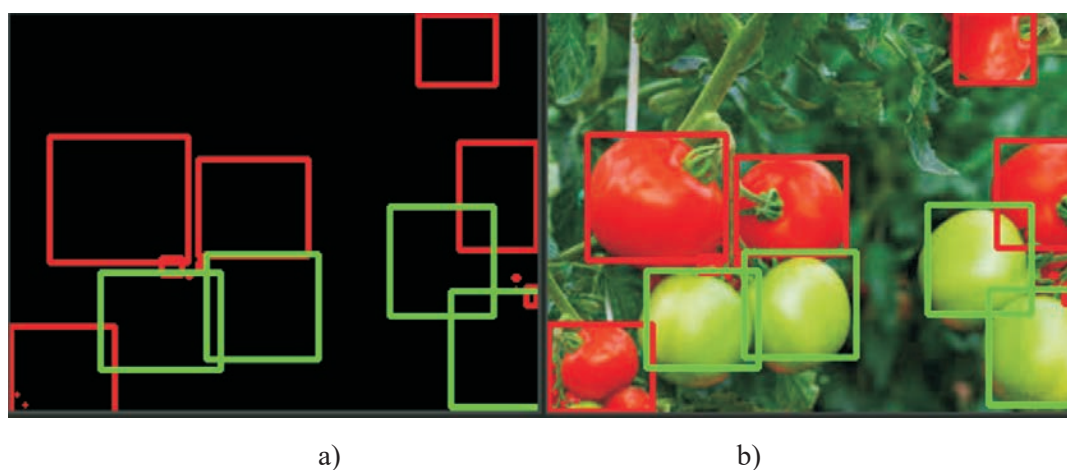


Figure 4 – Identifying objects by color and creating a bounding box

Object detection with YOLO. Object detection using CNN convolutional neural networks is one of the urgent tasks. When reviewing the literature on this problem, many researchers used the COCO dataset to compare different convolutional neural network models. Researchers and developers of the YOLO neural network also used it to compare with other models of convolutional non-ironic networks [2].

To train the YOLO neural network, we collected a dataset of 800 photographs that were taken in the Almaty Tomato Greenhouse, Kazakhstan. And also the photos were taken under different lighting conditions. When marking the data, the tomatoes were divided into 3 cash registers: 0-red, 1-green, 2-yellow. The training itself was carried out in 70 eras and the following results were obtained:

This image shows the PR curve for each class separately and one for all classes. The areas under these curves were calculated for each class in order to belong to a specific class and to evaluate the algorithm. The lowest value is shown by the second class, that is, the class for the yellow tomato, and the highest value for the red tomato. This is due to the fact that the set contains a relatively small amount of data for this class. Also, the dark blue curve shows the arithmetic mean of 0.83. For all classes of measuring the accuracy of the object detector in a particular dataset, the value is 0.5. This value is standard for YOLO5 and the AP of all images of each category is calculated, and then all categories are averaged, namely in mAP.

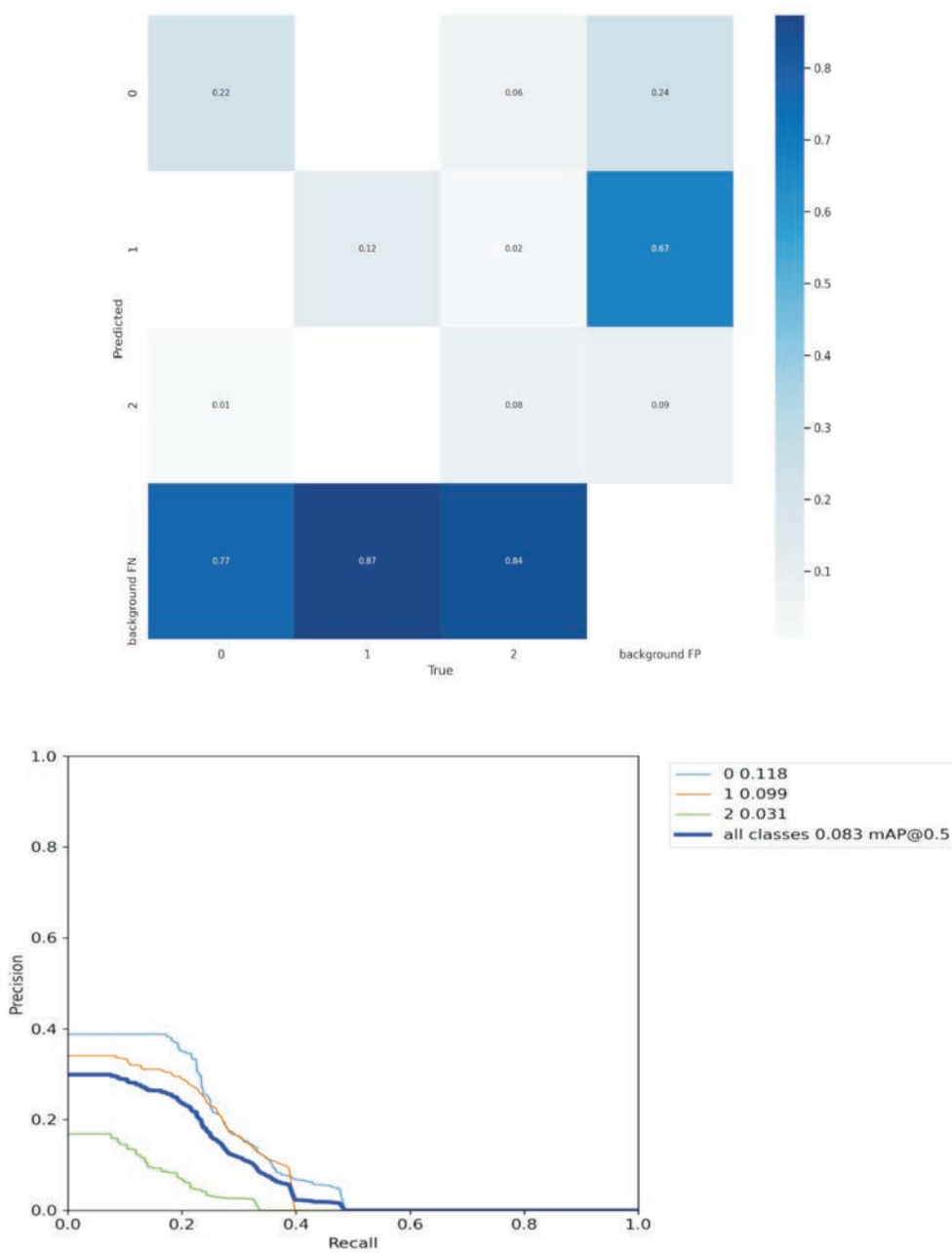


Figure 5 – Yolo learning outcomes

Results and Discussion.



Figure 6 – The results of the recognition of the algorithm, where different images with different illumination, from different angles and with different levels of background noise are selected.

Training and testing of the model is implemented on a computer with the following characteristics: Intel® Core™ i5-9400F CPU @ 2.90GHz, NVIDIA Corporation GP104 [GeForce GTX 1070 Ti], 24 GiB.

Conclusion. The color representation model has significant significant flaws, and very often these deficiencies are serious problems in the field of computer vision. For example, the strong influence of shadows and low light can significantly reduce the color recognition performance of tomatoes. That is, with the slightest change in illumination, some pixels of the image will not be recognized as part of the contour, or those pixels that are not part of it will also be associated with the contour. It is difficult to establish the desired color tone, as the tone determines the degree of color difference. Based on these two disadvantages, it was

decided to use the Yolo neural network. Based on the results of the research, the proposed solution recognizes ripe fruits in 99% of cases under different lighting conditions.

The results obtained are planned to be implemented in the future on the developed robotic manipulator in greenhouse conditions.

Acknowledgments. This work was carried out and funded under the grant project of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan AP08857573.

REFERENCES

1 A. Arefi, A.M. Motlagh, K. Mollazade, R.F. Teimourlou, Recognition and localization of ripen tomato based on machine vision // Australian Journal of Crop Science. - Vol. 5, Issue 10, - 2011, p. 1144-1149 ISSN: 18352693.

2 Y. Zhao, L. Gong, Y. Huang and C. Liu Robust tomato recognition for robotic harvesting using feature images fusion // Sensors (Switzerland). - Vol. 16, Issue 2, - 29 January 2016, №173 ISSN: 14248220, DOI: 10.3390/s16020173.

3 Y.P. Huang, D.Z. Wang, H.Y. Zhou, Y.T Yang, K.J. Chen Ripeness assessment of tomato fruit by optical absorption and scattering coefficient spectra // Spectroscopy and Spectral Analysis Volume 40, Issue 11, 1 November 2020, P. 3556-3561 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3556-06.

4 Y.P. Huang, R. Lu, C. Qi, K.J. Chen Tomato maturity classification based on spatially resolved spectra // Spectroscopy and Spectral Analysis Vol. 38, Issue 7, 1 July 2018, P. 2183-2188 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)07-2183-06.

5 Y. Huang, R. Lu, D. Hu, K. Chen Quality assessment of tomato fruit by optical absorption and scattering properties // Postharvest Biology and Technology Volume 143, September 2018, P. 78-85, DOI: 10.1016/j.postharvbio.2018.04.016.

6 Z. Al-Mashhadani, B. Chandrasekaran Autonomous Ripeness Detection Using Image Processing for an Agricultural Robotic System // 2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference, UEMCON 2020 №9298168, p. 0743-0748 DOI: 10.1109/UEMCON51285.2020.9298168.

7 K. S. Dhakshina, S. Esakkirajan, S. Bama, B. Keerthiveena A microcontroller based machine vision approach for tomato grading and sorting using SVM classifier // Microprocessors and Microsystems Volume 76, July 2020, ISSN: 01419331 DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103090.

8 K. S. Dhakshina, S. Esakkirajan, S. Bama A non destructive tomato grading and sorting mechanism using binary SVM pair based classifier for sustainable agricultural practices // Journal of Green Engineering Volume 10, Issue 7, July 2020, P. 3637-3654 ISSN: 19044720.

9 Y.P. Huang, T.H. Wang, H. Basanta, Using Fuzzy Mask R-CNN Model to Automatically Identify Tomato Ripeness // IEEE DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3038184.

10 Kuznetsova, A., Maleva, T., Soloviev, V. Detecting Apples in Orchards Using YOLOv3 and YOLOv5 in General and Close-Up Images Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) Volume 12557 LNCS, 2020, Pages 233-243 17th International Symposium on Neural Networks, ISNN 2020; Cairo; Egypt; 4 December 2020 до 6 December 2020, ISBN: 978-303064220-4 doi: 10.1007/978-3-030-64221-1_20.

11 K. Ko, I. Jang, J.H. Choi, J.H. Lim and D.U. Lee Stochastic decision fusion of convolutional neural networks for tomato ripeness detection in agricultural sorting systems // Sensors (Switzerland) Vol. 21, Issue 3, 1 February 2021, №917, Pages 1-14, ISSN: 14248220 DOI: 10.3390/s21030917.

12 Sandro Augusto Magalhães, Luís Castro, Germano Moreira, Filipe Neves dos Santos, Mário Cunha, Jorge Dias, António Paulo Moreira Evaluating the single-shot multibox detector and yolo

deep learning models for the detection of tomatoes in a greenhouse // Sensors 2021, 21(10), 3569; <https://doi.org/10.3390/s21103569>.

**Ж.А. БУРИБАЕВ², Ж.АМИРГАЛИЕВА¹, С.К. ДЖОЛДАСБАЕВ^{1,2},
М.С. ЖАСҰЗАҚ^{1,2}, А.С. ТУРЕГАЛИ², Д. ДАУЛЕТИЯ²**

¹Ақпараттық және есептеу технологиялары институты,

²Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,

Алматы, Қазақстан

YOLO 5 МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАНЫП ҚЫЗАНАҚ ТҮЙІНДЕРІНІҢ ЖЕТІЛУ ДЕҢГЕЙІН ТАҢУ

Ауыл шаруашылығында роботтандырылған жүйелерді енгізу маңызды міндеттерің бірі. Бұл жұмыста егін жинау үшін ауылиаруашылық роботының компьютерлік үлгісі ретінде үлгіні таңу мен машиналық оқыту әдістерін қолдану мүмкіндігі қарастырылған. Қызанақ жемістерін бағалау олардың өмірлік циклдеріне сәйкес жіктеудің тиімді әдісі – оны түсі бойынша анықтау: өсіп келе жатқан кезеңде жасыл, орта кезеңінде сары және піскен кезде қызыл түске боялады. Дағдылардың әдеттегі әдістері ауылиаруашылық секторындағы заманауи өндірісті басқарудың нақты таңдау критерийлеріне сәйкес келе алмайды, өйткені олар көп уақытты және төмен дәлдікті береді. Машинаны оқытуды қолдана отырып, функцияларды автоматты түрде алу әрекеті кескіндерді жіктеуде және таңу тапсырмаларында тиімді. Осылайша, мақалада Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің AP08857573 гранттық жобасы аясында жүргізілген және классикалық алгоритмдерге негізделген роботты жүйе ретінде піскен қызанақ жемістерін таңу бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген. HSV түсті моделі және k-алгоритмін қолдана отырып түсті сегментация-салыстырмалы Алгоритмдер ретінде және машиналық оқыту негізінде Yolo қолдану кезінде практикалық қолдану үшін қызанақ бойынша әмбебап зияткерлік жіктеу жүйесі ұсынылған.

Бұл зерттеу қызанақтың пісіп жетілуін бағалау үшін ең жақсы сипаттамалары мен дәлдігі бар арзан шешімді ұсынуға бағытталған. Нәтижелер дәлдік, жоғалту қисықтары және матрицаның шатасуы тұрғысынан жиналады. Нәтижелер ұсынылған модель 99% дәлдікті қамтамасыз ететін қызанақты жіктеу міндеттері үшін зерттеушілер қолданатын машинаны оқытудың басқа әдістерінен (ML) асып түсетінін көрсетті.

Түйін сөздер: машиналық оқыту, қызанақты таңу, роботты жүйелер, ауылиаруашылық робот, HSV сегментациясы, Yolo.

**Ж.А. БУРИБАЕВ², Ж. АМИРГАЛИЕВА¹, С.К. ДЖОЛДАСБАЕВ^{1,2},
М.С. ЖАСҰЗАҚ^{1,2}, А.С. ТУРЕГАЛИ², Д. ДАУЛЕТИЯ²**

¹Институт информационных и вычислительных технологий,

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

Алматы, Казахстан

РАСПОЗНАВАНИЕ ЗРЕЛОСТИ ПЛОДОВ ТОМАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ YOLO 5

Внедрение робототехнических систем и цифровизация в сельском хозяйстве на сегодняшний день является важной задачей. В данной работе рассмотрена возможность применения методов

распознавания образов и машинного обучения как компьютерная модель сельскохозяйственного робота, предназначенной для сбора урожая. Одной из актуальных задач является классификация томата по зрелости плодов в соответствии с их жизненными циклами, которые можно идентифицировать по их цвету: зеленый – на этапе растущего, желтый – в стадии предварительной созревания, а красный – созревший. Обычные методы навыков не могут соответствовать точным критериям выбора для современного управления производством в сельскохозяйственном секторе, поскольку они потребляют много времени и низкой точности. Автоматическое поведение экстракции функций с использованием машинного обучения наиболее эффективно в классификации изображений и задачах распознавания. Таким образом, в статье представлены результаты исследования по признанию спелых томатных фруктов роботизированной системой, проведенной в рамках грантового проекта Министерства образования и науки Республики Казахстан AP08857573 и реализованы классические алгоритмы, основанные на основе Цветовая модель HSV и сегментация цвета с использованием алгоритма k-ближайших в качестве сравнительных алгоритмов и на основе машинного обучения. Для практического использования при использовании Yolo предложена универсальная интеллектуальная система классификации томата.

Это исследование направлено на предоставление недорогого решения с наилучшими характеристиками и точностью для оценки зрелости томата. Результаты собираются с точки зрения точности, кривых потерь и путаницы матрицы. Результаты показали, что предлагаемая модель превосходит другие методы обучения машины (ML), используемые исследователями для задач классификации томатов, обеспечивая точность 99%.

Ключевые слова: машинное обучение, распознавание помидоров, роботизированные системы, сельскохозяйственный робот, сегментация HSV, Yolo.

Б.-Б. С. ЕСМАГАМБЕТОВ

*Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
bulatbatyr@mail.ru*

ФОРМИРОВАНИЕ СЛУЖЕБНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СЖАТИЕМ ДАННЫХ

В телеметрических системах с использованием необратимого сжатия данных возможно использование нескольких методов формирования сообщений. В канальном пакете выходных данных может быть несколько кодовых слов, определяющих его состав. Они могут быть объединены и расставлены в строго определенной последовательности. Такой пакет данных представляет собой кодовую комбинацию постоянной или переменной длины, причем постоянная длина пакета формируется в случае заранее определенного и неизменного объема информации на интервале выдачи данных, а переменная – в противном случае. С канальным пакетом данных далее можно обращаться как с единым целым: снабжать его адресной информацией об источнике сообщения, информацией об интервале времени, на котором был сформирован пакет, для привязки существенных отсчетов ко времени, дополнительными проверочными символами и кодами для повышения помехоустойчивости передачи или с этой же целью определенным образом формировать структуру пакета. Адресная, временная и синхронизирующая информация в литературе называется служебной. Необходимость передачи служебной информации снижает эффективность приемопередающих систем. Поэтому проблема сокращения объема служебной информации является чрезвычайно актуальной.

Ключевые слова: *сжатие данных, служебная информация, существенные отсчеты, коэффициент сжатия, буферное запоминающее устройство, адаптивное коммутирование, телеметрический кадр.*

Введение. Рассмотрим принципы формирования служебной информации в системах со сжатием данных. Существуют следующие системы, отличающиеся способом выравнивания потоков сжатых данных [1]:

- с буферным запоминающим устройством (БЗУ);
- с адаптивным коммутированием.

Для систем с БЗУ характерно наличие переменной задержки в буфере, а системы с адаптивным коммутированием работают в реальном масштабе времени, что и обуславливает особенности формирования служебной информации. Для анализа различных способов ее формирования введем понятие коэффициента сжатия полосы частот канала передачи:

$$K_{сж}^F = n_{вх} / n_{вых},$$

где $n_{вх}$ – объем измерительной информации в кадре,

$$n_{вых} = Nn_{и} / K_{сж} + n_{адр} + n_{вр},$$

где $K_{сж}$ – коэффициент сжатия по числу отсчетов; N – число каналов в адаптивной системе; $n_{и}$ – объем информационной части одного измерения; $n_{адр}$ – объем адресной информации; $n_{вр}$ – объем временной информации.

Методы и материалы. Сравнить различные способы формирования служебной информации следует при одинаковых входных условиях. Допустим, что объем измерительной информации для всех отсчетов одинаков, а вероятность появления существенных отсчетов для всех случаев также одинакова и равна

$$p_{\text{сущ}} = 1/\bar{K}_{\text{сж}},$$

где $\bar{K}_{\text{сж}}$ – усредненный коэффициент сжатия.

При групповом способе формирования служебной информации производится анализ каждого отсчета и присвоение символа 1 существенным отсчетам и символа 0 – избыточным [2]. По этим индексам формируется одинаковый адрес кадра $n_{\text{адр}}$, за которым следуют информационные части сообщения $n_{\text{и}}$ только тех каналов, отсчеты которых оказались существенными. Формирование группового адреса для системы, содержащей пять каналов, показано на рисунке 1, при этом существенные отсчеты содержатся в первом и третьем каналах. Временная информация при данном способе не передается, а подсчет числа кадров возлагается на ЭВМ. Коэффициент сжатия в этом случае равен

$$K_{\text{сж}}^F = n_{\text{вх}}/n_{\text{вых}} = N_{n_{\text{и}}}/(n_{\text{адр}} + n_{\text{и}}N/K_{\text{сж}})$$

где N – число измерительных каналов в кадре. При $n_{\text{адр}} = N$ выше приведенное выражение можно записать в виде

$$K_{\text{сж}}^F = n_{\text{и}}K_{\text{сж}}/(K_{\text{сж}} + n_{\text{и}}).$$

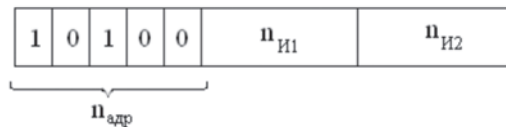


Рисунок 1 – Формирование группового адреса

Недостатком этого способа является низкая помехоустойчивость, так как неправильный прием одного символа в адресной информации может привести к ошибочной расшифровке всей измерительной информации.

В следующем способе вероятность неправильной расшифровки уменьшается за счет передачи временной синхронизации через несколько кадров (псевдокадр) $m \geq 1$, где m – число кадров в псевдокадре. В этом случае, если происходит сбой ряда служебной информации, то теряется только один псевдокадр. При уменьшении числа кадров в псевдокадре уменьшается вероятность неправильной расшифровки сжатых данных, но при этом возрастают аппаратные затраты на реализацию способа, так как увеличивается необходимый объем памяти. Эффективность данного способа можно описать следующим соотношением

$$K_{\text{сж}}^F = n_{\text{и}}N/(N + n_{\text{вр}}/m + n_{\text{и}}N/K_{\text{сж}}).$$

В третьем способе формирования служебной информации адресная информация передается с каждым существенным отсчетом, а временная информация кодируется

одним разрядом в каждом слове. В начальном слове каждого кадра в этом разряде записывается 1, а во всех последующих словах данного кадра – 0. Таким образом один дополнительный разряд в словах позволит расшифровать каждый кадр, а адресная информация существенных отсчетов – точно определить временную привязку этих кадров. На рисунке 2 показано пояснение этого способа. Для правильной расшифровки данных необходимо в каждом кадре, даже если все выборки избыточны, передавать один измерительный отсчет. Поэтому эффективность данного способа можно описать формулой

$$K_{сж}^F = n_{и} N / ((\log N + 1 + n_{и})(N/K_{сж} + p)),$$

где N – число каналов в кадре; $p = (1 - 1/\bar{K}_{сж})N$ – вероятность не появления существенных отсчетов в кадре.

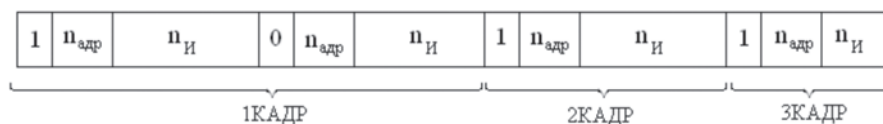


Рисунок 2 – Формирование адресной информации с каждым существенным отсчетом

Недостаток этого способа заключается в низкой помехоустойчивости, так как искажение одного временного разряда приводит к сдвигу всей информации в кадре. Поэтому с учетом передачи времени через $m \geq 1$ кадров в псевдокадре эффективность способа можно описать соотношением

$$K_{сж}^F = n_{и} N / ((\log N + 1 + n_{и})(N/K_{сж} + p) + n_{вр} / m).$$

В четвертом способе адресная информация передается с каждым существенным отсчетом. В этом случае объем адресной информации равен

$$N_{адр} = N \log N / K_{сж}$$

На рисунке 3 показаны зависимости объема служебной информации $n_{адр}$ от коэффициента сжатия. Из анализа рисунка следует, что при коэффициентах сжатия $K_{сж} < K_{пор}$ выгоднее применять групповой способ формирования служебной информации, а при $K_{сж} > K_{пор}$ – формировать адресную информацию с каждым существенным отсчетом. Например, при $N = 64$ и $K_{сж} = 30$ объем служебной информации $-\Delta n_{адр}$ сокращается почти в 6 раз и наоборот при $K_{сж} = 4$ и $N = 60$ объем служебной информации $+\Delta n_{адр}$ увеличивается более чем в 2 раза.

В информационно-измерительных системах, использующих сжатие данных с буферным запоминающим устройством (БЗУ), которое выравнивает поток сжатых данных во времени, можно передавать дополнительную информацию о задержке сообщений в БЗУ, с привязкой измерений по времени [3]. Кодирование времени задержки в БЗУ производится прямо пропорционально заполнению буферного ЗУ. Время задержки информации, поступающей в БЗУ, равно $t_{зад} = qT$, где q – число заполненных ячеек памяти; T – период считывания информации из одной ячейки.

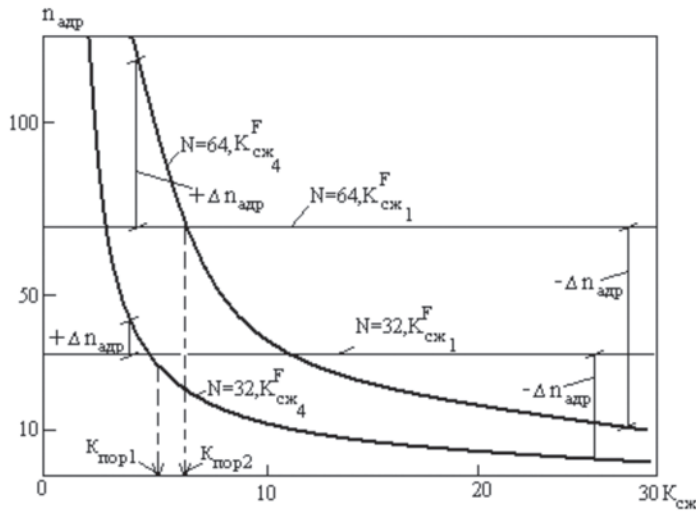


Рисунок 3 – Зависимость объема служебной информации от коэффициента сжатия

В большинстве телеметрических адаптивных систем точность временной привязки может не превышать нескольких периодов считывания [4]. Поэтому достаточно передавать, в каком промежутке $l = \log_2 L$ появляется существенный отсчет. Здесь L – объем памяти БЗУ перед записью очередного существенного отсчета.

Число выборок, поступающих в БЗУ, в среднем в $K_{сж}$ раз меньше числа выборок, поступающих на вход устройства сжатия данных. Поступление выборок в БЗУ идет неравномерно во времени, а считывание из БЗУ в канал связи или в регистрирующее устройство производится один раз за период считывания: $T = \tau K_{сж} / p$, где $p < 1$ – коэффициент загрузки буфера; τ – канальное время обработки каждого измеряемого параметра. Если перед записью БЗУ номер зоны, в которую попадет отсчет, равен k , причем $1 < k \leq l = \log_2 L$, тогда временную задержку можно выразить соотношением

$$t_{з\text{ад}} = kT = k\tau K_{сж} / p.$$

Погрешность временной привязки в этом случае равна половине времени задержки в каждой зоне, т.е.

$$t_{ош} = LT/2l$$

или с учетом выше приведенного соотношения

$$t_{ош} = L\tau K_{сж} / 2lp.$$

Коэффициент сжатия полосы частот при кодировании времени по задержке сообщений в БЗУ

$$K_{сж}^F = n_n K_{сж} / (\log N + \log l + n_n).$$

Использование БЗУ имеет следующие преимущества:

- достаточно простая аппаратурная реализация;

- при автоматическом изменении апертуры в зависимости от заполнения буферной памяти не требуется дополнительной служебной информации о величине апертуры;
- при сбое информации в кадре последующая информация не искажается.

К недостаткам можно отнести наличие погрешности $t_{\text{ош}}$ временной привязки измерений. Этот недостаток можно исключить, если моменты считывания существенных отсчетов в канале привязать к анализу текущих выборок на избыточность в определенном информационном канале. Кроме того, при поступлении в БЗУ каждого существенного отсчета необходимо передавать число выборок, ожидающих считывания в канал связи, т.е. заполнение в БЗУ.

Результаты и их обсуждение. Проведем анализ восстановления сжатых данных во времени. Пусть моменты считывания избыточных отсчетов в канал связи соответствуют моментам времени анализа текущих выборок на избыточность в N_k фиксированных каналах. Допустим на приемной стороне в момент времени t_0 принята выборка с адресом $N_i \leq A \leq N_{i+1}$, $1 \leq i \leq k$, $N_{i+1} \leq N_k$, которая снабжена признаком M (число выборок, ожидающих считывания в канал связи). В этом случае можно однозначно рассчитать момент измерения существенного отсчета

$$t = t_n + A\tau, \tag{1}$$

где t_n – время анализа на существенность начального канала кадра.

Таким образом, для определения t необходимо определить t_n . Для этого покажем, как связывается номер фиксированного канала N_j при считывании выборки с адресом A в канал связи ($1 \leq j \leq k$) и число полных кадров R , через которые выборка поступила в канал связи. Счет каналов k каждого кадра начнем с $(N_j + 1)$ – го канала. При этом в каждом кадре последним будет N_j –й канал, учитывая при счете, что за последним каналом следует начальный. Число кадров R определяется, как целая часть дроби $R = [M/k]$. Остаток от деления M на k равный $\Delta M = M - [M/k]k$, дает число считываний между моментами времени t и началом первого полного кадра из R рассматриваемых. Так как $N_i \leq A \leq N_{i+1}$, то число j считываний

$$j = i + \Delta M = i + M - [M/k]k, \tag{2}$$

если каналы с номерами A и N_j принадлежат одному и тому же кадру (с начального до последнего канала).

Если же канал с номером N_i принадлежит следующему кадру, то

$$j = i + M - [M/k]k - k \tag{3}$$

Формулы (2) и (3) можно объединить, если ввести вспомогательную величину δ_k со следующими свойствами:

$$\begin{aligned} \delta_k &= 0 \text{ при } i + M - [M/k]k < k_r, \\ \delta_k &= 1 \text{ при } i + M - [M/k]k > k_r, \end{aligned}$$

Тогда $j = i + M - [M/k]k - k\delta_k$

Время t_j , за которое оценивается избыточность или существенность отсчета в канале N_j , определяется как разность между начальным моментом времени t_0 и пе-

риодом прохождения R кадров: $t_j = t_0 - RN_\tau$. Тогда момент проверки существенности первого канала из кадра t_n определяется как

$$t_n = t_j - N_j\tau - N\tau\delta_k. \quad (4)$$

Подставляя формулу (4) в вышеприведенные выражения, получим для оценки времени измерения существенного отсчета с адресом A следующую зависимость:

$$t = t_0 + (A - N_i)\tau - ([M/k] + \delta_k)N\tau,$$

где N_j – канал, содержащий существенный отсчет и предшествующий каналу A ; $j = i + M - [M/k]$ – номер канала N_j ; $l \leq i \leq k$ – пределы изменения номера выборки, принятой на приемной стороне с признаком M , равным длине очереди в БЗУ в момент ее передачи; τ – время обработки сообщения на существенность.

Коэффициент сжатия полосы частот для этого способа формирования временной информации с коррекцией времени задержки сообщений в буфере определяется по формуле

$$K_{сж}^F = n_i K_{сж} / (n_i + \log N + \log L),$$

где L – емкость памяти БЗУ.

Если передавать информацию о времени появления существенного отсчета с каждым из них, то коэффициент сжатия полосы частот можно описать выражением

$$K_{сж}^F = n_i K_{сж} / (\log N + n_{вр} + n_i),$$

где $n_{вр}$ – длина кода сообщения о времени появления отсчета.

Рассмотрим теперь способы формирования группового сигнала при формировании телеметрического кадра.

На основе канальных пакетов данных в многоканальных ИИС с временным или адресным (кодовым) разделением каналов формируется групповой сигнал (ГС), включающий информацию либо по всем каналам (циклический принцип опроса каналов), либо только по активным каналам (адаптивный принцип опроса) [5]. Порядок следования канальных пакетов данных в ГС, характер и объем дополнительной информации, входящей наряду с канальными пакетами данных в ГС, определяются режимом опроса измерительных каналов и конкретными процедурами сжатия составляющих. В простейшем случае (рисунок 4,а) ГС составляют пакеты данных фиксированной длины (заранее определенной для каждого канального измерительного сигнала), причем и порядок следования канальных пакетов данных в ГС строго определен.

Для улучшения привязки сообщений по времени, качества дешифрации и синхронизации в начале группового сигнала формируется и передается признак группового сигнала ПГС. Переменную длину канального пакета (рисунок 4,б) получают, например, в случаях:

если объем информации устанавливается адаптивным образом;

если число оценок ВХ или ординат оценки переменна для различных ГС.

В последнем случае требуется передача дополнительного признака конца канального пакета данных.

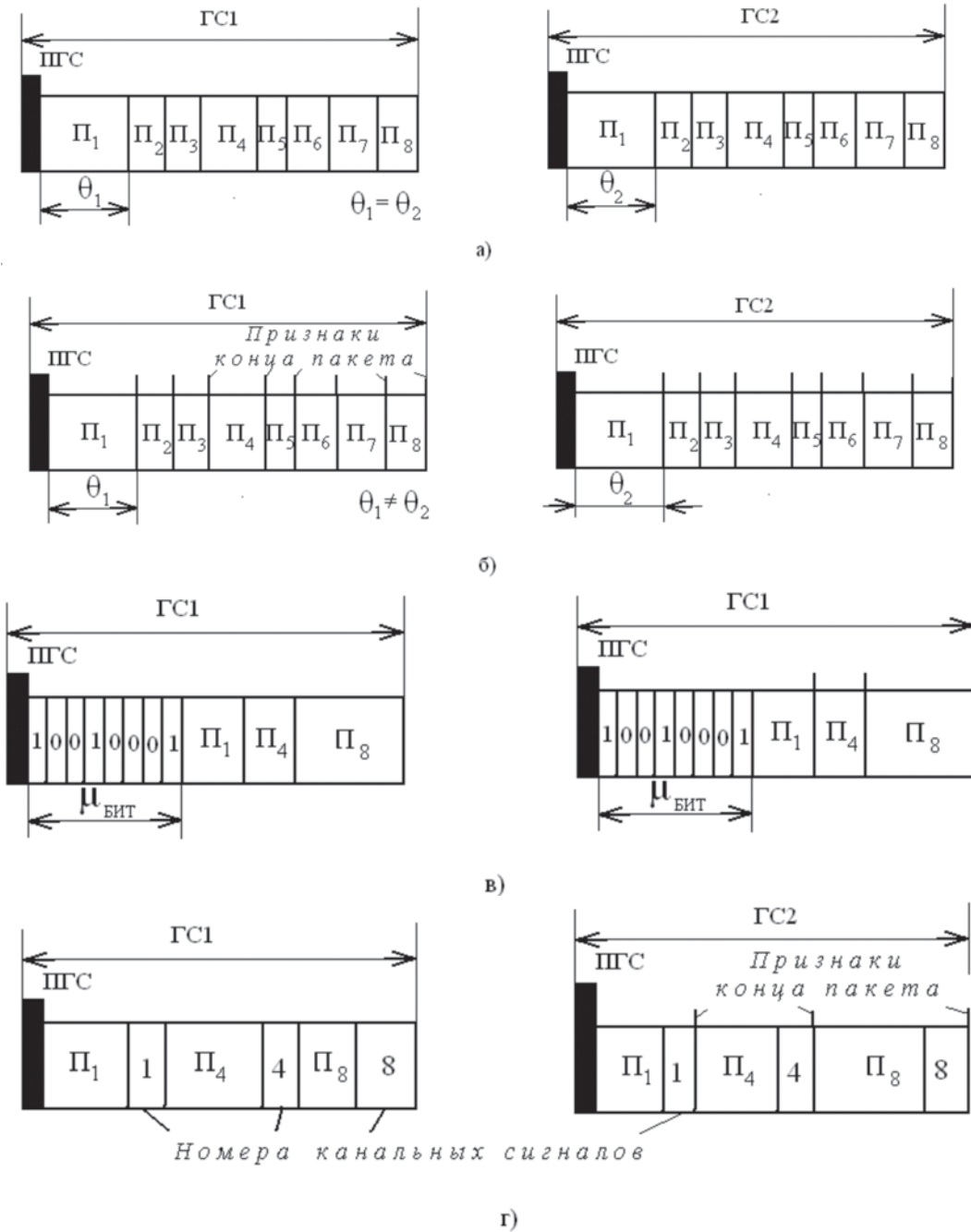


Рисунок 4 – Групповой сигнал в многоканальных ИИС

Более сложные структуры ГС (рисунок 4,в,г) обеспечивают в некоторых случаях и более высокий коэффициент сжатия. Так, например, если в результате процедур

сжатия составляющих какого-либо канального сигнала выявилось, что информация о составляющих сигнала на текущем интервале времени избыточна (несущественна для потребителя информации), то в ГС пакет данных этого измерительного канала отсутствует.

Для безошибочной дешифрации пакетов на приемной стороне и улучшения их временной привязки в ГС включается признак группового сигнала, а также специальный μ – разрядный код, в котором номера разрядов соответствуют номеру канала. В эти разряды заносится единица, если по соответствующему каналу информация передается, или ноль – в противном случае. Вместо этого μ – разрядного кода можно передавать с каждым пакетом данных r – разрядный код номера соответствующего ему канального пакета, где $r = \log_2 N$. В перечисленных случаях достаточной информацией об отрезке времени, которому соответствуют данные в пакетах, служит признак группового сигнала (ПГС).

Таковыми структурами ГС можно пользоваться в тех случаях, когда все ГС формируют на постоянных отрезках времени. В случаях формирования различных ГС на различных отрезках времени в составе ГС за признаком ГС передают код, дешифрирование которого на приемной стороне позволяет определить начало, конец и длину отрезка времени, которому соответствуют пакеты данных, входящие в состав ГС. В наиболее общем случае ГС и канальные пакеты данных формируются на переменных отрезках времени, длина которых определяется свойствами измеряемых процессов. В состав ГС в этом случае входит переменное число канальных пакетов данных, причем число пакетов данных для какого-либо фиксированного канального измерительного сигнала также различно. С каждым пакетом данных передается информация о номере канала и об отрезке времени, которому соответствуют данные в пакете.

По окончании процесса формирования ГС, производится буферизация (при необходимости), передача, прием и дешифрация ГС обычным образом. Селектируемый признак ГС на приемной стороне позволяет осуществлять временную привязку и дешифрацию ГС. После дешифрации ГС и пакетов данных производятся при необходимости операции по восстановлению функций времени по обратимо сжатым данным (квазидетерминированная составляющая, процесс на интервалах нестационарности и т.д.) и регистрация информации по каждому измерительному каналу.

Заключение. Поскольку алгоритмы необратимого сжатия данных зачастую должны строиться с комбинацией процедур обратимого и необратимого сжатия на различных интервалах времени [6], то значения коэффициента сжатия на этих интервалах могут в сильной степени отличаться друг от друга. Вместе с тем объем служебной информации в зависимости от принципа ее формирования может определяться величиной коэффициента сжатия, а может и не зависеть от него. Так, при групповом способе формирования адресной части сообщения количество служебной информации (I_1), приходящейся на один кадр, постоянно и равно числу каналов, т.е. $I_1 = N = \text{const}$. При передаче адреса каждого канального сообщения объем служебной информации I_2 определяют по формуле

$$I_2 = N \log N / K_{\text{ск}}$$

При этом $I_2 \geq I_1$ до некоторого порогового коэффициента сжатия $K_{\text{пор}}^{\text{сж}}$, а затем наблюдается обратная картина (рис.5), т.е. $I_2 < I_1$. Отсюда следует возможность оптимизации величины $K^{\text{сж}}$ путем адаптивного формирования служебной информации в зависимости от коэффициента сжатия участка процесса или вида процесса. Направление минимизации объема служебной информации показано на рисунке 5 стрелками.

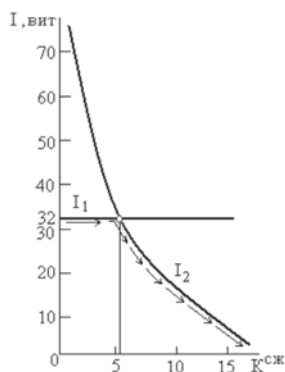


Рисунок 5 – Минимизация объема служебной информации

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее эффективным из всех способов формирования служебной информации при коэффициенте сжатия $K > 20$ является способ передачи адреса с каждым существенным отсчетом, а временной информации – с каждым псевдокадром.
2. При коэффициенте сжатия $K < 5$ все способы примерно одинаковы.
3. Во всех случаях наличие служебной информации понижает эффективность сжатия в 2-2,5 раза.
4. При согласовании сжатых данных с каналом связи методом адаптивного коммутирования необходимость в передаче временной информации с каждым существенным отсчетом отпадает.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Анализ систем со сжатием данных/ В.А.Свириденко. – М.: Связь, 1977. – 184с.[Analiz sistem so szhatiem dannyh/ V.A.Sviridenko. – М.: Svyaz', 1977. – 184s.]
- 2 Назаров А.В., Козырев Г.И. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс.– С-П.: Наука и техника, 2007.–667 с.[Nazarov A.V., Kozыrev G.I. i dr. Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike. Uchebnyj kurs.– S-P.: Nauka i tekhnika, 2007.–667 s.]
- 3 Есмагамбетов Б.-Б.С. Основные характеристики системы формирования потоков сжатия сообщений. Вестник Национальной Академии Наук РК. – Алматы, 2006. – №3. – С16-17. [Esmagambetov B.-B.S. Osnovnyye harakteristiki sistemy formirovaniya potokov szhatiya soobshchenij. Vestnik Nacional'noj Akademii Nauk RK. – Almaty, 2006. - №3. - S16-17.]
- 4 Адаптивные телеизмерительные системы/А.В.Фремке. – Л.:Энергоиздат, 1981. – 248с. [Adaptivnyye teleizmeritel'nye sistemy/A.V.Fremke. – L.:Energoizdat, 1981. – 248s.]
- 5 М.А. Эльшафеев, И.М. Сидякин, С.В. Харитонов, Д.С. Ворнычев. Исследование методов обратимого сжатия телеметрической информации. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. №3.- М., 2014. С.92-104.[M.A. El'shafei, I.M. Sidyakin, S.V. Haritonov, D.S.

Vornychyev. Issledovanie metodov obratimogo szhatiya telemetricheskoj informacii. Vestnik MGТУ im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie. №3.– М., 2014. S.92-104.]

6 М. В. Некрасов, Д. Н. Пакман, А. Н. Антамошкин. Методы унификации современных средств обработки телеметрической информации в центрах управления полётами космических аппаратов. Вестник СибГАУ. № 1(53). – Красноярск, 2014.– С. 48-53.[М. V. Nekrasov, D. N. Pakman, A. N. Antamoshkin. Metody unifikacii sovremennyh sredstv obrabotki telemetricheskoj informacii v centrakh upravleniya polyotami kosmicheskikh apparatov. Vestnik SibGAU. № 1(53). – Krasnoyarsk, 2014. S. 48-53.]

Б. С. ЕСМАҒАМБЕТОВ

*М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан
bulatbatyr@mail.ru*

ДЕРЕКТЕРДІ ҚЫСУ АРҚЫЛЫ ТЕЛЕМЕТРИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ҚЫЗМЕТТІК АҚПАРАТТЫ ҚАЛЫПТАСТЫРУ

Деректердің қайтымсыз қысылуын пайдаланатын телеметриялық жүйелерде хабарларды қалыптастырудың бірнеше әдістерін пайдалануға болады. Шығу деректерінің арналық пакетінде оның құрамын анықтайтын бірнеше кодтық сөздер болуы мүмкін. Олар біріктірілуі және қатаң белгіленген реттілікке орналастырылуы мүмкін. Мұндай деректер пакеті тұрақты немесе ауыспалы ұзындықтың кодтық комбинациясын білдіреді, бұл ретте пакеттің тұрақты ұзындығы деректерді беру аралығындағы ақпараттың алдын ала анықталған және өзгермеген көлемі жағдайында, ал ауыспалы - керісінше жағдайда қалыптастырылады. Арналық деректер пакетімен бұдан әрі біртұтас ретінде жұмыс істеуге болады: оны хабар көзі туралы адрестік ақпаратпен, уақытқа елеулі есептеулерді байланыстыру үшін пакет қалыптастырылған уақыт аралығы туралы ақпаратпен, қосымша тексеру символдарымен және берудің бөгеул орнықтылығын арттыру үшін кодтармен жабдықтауға немесе осы мақсатта пакет құрылымын белгілі бір түрде қалыптастыруға болады. Әдебиетте адрестік, уақыттық және синхрондау ақпарат қызметтік ақпарат деп аталады. Қызметтік ақпаратты беру қажеттілігі қабылдау-тарату жүйелерінің тиімділігін төмендетеді. Сондықтан қызметтік ақпарат көлемін қысқарту мәселесі өте өзекті болып табылады.

***Түйін сөздер:** деректерді сығу, қызметтік ақпарат, елеулі есептеулер, сығу коэффициенті, буферлік есте сақтау құрылғысы, бейімделу коммутациясы, телеметриялық кадр.*

B.-B. S. YESMAGAMBETOV

*South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan
bulatbatyr@mail.ru*

FORMATION OF SERVICE INFORMATION IN TELEMETRY SYSTEMS WITH DATA COMPRESSION

In telemetry systems, using irreversible data compression, several message generation methods can be used. In the channel output packet, there may be several code words defining its composition. They can be combined and arranged in a strictly defined sequence. Such a data packet is a constant or variable length code combination, wherein the constant length of the packet is generated in the case of a predetermined

and unchanged amount of information at the data output interval, and the variable is otherwise generated. The channel data packet can then be treated as a single whole: provide it with address information about the source of the message, information about the time interval at which the packet was formed, to bind significant samples to time, additional check symbols and codes to increase interference immunity of transmission, or to form a packet structure in the same way. Address, time and synchronization information in the literature is called overhead. The need to transmit overhead information reduces the efficiency of the transceiver systems. Therefore, the problem of reducing the volume of service information is extremely urgent.

Keywords: *data compression, service information, substantial counts, compression ratio, buffer memory, adaptive switching, telemetry frame.*

N. DOLZHENKO*, E. MAILYANOVA

Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan

AVIATION SIMULATOR SOFTWARE, TYPICAL FUNCTIONS AND ITS DEVELOPMENT PROSPECTS

Flight simulators have been used for more than eighty years. The development of aircraft simulators that simulate the pilot's work in the cockpit, the conditions of take-off, flight, landing, as well as the work of the dispatcher to train and maintain the professional level of aviation specialists is being addressed worldwide[1]. Training complexes can be divided into several parts, one of which is software.

The instructor's workstation software allows him to set various parameters of take-off, flight and landing conditions, as well as monitor and control the simulator subsystems. The article discusses typical functions of simulator software and prospects for the training development on flight simulators.

Keywords: *flight simulators, software, visualization, instructor's workplace, training in piloting.*

According to ARINC 610 revision C "Guidelines For Design and Integration of Aircraft Avionics Equipment in Simulators," the prime object in creating simulators software is to ensure that the aerobatic simulators use the relevant aircraft equipment to provide spare parts, and the software must ensure that the reaction of the equipment on the aircraft and on the aerobatic simulator is the same. In addition, an important feature of the software should be the ability to "save" or "freeze" the current training activity on the simulator, in order to be able to analyze a specific situation during the training process.

Flight simulator includes instructor's workstation with control panel. It is from this console that complex, emergency and non-standard situations are entered and canceled, meteorological conditions are set, etc. There is a headset, monitors and other equipment necessary to conduct training or maintain the professional level of pilots.

On civil flight simulators, the instructor's workplace is located into the simulator cockpit (or outside), in military aircraft it is located outside the simulator, which does not affect the standard set of software functions.

Complexity and modularity are general principles of instructor's workplace software development.

Complexity is realized by creating a system that is flexibly configurable to work with various combinations of software and hardware, and modularity is implemented by sequentially dividing the structure of the entire program into software modules, which should ensure an increase in the functionality of the program. However, the modular approach, easing some of the difficulties, imposes additional restrictions on the system as a whole, associated with bringing the data into a compatible form.

The instructor's workplace software can be subdivided into the following modules:

- a module of general functionality, including the processing of control elements application graphical user interface;
- interface module for data exchange of the instructor's workplace with the simulator subsystems.

* E-mail корреспондирующего автора.: nadin-air@mail.ru

In turn, the software module of the general functionality includes the following components:

- software module of the graphical user interface;
- a general application settings module that interacts with elements of the application’s graphical user interface;
- model of interaction with the interface level of the application for changing and displaying parametric information through a graphical user interface [2].

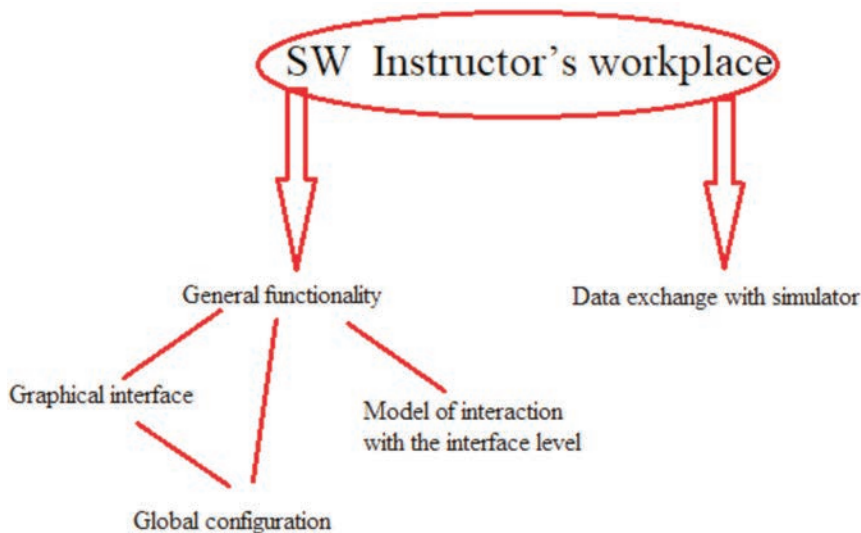


Figure 1 – Instructor’s workstation software

At the interface level, the software module of the instructor’s workplace interacts with mathematical models that simulate the operation of the aircraft on-board systems.

Typical software allows you to set the following parameters: aircraft position, flight altitude, speed, amount of fuel, meteorological conditions, temperature, pressure, wind speed and direction at the surface of the earth and at heights. Databases of flight simulators can consist of more than 20,000 airports in the world and contain a relief grid of the entire earth’s surface. For greater realism, the screen displays both large objects - seas, cities, forests, and small - cars, trees, animals and airfield objects. At airfields, dynamic objects are also visible - an approaching tanker, a baggage loader, as well as other aircraft - in the process of taxiing, taking off, or flying along a given route[3,4].

There are acoustic noise simulators, which allows you to hear the sound situation during all procedures and modes - starting and testing the engine, take-off, flight, landing. The sounds of emergency situations are also imitated. IATA recommends to use seventeen basic simulator functions, which are reflected in the instructor’s workstation software. This are:

- “saving data” or “freezing” flight data (latitude, longitude, airspeed, course, altitude);
- “saving data” or “freezing” only the location (latitude and longitude), all other flight parameters remain dynamic;
- “saving data” or “freezing” altitude;

- “saving data” or “freezing” the amount of fuel;
- location setting;
- change in latitude and / or longitude;
- change in height;
- course change;
- “take a picture” function (the state of the simulator system);
- recall of a (saved) snapshot (of the simulator system state);
- acceleration in N times of position, height, amount of fuel;
- zero fuel value on the ground or in the air;
- setting the fuel weight;
- setting temperature / pressure (sea level, earth or air temperature overboard and pressure);
- instant movement of the aircraft;
- wind setting.

At the end of the training flight, it may be necessary to “freeze” the flight simulation before transferring the simulator to another pilot to continue the flight under the conditions that have been established.

During a training maneuver, the instructor can stop the process in order to explain the function of the system or a state that is transient and disappears at the end of the maneuver.

In addition to these functions, maintenance settings can also be used (resetting the error memory, setting the parameters for registering errors, saving the error memory, loading the error memory) and specific functions for military use (fixing ammunition, task execution time, suspending the task, changing consumables, changing load / carrying capacity, etc.).

For each aircraft model, a set of subsystem failures is implemented. It is possible to specify failures of aircraft subsystems [5].

Modern simulators are very expensive, the release of a new aircraft requires the presence of an appropriate simulator, virtual technologies can change this situation.

Virtual technologies have entered everyday life, quite quickly they penetrate the field of professional training.

The VR training device consists of:

- VR headset;
- VR on-board computer;
- software for VR flight;
- steering wheel pedals;
- joystick or other aircraft control device.

As a visualization system, virtual reality glasses synchronized with the behind-the-table image generation system are used. The system allows you to load a location from anywhere in the world. The capabilities of virtual technologies are such that they allow trainees to “fly” in a single surrounding space, take-off, landing, etc. The simulator makes it possible to use virtual cockpit fittings, since the visualization system allows displaying the pilot’s hands. The trainee is able to perform all actions with the cockpit fittings with his hands.

At the intersection of simulator technologies and virtual reality technologies, new advanced solutions may arise in the field of training and maintaining the professional level of aviation personnel.

The software implements a highly detailed image of the virtual cabin and dashboard, which make the simulation as close as possible to the real process of aircraft control, the latest 3D graphics provide a high level of realism. VR devices allow you to undergo flight training in a less stressful and more controlled environment.

In April 2021, the Swiss company VRM Switzerland, which provides pilot training, was the first in history to receive approval from the EU Aviation Safety Agency for the use of the VRM H125 VR flight simulator for training pilots [6].

REFERENCES

1 Dolzhenko N., Mailyanova E., Assilbekova I., Konakbay Z. Design features of modern flight simulation devices, mobility systems and visualization systems. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences// - 2021, №3 (447), may – june, -P. 16–20.

2 Typical functions of the flight simulator instructor workstation software. L.A. Chizhikova. Software products and systems // -2016. -№ 3. V. 29. -P. 181-186.

3 Aviation simulators of modular architecture: monograph. / E. V. Lapshin, A. M. Danilov, I. A. Gar'kin, B. V. Klyuev, N. K. Yurkov. - Penza: Inform.-Publishing House. Center PSU, 2005. - 148 p.

4 Theory and practice of simulation and creation of simulators / A. M. Danilov, E. V. Lapshin // Instruments and control systems. - 1989. - №. 8. - P. 57-60.

5 Bezbogov, A.A. Modern aviation simulators. Part 3. Modeling the acceleration environment / A. A. Bezbogov, L. M. Dubovyi, P. P. Zobkov / Riga Higher Military Aviation Engineering School named after Yakov Alksnis. - Riga, 1988. - S. 65–76. <https://holographica.space/news/vrm-chh-27611/>

Н. ДОЛЖЕНКО, Е. МАЙЛЯНОВА

*Азаматтық Авиация Академиясы, Алматы қаласы, Қазақстан
e-mail: nadin-air@mail.ru.*

АВИАЦИЯЛЫҚ СИМУЛЯТОРДЫҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚҰРАМЫ, ТИПТІ ФУНКЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ДАМУ БОЛАШАҒЫ

Ұшу тренажерлары сексен жылдан астам қолданылып келеді. Әуе кемесінің кабинасындағы ұшқыштың жұмысын, ұшу, ұшу, қону жағдайларын, сондай-ақ авиация мамандарын даярлау және кәсіби деңгейін қолдау бойынша диспетчер жұмысын имитациялайтын авиациялық тренажерларды әзірлеу әлемнің барлық жерінде қамтылған. Оқу кешендерін бірнеше бөліктерге бөлуге болады, олардың бірі – бағдарламалық қамтамасыз ету.

Нұсқаушының жұмыс орнының бағдарламалық қамтамасыз ету оған ұшу, ұшу және қону жағдайларының әртүрлі параметрлерін орнатуға, сондай-ақ тренажердің ішкі жүйелерін басқаруға және басқаруға мүмкіндік береді. Мақалада авиациялық тренажерларға арналған бағдарламалық қамтамасыз етудің типтік функциялары және авиациялық тренажерлар бойынша оқытуды дамыту перспективалары қарастырылады.

Түйін сөздер: *авиациялық тренажерлар, бағдарламалық қамтамасыз ету, визуализация, нұсқаушының жұмыс орны, ұшқыштарды оқыту.*

Н. ДОЛЖЕНКО, Е. МАЙЛЯНОВА

*Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан,
E-mail: nadin-air@mail.ru.*

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ, ТИПОВЫЕ ФУНКЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

Авиационные тренажеры используют уже на протяжении более чем восьмидесяти лет. Разработкой авиационных тренажеров, имитирующих работу пилота в кабине воздушного судна, условия взлета, полета, посадки, а также работу диспетчера для обучения и поддержания профессионального уровня авиационных специалистов занимаются во всем мире. Тренажерные комплексы можно разделить на несколько частей, одной из которых является программное обеспечение.

Программное обеспечение рабочего места инструктора позволяет ему задавать различные параметры условий взлета, полета и посадки, а также контролировать и управлять подсистемами тренажера. В статье рассматриваются типовые функции программного обеспечения авиационных тренажеров и перспективы развития обучения на авиационных тренажерах.

Ключевые слова: *авиационные тренажеры, программное обеспечение, визуализация, рабочее место инструктора, обучение пилотированию.*

**В. А. ЛАХНО¹, В. П. МАЛЮКОВ¹, Р. К. УСКЕНБАЕВА², Т. С. КАРТБАЕВ³,
К. О. ТОГЖАНОВА^{3*}, ДИТМАР БАЙЕР⁴**

¹Биоресурстар және табиғатты пайдалану ұлттық университеті, Украина, Киев,

²Сәтбаев университеті, Қазақстан, Алматы

³Логистика және көлік академиясы, Қазақстан, Алматы

⁴Университет прикладных наук, Германия, г.Шмалькальден

SMART CITY ЖҮЙЕЛЕРІН ДАМУҒА БАҒЫТТАЛҒАН ИНВЕСТИЦИЯЛАРДЫ ЖОҒАЛТУ ТӘУЕКЕЛДЕРІН БАҒАЛАУ

Мақалада Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау (ДЖ) барысында инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін бағалау кезінде шешім қабылдауды қолдау жүйесінің (ШҚҚЖ) есептеу ядросына арналған модель ұсынылған. Қолданыста бар шешімдерден айырмашылығы, ұсынылған модель жоғалту тәуекелдерін бағалау кезінде нақты ұсыныстар береді. Тәуекелдердің қанағаттанарлықсыз болжамы кезінде, тараптардың қолайлы қаржылық нәтижеге қол жеткізуі мақсатында инвестициялау процесінің параметрлерін икемді түзету мүмкін болады.

Нәтижелердің ғылыми жаңалығы - алғаш рет бисызықты көп сатылы ойындардың жаңа класын қолдану ұсынылды. Бұл класс Smart City жобаларына ойыншылардың қаржы ресурстарын орналастыру бойынша динамикалық жоспарлау мысалында инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін бағалау процесін барабар сипаттауға мүмкіндік береді. Қарастырылған тәсілдің ерекшелігі - бірнеше терминалды беттері бар сапалы бисызықты көп сатылы ойынды шешуге негізделген құралдарды қолдану және аралас стратегиялар класында шешілетін дәреже ойыны. Марле математикалық модельдеу пакетінде есептеу эксперименттері жүргізілді. ШҚҚЖ әзірленіп, онда тәуекелдерді бағалау моделі жүзеге асырылды. Әзірленген ШҚҚЖ Smart City ДЖ барысында инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін болжау деректерінің ашақтығын және инвестициялардан нақты қайтарымды азайтуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: инвестицияның жоғалуы; тәуекелдерді бағалау; бірнеше терминалды беті бар көп сатылы сапа ойын; дәреже ойыны; шешім қабылдауды қолдау жүйесі.

Кіріспе. Қалалық инфрақұрылымды құруға және дамытуға негіз болатын инновациялық және озық ақпараттық технологияларды (АТ) қаржылық қолдаусыз Smart City динамикалық жоспарлау мәселесінің шешімін алу мүмкін емес [1, 2].

Алайда, Smart City АТ инвестициялау динамикалық жоспарлау тапсырмаларында аналитикалық қолдауды талап етеді. Мұндай қолдау, мысалы, шешімдер қабылдауды қолдау жүйелерін (ШҚҚЖ) немесе сараптамалық жүйелерді (ЭЖ) кеңінен қолдану арқылы Smart City инфрақұрылымдық жобаларына АТ енгізудің әртүрлілігі мен күрделілігіне байланысты қаржы ресурстарын жоғалтудың көптеген тәуекелдерін болдырмауға мүмкіндік береді. Бұл бағытта Smart City-де (көлік, су және энергиямен жабдықтау қауіпсіздігі және т.б.) түрлі процестерді басқару міндеттеріне бағытталған ақпараттық жүйелерді (АЖ) және ШҚҚЖ әзірлеумен қатар, инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін бағалауға мүмкіндік беретін ШҚҚЖ-нің үлкен маңызы бар [3, 4].

Әдеттегідей, тәуекелдерді бағалаудағы инвестиция шығындарын мәселесін шешу үшін, қазірдің өзінде тексерілген тәсілдер жүгінуге тура келеді. Мұндай әдістердің

* E-mail корреспондирующего автора: e-mail: togzhanova_kuljan@mail.ru.

ішінде ойын теориясын, оңтайлы басқару әдістерін, көп өлшемді оңтайландыру әдістерін және басқаларын бөліп көрсетуге болады [3-5]. Ең тиімді тәсілдердің бірі ойын теориясының әдістерін, атап айтқанда, көп сатылы сапалы ойын әдістерін пайдалану болып табылады, олардың сұлбасы инвесторлардың (*FinR*) қаржы ресурстарын тарту кезінде АТ-ға инвестициялардың жоғалуын бағалау проблемасына жақсы сәйкес келеді [3, 5].

Көп сатылы сапалы ойындар аппаратын қолдану барлық факторларды ескере отырып, қаржылық ресурстардың жоғалу қаупін бағалауға мүмкіндік береді. Атап айтқанда, Smart City инфрақұрылымдық жобалары үшін Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау міндеттерін және тиімді АТ құруға тәсілдердің көптігін ескеру керек. Бұл, мысалы, Smart City муниципалитеттеріне АТ және АЖ инвестицияларының жоғалу қаупін бағалауды қолдана отырып, ұтымды шешімдер қабылдауға мүмкіндік беретін программалық өнімдер (ПӨ) сияқты ШҚҚЖ ойын модельдері негізінде дамуға мүмкіндік береді.

Жоғарыда айтылғандардың барлығы Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау контекстінде ақпараттық технологиялар мен жүйелерді дамытуға бағытталған инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін бағалау әдістері мен математикалық модельдерді дамыту бойынша келесі зерттеулердің өзектілігін анықтайды.

Әдебиетке шолу. [6, 7] Smart City-ді дамыту жобалары жоғары дәрежеде белгісіздікпен және тәуекелмен сипатталатыны, атап айтқанда, осындай жобаларды іске асыру барысында өзінің қаржылық ресурстарын көбейтуді күтетін инвестор үшін көрсетілген.

[8, 9] көрсетілгендей, урбанистика саласындағы ірі жобалар үшін жетістік көбінесе жүйеге әсер ететін барлық факторларды ескере отырып, сондай-ақ әр түрлі белгісіздіктер мен тәуекелдерді ескере және еңсере отырып, қалалық инфрақұрылымды дамыту стратегияларын жоспарлауға және оңтайлы таңдауға байланысты болады. Алайда, бұл жұмыстарда тәуекелдердің болуын ескеретін айнаымалылар жоқ.

[10, 11] зерттеулер Smart city-дің дамуын жоспарлау және болжау Smart City жұмыс істейтін жүйенің өзі мен сыртқы орта тудыратын әртүрлі белгісіздіктерді, сызықты емес және тәуекелдерді жеңумен байланысты екенін көрсетті. Әр түрлі типтегі белгісіздіктердің болуы, мысалы, ситуациялық белгісіздік, жүйенің және қоршаған ортаның әртүрлі параметрлерінің дәл еместігі және белгісіздігі, жүйе туралы ақпараттың жеткіліксіздігі, Smart city - де де, сыртқы ортада да жүретін процестердің сызықтық еместігі және стохастикасы, сондай-ақ тәуекелдердің көптігі - осы белгілердің барлығы Smart City инфрақұрылымының ДЖ мәселелерін шешуде әлсіз құрылымдалған және қиын формализацияланғанын көрсетеді [10].

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері. Зерттеудің мақсаты - Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау барысында инвестициялардың жоғалу тәуекелдерін бағалау барысында шешімдер қабылдауды қолдау жүйесінің есептеу ядросына арналған модельді әзірлеу.

Осы мақсатқа жету үшін келесі тапсырмаларды шешу қажет:

1) Smart City-ді дамытуды динамикалық жоспарлау барысында бірнеше терминалды беті бар көп сатылы сапалы ойындардың математикалық аппаратын пайдалану негізінде инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін бағалау үшін модель әзірлеу;

2) Maple модельдеудің математикалық пакетін қолдана отырып, есептеу эксперименттерін орындау;

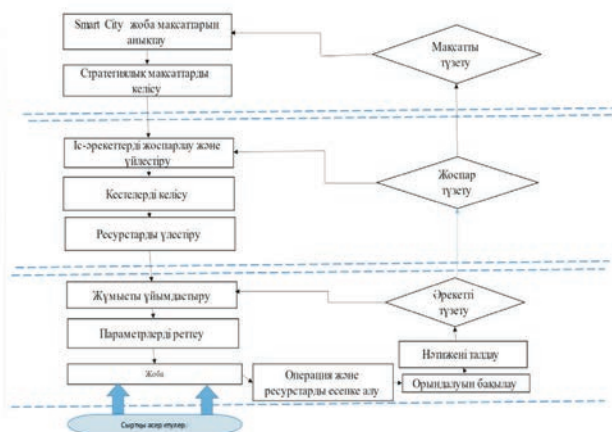
3) инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін бағалау процесінде шешімдер қабылдауды қолдау жүйесі үшін программалық модуль әзірлеу.

Мақаланың негізгі материалы. Мультипроектілі ортада Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау процесінде тәуекелдерді басқаруды жоспарлау, мониторинг және түзету әсер ету жүйелеріне біріктіретін тәуекел факторларын талдау және бейтараптандыру әдістері мен тәсілдерінің жиынтығы ретінде сипаттауға болады. Мұндай бірлестік белгілі бір дәрежеде тәуекелді оқиғалардың басталуын болжауға, сондай-ақ олардың туындауының теріс салдарын болдырмау немесе азайту жөнінде жедел шаралар қабылдауға мүмкіндік береді [1, 2].

Әдетте тәуекелдерді басқару процестерінен бұрын әртүрлі жоспарлау алгоритмдері болады. Осындай іс-әрекеттерге тәуекелдерді басқаруды қолдану және жоспарлау бойынша шешімдер қабылдау алгоритмдерін (мысалы, ШҚҚЖ қолдану арқылы) жатқызуға болады. Осындай алгоритмдер мультипроектілі ортадағы Smart City дамуын динамикалық жоспарлау кезеңінен бастап, Smart City-ге өз қаржы ресурстарын (ҚР) инвестициялауды жоспарлап отырған инвесторлар үшін тәуекелдерді бағалауға дейінгі Smart City дамытудың барлық нақты жобалары үшін қажет. Мұндай алгоритмдер тәуекелдерді бағалауды ұйымдастыру мақсатында ұтымды шешімдерді, сондай-ақ тәуекелдерді басқаруды тиімді қамтамасыз ете алатын кадрларды таңдауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ескеріледі:

- 1) бағалау әдістемесі;
- 2) тәуекелдерді анықтайтын деректер көздері;
- 3) күйді талдауға болатын уақыт аралықтары;
- 4) күйді осындай талдау жасалатын уақыт аралықтары.

Smart City-ді дамытуды серпінді жоспарлаудың ең ерте сатысында-ақ тәуекелдерді басқаруды жоспарлау маңызды. Smart City IT жобаларын дамыту процесінде жобалық қызметті басқарудың функционалды құрылымы 1-суретте көрсетілген. Атап айтқанда, барлық басқару, үйлестіру және ұйымдастыру функциялары мен әрекеттері басқару қызметінің үш деңгейінде орналасқанын атап өтеміз.



1 сурет – Smart City үшін AT жобаларын басқарудың функционалдык схемасы

Стратегиялық басқару Smart City-ді дамытудың ұзақ перспективаға арналған жобалық қызметі қызметінің негізгі бағыттары мен даму үрдістерін анықтауға бағытталған. Сондықтан жоспарлау көкжиегі үлкен, сондықтан белгісіз болашақ тәуекелдерді ескеру қажет.

Бұл жағдайда қосымша ақпарат сарапшылардан келеді және негізінен сапалы. Smart City дамыту ДЖ басқарудың осы деңгейінде тәуекелдер туындауы мүмкін, соның салдарынан оларды іске асырудан болатын жағымсыз салдарлар туындауы мүмкін (1 - кестені қараңыз). Тактикалық үйлестіру жеке жобаларды орындау мерзімдері мен кестелерін жоспарлау деңгейінде жүзеге асырылады, мысалы, АТ жобалары, сонымен қатар жеке жобалар арасында және олардың әрқайсысында қажетті ресурстарды жоспарлау және бөлу. Осы деңгейдегі басқару процесі белгілі бір тәуекелдермен бірге жүруі мүмкін (2 - кестені қараңыз).

1- кесте – Стратегиялық басқару деңгейіндегі тәуекелді жағдайлар

Тәуекелдік жағдай	Ықтимал салдары
Портфельге ұсынылатын жобаларды таңдаудың негізсіздігі.	Жобаларды орындамау немесе сапасыз орындау, материалдық, қаржылық немесе моральдық шығындар.
Жобалар портфелін қалыптастыру тиімді емес.	Ұйымның қаржылық және имидждік жағдайына теріс әсер ету, потенциалды инвесторлардың шамадан тыс сақтық танытуы немесе жобаларға қатысудан бас тарту.
Жобалар портфелін іске асыруды дұрыс емес немесе тиімсіз жоспарлау.	Ұйымның бас стратегиясынан ауытқу, потенциалды серіктестер мен инвесторлардың жобаларға қатысудан бас тартуы

Мұндай жоспарлау тәуекелдің деңгейі мен түріне, сондай-ақ Smart City-ді дамыту үшін қандай да бір жобаны іске асырудың маңыздылығына сәйкес жүзеге асырылады. Тәуекелді қабылдау мен сезінудің жүйелі тәсілі Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау тәуекелдерін тиімді басқаруды жоспарлауды жеңілдетеді. Әрбір нақты тәуекел бойынша басқару стратегиясы әзірленеді, оның ықпал ету саласы нақтыланады, тәуекелдің қолайлы шекті деңгейлері айқындалады және қабылданады, стратегиялық мақсаттар әзірленеді. Жобаның барлық қатысушыларының рөлі мен жауапкершілігі, барлық бөлімшелердің өзара әрекеті анықталады. Smart City дамытуды динамикалық жоспарлау барысында тәуекелдің нақты түрлерін бағалау және басқару әдіснамасының мерзімдері әзірленеді және ұсынылады.

2- кесте – Жобаларды тактикалық үйлестіру деңгейіндегі тәуекелді жағдайлар

Тәуекелдік жағдай	Ықтимал салдары
Орындау кестесінен ауытқу	Жобалардың уақтылы орындалмауы, материалдық, қаржылық немесе моральдық шығындар.
Барлық жобаларды тиімсіз бөлу және қажетті ресурстармен қамтамасыз ету.	Жобаларды орындамау немесе сапасыз орындау, материалдық, қаржылық немесе моральдық шығындар.

Тәуекелдерді басқару әдістемесі үнемі қайта қаралуы тиіс критерийлер мен бағалау модельдерін қамтиды. Қолда бар тәуекелдер жіктеуіштері әзірленеді немесе қабылданады. Есеп форматтары, бухгалтерлік есеп және құжаттама принциптері ұсынылады. Жұмыс кездесулері, сұхбаттар және инспекциялық іс-шаралар жоспарланады, сауалнамалар мен сауалнама парақтары әзірленеді, жобаға қатысатын басқа ұйымдардан ақпарат жиналады, ШҚТ-мен кездесулер мен талқылаулар жоспарланады.

Мақалада ұсынылған модель Smart City үшін инвесторлардың көп факторлы және таңдау альтернативаларының көптігі жағдайында қаржыландыру процесінің тәуекелдерін талдауға негізделген.

Модель [3, 5] жұмыстардың жалғасы болып табылады және бірнеше терминалды беттері бар көп сатылы сапалы ойын шешімінің нәтижелерін қолдана отырып, көп сатылы дәреже ойынының шешіміне негізделген. Тапсырма көп сатылы ойын үшін стандартты дәрежеде қарастырылған.

Көп өлшемді кеңістікте динамикалық жүйе бар, оны екі ойыншы (инвестор, бұдан әрі – инвестор 1 (*Inv1*) және инвестор 2 (*Inv2*)) басқарады. Жүйе тәуелді қозғалыстары бар бисызықты көп сатылы теңдеулер жүйесімен берілген.

$$h(t+1) = B_1 \times h^+(t) + [(A_1 + R_1) - E] \times U(t) \times B_1 \times h^+(t) - [(A_2 + R_2) - E] \times V(t) \times B_2 \times f^+(t); \quad (1)$$

$$f(t+1) = B_2 \times f^+(t) + [(A_2 + R_2) - E] \times V(t) \times B_2 \times f^+(t) - [(A_1 + R_1) - E] \times U(t) \times B_1 \times h^+(t); \quad (2)$$

$$\text{Мұндағы } t = 0, 1, \dots, T; \quad x^+ = \begin{cases} x, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad x \in R; \quad T - \text{натурал сан};$$

$h(t) \in R^n, f(t) \in R^n, U(t), V(t)$ – n оң элементтері бар квадрат матрицалар:

$$u_i(t), v_i(t) \in [u_i^*, \dots, u_k^*] \times [v_1^*, \dots, v_M^*], \quad u_l^* \in [0, 1], l = 1, \dots, n; v_l^* \in [0, 1], l = 1, \dots, n;$$

K, M – сәйкесінше $U(t), V(t)$ диагональды матрицалардың диагональдарындағы натурал сандар;

B_1, B_2 – *Inv1* және *Inv2* қаржылық ресурстарды түрлендіру матрицалары (ҚР) және оларды Smart City үшін АТ-да сәтті іске асыру кезінде, тиісінше g_1^{ij}, g_2^{ij} оң элементтері бар тәртіптің шаршы матрицалары болып табылады

A_1, R_1 – қаржылық инвестициялар үшін *Inv2* пайыздық төлемді *Inv1* және инвестицияларға қатысты инвестицияларды *Inv2* қайтару үлесін сипаттайтын оң элементтері бар диагональды матрицалар ;

A_2, R_2 – қаржылық инвестициялар үшін *Inv2* пайыздық төлемді *Inv1* және инвестицияларға қатысты *Inv1* инвестицияларды қайтару үлесін сипаттайтын оң элементтері бар диагональды матрицалар ;

E – бірлік матрицасы.

$T(t = 0, 1, \dots, T)$ инвестициялау уақыты, T – натурал сан; $K(\cdot)$: инвесторларды ұтып алу функциясы беріледі $K(h(T), f(T)) = \{1, h(T) \geq 0, \exists i: f_i(T) < 0; \{-1, f(T) \geq 0, \exists i: h_i(T) < 0; \{0, \text{басқа жағдайларда};$

Стратегиялар (U) мен (V) ойыншылардың көптеген мағыналары анықталған:

$$U = [u_1^*, \dots, u_K^*], u_l^* \in [0, 1], \quad l = 1, \dots, n;$$

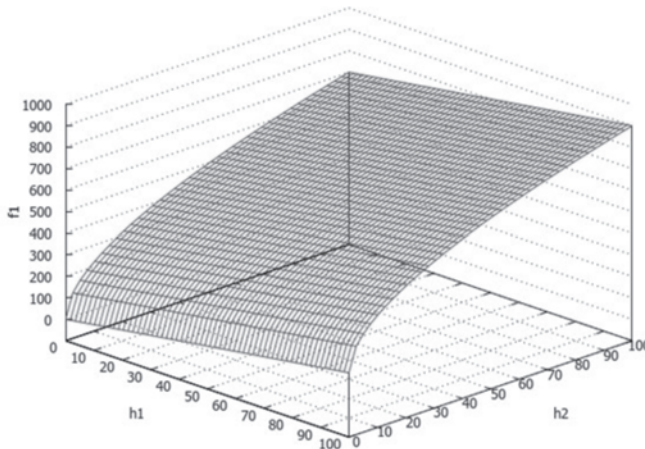
$$V = [v_1^*, \dots, v_K^*], v_l^* \in [0, 1], \quad l = 1, \dots, n;$$

Бірінші ойыншының мақсаты (бұдан әрі $Inv1$) ҚР сипаттайтын ұтыс функциясын барынша арттыру ол Smart City-ді дамытуға динамикалық түрде инвестициялау жоспарлануда.

Екінші ойыншының мақсаты $-Inv2$ ұтыс функциясын азайту. Мұндай тапсырмалар қойылымында $Inv1$ шешім қабылдаушы тұлғаның өкілі (ШҚТ 1) ретінде, мысалы, Smart City-ді дамытудың жалпы жобаларының бір бөлігіне (екі инвестор үшін де) қаржы ресурсын салатын инвестордың өкілі ретінде түсіндіріледі. Содан кейін 2 немесе $Inv2$ ойыншы Smart City дамыту жобаларының жалпы (екі инвестор үшін) бөлігіне қаржы ресурстарын салатын басқа шешім қабылдаушының (ШҚТ 2) өкілі ретінде түсіндіріледі.

Ұтымды ойыншылар стратегиясын және Smart City дамыту жобаларына инвестициялау кезінде қаржылық ресурстарды жоғалтумен байланысты тәуекелдерді табамыз.

Ықтимал қауіптердің көптеген жағымсыз болжамдары 2 - суретте келтірілген.



2-сурет – ықтимал қауіптердің көптеген жағымсыз болжамдары

Шешім. Ақылды қала дамуын динамикалық жоспарлау барысында инвестициялық шығындар тәуекелдерін бағалау үшін шешімдерді қолдау жүйесінің (ШҚҚЖ) есептеу ядросының моделі ұсынылған. Қолданыстағы шешімдерден айырмашылығы, ұсынылған модель бірнеше сатылы ойындар мен сапалы ойындардың математикалық аппараттарын пайдалануға негізделген Smart City дамуын динамикалық жоспарлау кезінде инвестициялардың жоғалту тәуекелдерін бағалау кезінде нақты ұсыныстар береді. Тәуекелдердің қанағаттанарлықсыз болжамы болған жағдайда, тараптар қолайлы қаржылық нәтижеге қол жеткізу үшін инвестициялық процестің параметрлерін икемді түрде түзетуге болады.

Мақалада алынған нәтижелердің ғылыми жаңалығы: бірінші сатыда көп сатылы ойындардың жаңа класын қолдану ұсынылды. Бұл класс Smart City жобаларында ойыншылардың қаржылық ресурстарын орналастыруды динамикалық жоспарлау мысалын қолдана отырып, инвестициялық шығындар тәуекелдерін бағалау процесін адекватты сипаттауға мүмкіндік берді.

Қарастырылып отырған тәсілдің айрықша ерекшелігі - бірнеше терминалды беттері бар екі деңгейлі біліністі көп сатылы ойынды және аралас стратегиялар класында шешілген дәреже ойынын шешуге негізделген инструменталды қолдану болып табылады. Есептеу эксперименттері Maple математикалық модельдеу пакетін қолданып өткізілді,

Алынған нәтижелердің практикалық маңыздылығы ШҚҚЖ әзірленгендігінде. ШҚҚЖ тәуекелдерді бағалау моделін көп сатылы ойындар теориясының әдістерін қолдануға негізделген. Әзірленген ШҚҚЖ Smart City дамуын және инвестициялардың нақты кірісін динамикалық жоспарлау кезінде инвестицияларды жоғалту тәуекелдерін болжау туралы мәліметтер арасындағы сәйкессіздікті азайтуға мүмкіндік береді.

ӘДЕБИЕТ

1 Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives // *Journal of Urban Technology*. – 2015. – 22(1), P. 3–21.

2 Angelidou, M. Smart cities: A conjuncture of four forces. // *Cities* – 2015. – 47. P. 95–106.

3 Akhmetov, B., Balgabayeva, L., Lakhno, V., Malyukov, V., Alenova, R., Tashimova, A., Mobile platform for decision support system during mutual continuous investment in technology for smart city // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2019. – 199, P. 731–742. (in Russ).

4 Schleicher, J. M., Vögler, M., Inzinger, C., Fritz, S., Ziegler, M., Kaufmann, T., & Dustdar, S. A holistic, interdisciplinary decision support system for sustainable smart city design. In *International Conference on Smart Cities* // Springer, Cham. – 2019. – P. 1–10.

5 Akhmetov, B., Lakhno, V., Malyukov, V., Sarsimbayeva, S., Zhumadilova, M., & Kartbayev, T. Decision support system about investments in Smart City in conditions of incomplete information. // *International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET)*. – 2019. – 10(2), P. 661–670. (in Russ).

6 Paroutis, S., Bennett, M., & Heracleous, L. A strategic view on smart city technology: The case of IBM Smarter Cities during a recession. // *Technological Forecasting and Social Change* / – 2014. – 89, P. 262–272.

7 Irani, Z., Sharif, A., Kamal, M. M., & Love, P. E. Visualising a knowledge mapping of information systems investment evaluation. // *Expert Systems with Applications*. – 2014. – 41(1), P. 105–125.

8 Lee, S. H., Yigitcanlar, T., Han, J. H., & Leem, Y. T. Ubiquitous urban infrastructure: Infrastructure planning and development in Korea. // *Innovation*. – 2008. – 10(2-3), P. 282-292.

9 Malekpour, S., Brown, R. R., & de Haan, F. J. Strategic planning of urban infrastructure for environmental sustainability. // *Understanding the past to intervene for the future. Cities*. - 2014. - 46, P. 67–75.

10 Hastak, M., & Baim, E. J. (2001). Risk factors affecting management and maintenance cost of urban infrastructure. // *Journal of Infrastructure Systems*, – 2001. – 7(2) P. 67–76.

11 Jabareen, Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. // *Cities*, – 2013 – 31, P. 220–229.

**В. А. ЛАХНО¹, В. П. МАЛЮКОВ¹, Р. К. УСКЕНБАЕВА², Т. С. КАРТБАЕВ³,
К. О. ТОГЖАНОВА³, ДИТМАР БАЙЕР⁴**

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования, Украина, Киев

²Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

³Академия логистики и транспорта, Казахстан, Алматы

⁴Университет прикладных наук, Германия, г.Шмалькальден

ОЦЕНКА РИСКОВ ПОТЕРИ ИНВЕСТИЦИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА РАЗВИТИЕ СИСТЕМ SMART CITY

В статье предложена модель для вычислительного ядра системы поддержки принятия решений (СППР) при оценке рисков потери инвестиций в ходе динамического планирования (ДП) развития Smart City. В отличие от существующих решений, предложенная модель дает конкретные рекомендации при оценке рисков потери. При неудовлетворительном прогнозе рисков возможна гибкая корректировка параметров процесса инвестирования с целью достижения сторонами приемлемого финансового результата.

Научная новизна результатов состоит в том, что впервые предложено применить новый класс билинейных многошаговых игр. Данный класс позволил адекватно описать процесс оценивания рисков потери инвестиций, на примере динамического планирования по размещению финансовых ресурсов игроков в проектах Smart City. Отличительной особенностью рассмотренного подхода является использование инструментария, основанного на решении билинейной многошаговой игры как качества с несколькими терминальными поверхностями, так и игры степени, решаемой в классе смешанных стратегий. Проведены вычислительные эксперименты в пакете математического моделирования Maple. Разработана СППР в которой реализована модель оценивания рисков. Разработанная СППР позволяет уменьшить расхождения данных прогнозирования рисков потери инвестиций в ходе ДП Smart City и реальной отдачи от инвестиций.

Ключевые слова: потеря инвестиций; оценка рисков, многошаговая игра качества с несколькими терминальными поверхностями; игра степени; система поддержки принятия решений.

**V. A. LAKHNO¹, V. P. MALYUKOV¹, R. K. USKENBAYEVA², T. S. KARTBAYEV³,
K. O. TOGZHANOVA³, DIETMAR BAYER⁴**

¹National University of Bioresources and Environmental Management, Ukraine, Kiev

²Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

³Academy of Logistics and Transport, Kazakhstan, Almaty

⁴University of Applied Sciences, Germany, Schmalkalden

ASSESSMENT OF THE RISKS OF LOSING INVESTMENTS AIMED AT THE DEVELOPMENT OF SMART CITY SYSTEMS

The article proposes a model for the computational core of the decision support system (DSS) in assessing the risks of investment loss during the dynamic planning (DP) of Smart City development. In contrast to the existing solutions, the proposed model provides specific recommendations when assessing the risks of loss. In case of an unsatisfactory risk forecast, it is possible to flexibly adjust the parameters of the investment process in order for the parties to achieve an acceptable financial result.

The scientific novelty of the results is that for the first time it is proposed to apply a new class of bilinear multistep games. This class allowed us to adequately describe the process of assessing the risks of investment loss, using the example of dynamic planning for the placement of financial resources of players in Smart City projects. A distinctive feature of the considered approach is the use of tools based on the solution of a bilinear multistep game of both quality with several terminal surfaces, and a game of degree solved in the class of mixed strategies. Computational experiments were carried out in the Maple mathematical modeling package, and a DSS was developed in which a risk assessment model was implemented. The developed DSS allows to reduce the discrepancies between the data for predicting the risks of investment loss during the Smart City DP and the real return on investment.

Keywords: investment loss; risk assessment; multi-step quality game with multiple terminal surfaces; degree game; decision support system.

*А. А. МУХАНБЕТ, Е. С. НУРАХОВ, Б. С. ДАРИБАЕВ**

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЧИСЕЛ, ПОСТРОЕННОГО С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ, НА ПАНЕЛИ BASYS3 FPGA

В последние годы были представлены некоторые полевые программируемые клапаные матрицы (FPGA) на основе ускорителей фазы выпуска CNN. FPGA широко используются в портативных устройствах. Они могут быть запрограммированы для достижения более высокого параллелизма и обеспечения лучшей производительности. Энергопотребление FPGA ниже, чем у графических процессоров с одинаковой рабочей нагрузкой. Эти причины делают FPGA подходящим для реализации фазы выпуска CNN. Они могут обеспечить относительную производительность на выходе для графических процессоров и достичь низкого энергопотребления, что очень важно для портативных устройств. Для эффективной реализации фазы выхода CNN на FPGA конструкция должна иметь высокий параллелизм, а используемые аппаратные ресурсы должны быть сведены к минимуму, чтобы уменьшить площадь и энергопотребление. В процессе работы с помощью нейронной сети реализуется алгоритм распознавания рукописных чисел. Для реализации нейронной сети на аппаратном уровне создается специальная архитектура. Производительность во время работы и энергопотребления сопоставима с производительностью процессора и графического процессора.

Ключевые слова: *FPGA, нейронная сеть, машинное обучение, архитектура, память.*

Введение. Машинное обучение и компьютерное зрение долгое время были одним из самых популярных направлений исследований. Он включает в себя такие приложения, как классификация изображений, медицинская диагностика, распознавание лиц и т.д.

Ключ к этой технологии заключается в том, как извлечь важные особенности изображений. Сверточные нейронные сети (CNN) высоко ценятся за эту работу. CNN автоматически генерирует важные функции и в то же время эффективно устраняет тривиальные функции, тем самым уменьшая вычислительную мощность.

Обучение модели CNN требует больших вычислительных мощностей и обычно занимает много времени. Поэтому большинство CNN работают на центральных процессорах (CPU) и GPU. GPU соответствует CNN со своей структурой Simple Instruction Multiple Data (SIMD) и параллельной вычислительной мощностью. Хотя GPU доминирует на рынке приложений CNN, их недостатки очевидны: GPU стоит дорого, потребляет много энергии и обладает низкой выносливостью. Спрос на использование CNNs в портативных устройствах во многих случаях увеличивается. Для портативного устройства, такого как Смартфон, самое важное, что нужно учитывать при проектировании, - это стоимость, мощность и производительность. Поэтому при разработке портативного устройства для запуска CNN необходимо найти более энергоэффективный метод, чем GPU, и обеспечить относительную производительность.

* E-mail корреспондирующего автора: beimbet.daribaev@gmail.com

При создании нейронных сетей на основе FPGA достигается минимальный расход энергии и приемлемая скорость, что является актуальной проблемой. По сравнению с внедрением программного обеспечения, аппаратные средства на основе FPGA могут быть легко масштабированы для работы с векторами большой длины без снижения скорости работы, что делает реализацию программного обеспечения сложной задачей. Реализация таких нейронных сетей на основе FPGA.

Задачи исследования. Для достижения этой цели в рамках работы были сформулированы следующие задачи:

- Разработка архитектуры нейронной сети, позволяющей эффективно реализовать нейронную сеть;
- Внедрение модулей, необходимых для запуска обученной нейронной сети в FPGA;
- Проверка и тестирование производительности запущенной сети.

Архитектура нейронной сети. Входным сигналом CNN является изображение RGB. Изображение состоит из фильтра, состоящего из трех каналов. Каждый канал изображения когулируется соответствующим фильтрующим каналом. Результаты суммирования всех трех каналов суммируются, чтобы получить новое изображение, называемое картой объектов, поскольку оно содержит некоторые особенности исходного изображения. Затем размер карты этого объекта уменьшается до 4×4 . Значения новой карты объектов используются в качестве входов полностью подключенного слоя. Следующие разделы подробно описывают каждый слой CNN. На рис. 1 показана архитектура нейронной сети для обработки изображений.

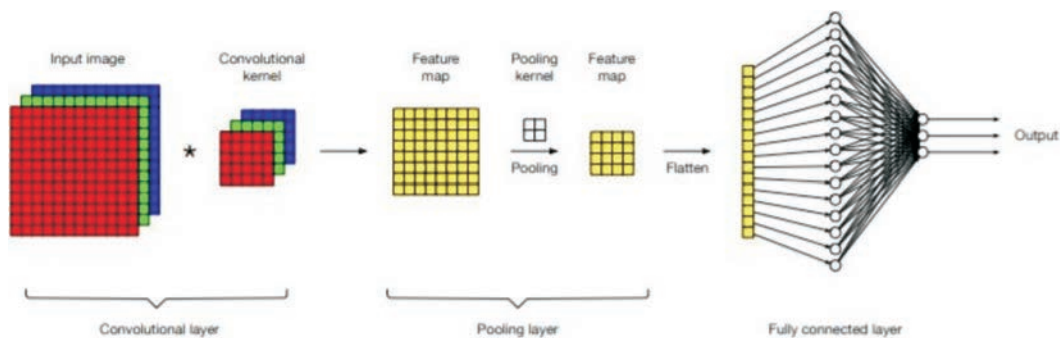


Рисунок 1 – Архитектура нейронной сети для обработки изображений

Реализация алгоритма распознавания чисел. MNIST – это рукописная база чисел, широко используемая в машинном обучении. Она содержит 70 000 изображений в оттенках серого 28×28 , 60 000 изображений для учебного набора и 10 000 изображений для тестового набора. Перед началом чтения используется случайная обрезка изображений в учебном наборе. Это называется умножением данных и используется для увеличения количества шаблонов обучения, предотвращения переучивания и повышения производительности в зависимости от общего характера сети.

Задача состоит в том, чтобы классифицировать заданное изображение рукописной цифры на один из 10 классов, который отображает целые значения от 0 до 9. Число

должно быть разделено на классы соответственно. После деления чисел на классы необходимо дать имена соответственно. Разделим его, соответственно, на label. После того, как вы получили нужную базу данных, в том числе некорректные цифры типа. Эти цифры играют важную роль при обучении базам данных.

После того, как вы собрали базу данных, вам нужно создать нейронную сеть для ее обучения. Затем необходимо определить модель нейронной сети.

Сверточные нейронные сети более сложны, чем стандартные многослойные перцептроны, поэтому для достижения современных результатов целесообразно начать с простой структуры, которая использует все элементы. На этот раз большая архитектура CNN определяется большими сверточными, максимальными уровнями агрегации и полностью связанными слоями.

Алгоритм. Алгоритмы могут быть определены следующим образом, чтобы увидеть, какие шаги предпринимает сеть при распознавании цифр:

- Разделение изображения на маленькие отрезки изображения, аналогично скользящему окну; скользящее окно может быть пропущено по всему большому изображению, и каждый результат сохраняется как отдельное изображение, меньший отрезок изображения;
- Передача каждой маленькой пластинки в меньшую нейронную сеть-настройки редко можно инициализировать с одинаковыми значениями, а если нет, то эту часть можно пометить как интересную;
- Сохранение результатов в новом массиве для каждой мини-платы-версия не может потерять индекс файла. Поэтому результаты должны быть размещены на сетке в порядке исходного изображения;
- Более низкая выборка – меньшая выборка с максимальным масштабированием используется для уменьшения размера нового массива.

Архитектуру нейронной сети для распознавания изображений можно увидеть на рисунке 5.

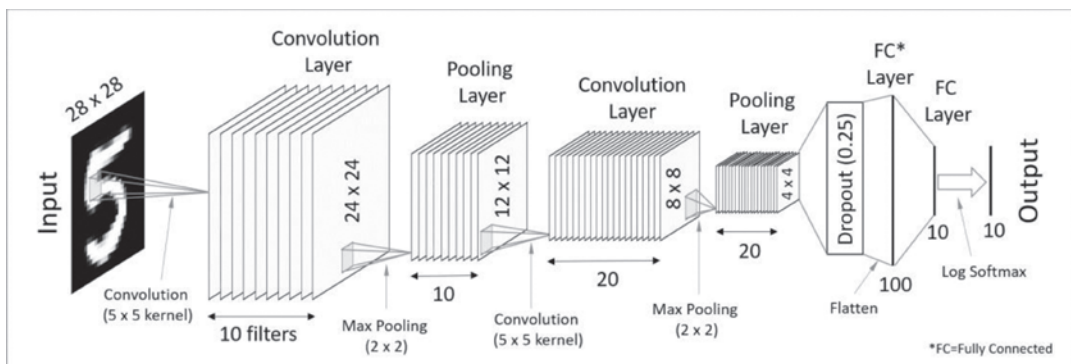


Рисунок 2 – Архитектура нейронной сети

Реализация модели нейронной сети на плате FPGA. В ходе работы используется Xilinx Artix-7 Basys 3 FPGA – плата разработки первого уровня, разработанная специально для Vivado Design Suite, отличающаяся архитектурой FPGA.

Среда программирования Vivado использовалась для создания общей архитектуры FPGA. С помощью модуля Clock и VGA-генераторов была разработана схема.

Поскольку масштаб этой работы-обработки изображения означает, что изображение должно храниться в памяти чипа. В данной работе рассмотрен верхний модуль vhd, использующий блочный генератор памяти для создания однопортового ПЗУ шириной 8 бит и глубиной 28x28 пикселей. На работе файлы формата сое передаются в виде файла изображения и должны быть загружены в генератор ядра IP при создании ПЗУ. При отслеживании адресных битов пиксели удаляются из ПЗУ один за другим. Затем эти байты отправляются в другой файл VHD, который отвечает за хранение этих байтов вместе с обработанными байтами пикселей в отдельном FIFO. После заполнения FIFO данные отображаются на экране, и программа перезапускается с адресом ПЗУ 0.

Для минимизации использования аппаратных средств и памяти FPGA в этой работе используются точечные знаковые числа, отмеченные для отображения параметров сети. Между всеми параметрами в этой сети -1 и 1, соответственно, в арифметике с фиксированной точкой не требуется целое число. При проектировании наиболее важным битом параметра (MSB) является бит, в то время как остальные биты относятся к дробной части. Чтобы увидеть влияние длины слова на производительность оборудования, вы можете использовать разные длины слов и сравнить их производительность.

Аппаратное проектирование. Для реализации в FPGA созданной нейронной сети необходимо разработать необходимую архитектуру. Его можно увидеть на рисунке 3.

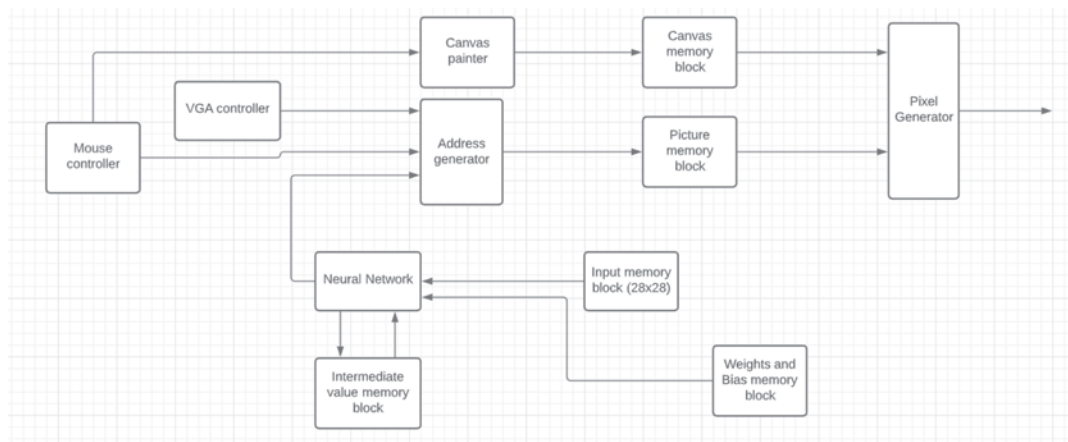


Рисунок 3 – Архитектура распознавания чисел в FPGA

Вход в систему-24x24 изображения в оттенках серого. Пиксели читаются в строках, и каждый час читается в одном пикселе. После расчета каждого изображения время работы системы составляет 104 часа. Это время работы необходимо для обеспечения правильного выхода системы.

Canvas Painter-это FSM, который определяет, когда, где и что рисовать на холсте на основе мыши. Исходное состояние очевидно, поэтому полотно очищается нажатием кнопки сброса.

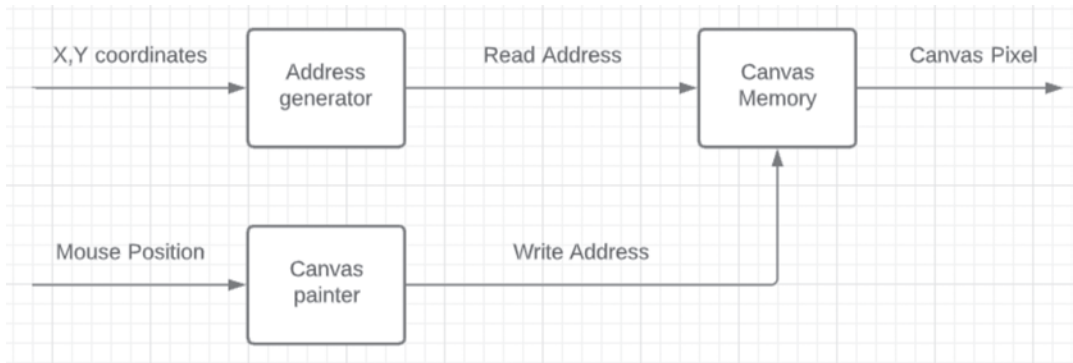


Рисунок 4 – Сохранение Canvas Painter в памяти

- Canvas – это блок памяти 56x56.
- Canvas_mem_addr_gen выводит текущий адрес памяти с учетом сигнала VGA x-Y.
- CanvasPainter также взаимодействует с памятью. Он определяет, когда, где и что он будет строить с помощью FSM.

Хотя нейронная сеть намного меньше, чем исходная CNN, памяти будет недостаточно, если для поддержания веса будет использоваться 32-битный float. В этом случае фиксированная точка не является полностью оптимальной, поэтому вам придется реализовать динамическую фиксированную точку. Это похоже на фиксированную точку, но сохраняет общий показатель каждого слоя нейронной сети. Таким образом, все веса могут быть уменьшены с 32-битного поплавка до 8-битного целого, не оказывая большого влияния на точность.

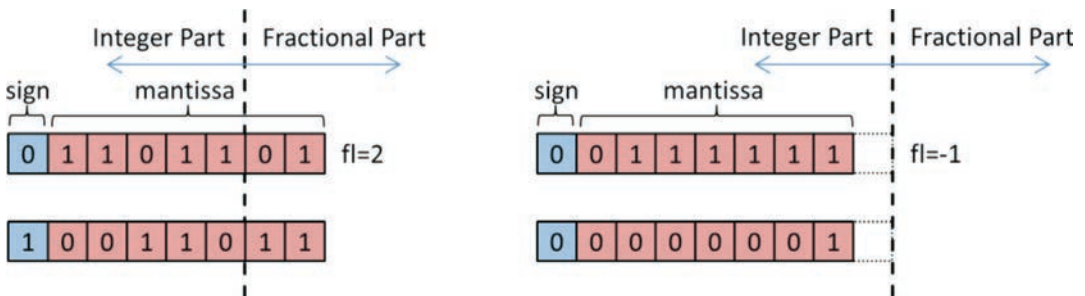


Рисунок 5 – Вычитание на 8-битное число

Программная модель реализована на процессоре (Intel Core i7-10750h, 2,60 ГГц) и GPU (NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti). Аппаратная структура реализована на Xilinx Basys3 FPGA. Проверяется как программное обеспечение, так и аппаратное обеспечение. Результаты теста приведены в этой главе. FPGA работает на частоте 100 МГц.

Максимальная частота, с которой может работать FPGA (Fmax) составляет 102,3 МГц.

Плата FPGA Basys 3 подключена к монитору и мыши. Перед началом процесса распознавания на правой крышке монитора отображается цифра 1. Тот же номер 1 также отображается на панели Basys 3. Это говорит о том, что пока не распознано ни одно число.



Рисунок 6 – Процесс распознавания чисел на панели Basys 3

Результаты исследования. Процессор потребляет максимальную мощность для запуска программной модели, GPU потребляет меньше энергии, чем процессор. FPGA потребляет самую низкую мощность, что составляет 16,5% центрального процессора и 18,3% графического процессора. На рис. 4.4 показано энергопотребление и пропускная способность процессора, GPU и FPGA. FPGA имеет самую высокую пропускную способность, но использует самую низкую мощность. Поэтому реализация FPGA имеет лучшую эффективность. Энергоэффективность рассчитывается как количество операций в секунду для одного ватта.

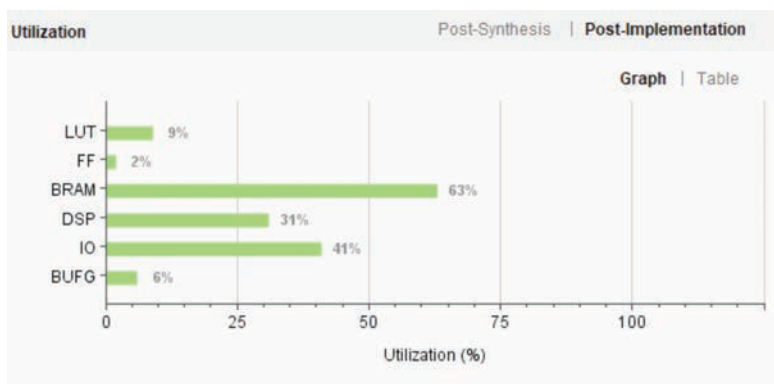


Рисунок 7 – Использованный размер памяти FPGA

На рис.13 показан использованный объем памяти FPGA. Поскольку Плата не имеет большой памяти, нет возможности обучать большие объемы данных.

Кроме того, графическое количество потребляемой мощности и производительности при обработке изображений на панели FPGA Basys 3 можно увидеть на рисунке 8.

Power	
Total On-Chip Power:	0.153 W
Junction Temperature:	25,8 °C
Thermal Margin:	59,2 °C (11,8 W)
Effective θ_{JA} :	5,0 °C/W
Power supplied to off-chip devices:	0 W
Confidence level:	Low
Implemented Power Report	

Рисунок 8 – Количество энергии и температуры, использованных в FPGA

Реализация FPGA имеет самую высокую пропускную способность, примерно на 25% лучше, чем процессор, и на 30% лучше, чем графический процессор. Сравнивая приведенные ниже показатели, видно, что плата FPGA Basys3 работает быстрее во времени, чем CPU и GPU. Кроме того, вы можете видеть, что он использует меньше энергии, чем CPU и GPU.

Көрсеткіштер\Құралдар	CPU	GPU	FPGA
Тану уақыты	92 мс	85 мс	1 мс
Энергия тиімділігі	0.9 W	0.9 W	0.153 W

Рисунок 9 – Показатели устройств по времени и энергии

Производительность FPGA во время выполнения намного лучше, чем у CPU и GPU, что не соответствует плану, о котором вы думали изначально. Ожидаемый графический процессор дает лучшее соотношение производительности по времени выполнения. Графический процессор имеет высокую мощность параллельной обработки и подходит для выполнения фазы вывода CNN. В большинстве исследований GPU имеет лучшую производительность во время выполнения. Однако в этой работе FPGA значительно превосходит CPU и GPU. Сеть в этой работе относительно невелика. Входные изображения составляли только 28×28 размеров. Главное, чтобы были получены изображения в оттенках серого с только одним цветовым каналом. Этот раздел показал, что для относительно небольшого CNN, аналогичного этой работе,

сеть, реализованная в FPGA, работает намного лучше, чем процессор и графический процессор, чем производительность рабочей среды.

Заключение. В данной работе распознавание чисел с помощью CNN осуществлялось на Xilinx Basys 3 FPGA. Та же модель CNN была реализована на CPU и GPU. Производительность процессора, графического процессора и FPGA и скорость времени сравниваются. FPGA осуществляется через конвейер для увеличения пропускной способности. Фиксированная арифметика точек используется для уменьшения использования аппаратных средств. Для достижения цели данной работы в рамках работы были выполнены следующие задачи. То есть в FPGA реализовывалась нейронная сеть, а распознавание чисел производилось с помощью нейронной сети. Сравнивали время на CPU, GPU и FPGA. Проверили работоспособность запущенной сети. CNN предназначен для распознавания чисел. Этот вход CNN представляет собой изображение одной цифры. CNN делает вывод о том, какой номер на этом изображении. Производительность и энергопотребление FPGA сопоставимы с производительностью процессора и графического процессора. Результаты показывают, что реализация FPGA эффективна с точки зрения времени выполнения, энергопотребления и энергоэффективности.

Благодарности. Работа финансируется грантом Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан по проекту № AP09563558.

ЛИТЕРАТУРА

1 J.H.Anderson and F.N.Najm, «Power-Aware Technology Mapping for LUT-based FPGAs,» Proceeding of Field-Programmable Technology Conference, Hong Kong, 2002, pp. 211 - 218.

2 S. Hauck and A.DeHon, “Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA Based Computation”. Morgan Kaufmann, 2007.

3 Xiong Q, Herbordt MC. “Bonded Force Computations on FPGAs. In: Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)”, 2017 IEEE 25th Annual International Symposium On. Piscataway: IEEE: 2017. p. 72–75.

4 Ф. Миллетари, Н. Наваб, С. Ахмади. V-net полные судорожные нейронные сети для объемной сегментации медицинских изображений. IV Международная конференция по 3D-просмотру. IEEE. 2016, с. 565-571.

5 А. К. Джейн и С. З. Ли. Справочник по распознаванию лиц. Springer, 2011.

6 Ч. Чжан, П. Ли, Г. Сун, И. Гуан, Б. Сяо, Д. Цун. Оптимизация конструкции ускорителя на основе FPGA для глубоких конвульсивных нейронных сетей. Труды международного симпозиума ACM/SIGDA 2015 года по полевым программируемым сеткам клапанов. ACM., 2015, с. 161-170.

7 T.Cheng, P.Wen, and Y.Li, “Research status of artificial neural network and its application assumption in aviation,” in 2016 12th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Dec 2016, pp. 407–410.

8 К. Овчаров, О. Рувас, Ч. Е. Ким, Д. Фаэрс, К. Штраус, Э. С. Чанг. Ускорение глубоких судорожных нейронных сетей с использованием специализированного оборудования. Microsoft Research Whitepaper 2.11, 2015, 1 - 46.

9 Ц. Цю, Ц. Ван, С. Яо, К. Го, Б. Ли, Э. Чжоу, Ц. Юй, Т. Тан, Н. Сюй, С. Сун. Глубокое знакомство с платформой FPGA для судорожной нейронной сети». Труды международного симпозиума ACM/SIGDA 2016 года по полевым программируемым сеткам клапанов. ACM. 2016, с. 26-35.

10 В. Чандра, Г. Дасика, А. Моханти, Ю. Ма, С. Влудхула, Д. Сео, Ю. Цао. Ускоритель FPGA с оптимизированной пропускной способностью на основе OpenCL для крупномасштабных конвульсивных нейронных сетей. Труды международного симпозиума ACM/SIGDA 2016 года по полевым программируемым сеткам клапанов. ACM. 2016, с. 16-25.

11 P.Bezak, Y.R.Nikitin, and P.Bozek. "Robotic grasping system using convolutional neural networks," American Journal of Mechanical Engineering, vol. 2, no. 7, Oct 2014, pp. 216–218.

12 Р. Чжао, В. Сун, В. Чжан, Т. Син, Ч. Х. Лин, М. Шривастава, Р. Гупта, Ч. Чжан. Ускорение бинарных нервных сетей в программируемом FPGA. Труды международного симпозиума ACM/SIGDA 2017 года по полевым программируемым сеткам клапанов. ACM. 2017, с. 15-24.

13 J. Lecun, L. Bottu, J. Bengio, P. Haffner. In: Proceedings of the IEEE 86.11, 1998, 2278-2324p.

14 Т. Ван, Ч. Ван, С. Чжоу, Х. Чен. Обзор ускорителей глубокого обучения на основе FPGA: проблемы и возможности. arXiv: 1901.04988, 2018.

15 К. Пауэлс, М. Томази, Х. Д. Алонсо, Э. Росс, М. М. Ван Халле. Сравнение FPGA и GPU для функций фазового оптического потока, стерео и локального изображения в реальном времени. IEEE Transactions on Computers 61.7, 2012.

REFERENCES

1 J.H.Anderson and F.N.Najm, "Power-Aware Technology Mapping for LUT-based FPGAs," Proceeding of Field-Programmable Technology Conference, Hong Kong, 2002, pp. 211 - 218.

2 S. Hauck and A.DeHon, "Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA Based Computation". Morgan Kaufmann, 2007.

3 Xiong Q, Herbordt MC. "Bonded Force Computations on FPGAs. In: Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)", 2017 IEEE 25th Annual International Symposium On. Piscataway: IEEE: 2017. p. 72–75.

4 F. Milletari, N. Navab, S. Ahmadi. V-net polnye sudorozhnye nejronnye seti dlya ob'emnoj segmentacii medicinskih izobrazhenij. IV Mezhdunarodnaya konferenciya po 3D-prosmotru. IEEE. 2016, s. 565-571.

5 A. K. Dzejn i S. Z. Li. Spravochnik po raspoznavaniyu lic. Springer, 2011.

6 CH. CHzhan, P. Li, G. Sun, I. Guan, B. Syao, D. Cun. Optimizaciya konstrukcii uskoritelya na osnove FPGA dlya glubokih konvul'sivnyh nejronnyh setej. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma ACM/SIGDA 2015 goda po polevym programmiruemyim setkam klapanov. ACM., 2015, s. 161-170.

7 T.Cheng, P.Wen, and Y.Li, "Research status of artificial neural network and its application assumption in aviation," in 2016 12th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Dec 2016, pp. 407–410.

8 K. Ovcharov, O. Ruvas, CH. E. Kim, D. Faers, K. SHtraus, E. S. CHang. Uskorenie glubokih sudorozhnyh nejronnyh setej s ispol'zovaniem specializirovannogo oborudovaniya. Microsoft Research Whitepaper 2.11, 2015, 1 - 4b.

9 C. Cyu, C. Van, S. YAO, K. Go, B. Li, E. CHzhou, C. YUj, T. Tan, N. Syuj, S. Sun. Glubokoe znakomstvo s platformoj FPGA dlya sudorozhnoj nejronnoj seti». Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma ACM/SIGDA 2016 goda po polevym programmiruemyim setkam klapanov. ACM. 2016, s. 26-35.

10 V. CHandra, G. Dasika, A. Mohanti, YU. Ma, S. Vludhula, D. Seo, YU. Cao. Uskoritel' FPGA s optimizirovannoj propusknnoj sposobnost'yu na osnove OpenCL dlya krupnomasshtabnyh konvul'sivnyh nejronnyh setej. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma ACM/SIGDA 2016 goda po polevym programmiruemyim setkam klapanov. ACM. 2016, s. 16-25.

11 P. Bezak, Y. R. Nikitin, and P. Bozek. "Robotic grasping system using convolutional neural networks," American Journal of Mechanical Engineering, vol. 2, no. 7, Oct 2014, pp. 216–218.

12 R. CHzhao, V. Sun, V. CHzhan, T. Sin, CH. H. Lin, M. SHrivastava, R. Gupta, CH. CHzhan. Uskorenie binarnykh nervnykh setej v programmiruemom FPGA. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma ACM/SIGDA 2017 goda po polevym programmiruemym setkam klapanov. ACM. 2017, s. 15–24.

13 J. Lecun, L. Bottu, J. Bengio, P. Haffner. In: Proceedings of the IEEE 86.11, 1998, 2278–2324p.

14 T. Van, CH. Van, S. CHzhou, H. CHen. Obzor uskoritelej glubokogo obucheniya na osnove FPGA: problemy i vozmozhnosti. arXiv: 1901.04988, 2018.

15 K. Pauels, M. Tomazi, H. D. Alonso, E. Ross, M. M. Van Halle. Sravnenie FPGA i GPU dlya funktsij fazovogo opticheskogo potoka, stereo i lokal'nogo izobrazheniya v real'nom vremeni. IEEE Transactions on Computers 61.7, 2012.

A. A. МУХАНБЕТ, Е. С. НУРАХОВ, Б. С. ДАРИБАЕВ

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

BASYS3 FPGA ПАНЕЛІНДЕ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІ АРҚЫЛЫ ҚҰРЫЛҒАН САНДАРДЫ ТАҢУ АЛГОРИТМІН ІСКЕ АСЫРУ

Соңғы жылдары CNN шығару фазасының үдеткіштеріне негізделген кейбір далалық бағдарламаланатын клапан матрицалары (FPGA) енгізілді. FPGA портативті құрылғыларда кеңінен қолданылады. Олар жоғары параллелизмге қол жеткізу және жақсы өнімділікті қамтамасыз ету үшін бағдарламалануы мүмкін. FPGA қуат тұтынуы бірдей жұмыс жүктемесі бар GPU-ге қарағанда төмен. Бұл себептер FPGA-ны CNN шығарылымының фазасын жүзеге асыруға қолайлы етеді. Олар GPU үшін салыстырмалы шығыс өнімділігін қамтамасыз ете алады және портативті құрылғылар үшін өте маңызды болып табылатын төмен қуат тұтынуына қол жеткізе алады. CNN-дің FPGA-ға шығу кезеңін тиімді жүзеге асыру үшін құрылым жоғары параллелизмге ие болуы керек, ал пайдаланылатын аппараттық ресурстар аймақ пен қуат тұтынуды азайту үшін азайтылуы керек. Нейрондық желіні пайдалану барысында қолмен жазылған сандарды таңу алгоритмі жүзеге асырылады. Нейрондық желіні патенттелген деңгейде іске асыру үшін арнайы сәулет жасалады. Жұмыс және қуат тұтыну кезіндегі өнімділік процессор мен GPU өнімділігімен салыстырылады.

Түйін сөздер: FPGA, нейрондық желі, машиналық оқыту, сәулет, жад.

A. A. MUKHANBET, E. S. NURAKHOV, B. S. DARIBAYEV

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

IMPLEMENTATION OF A NUMBER RECOGNITION ALGORITHM BUILT USING A NEURAL NETWORK ON THE BASYS3 FPGA PANEL

In recent years, some field programmable valve arrays (FPGAs) based on CNN release phase accelerators have been introduced. FPGA is widely used in portable devices. They can be programmed

to achieve higher concurrency and provide better performance. The power consumption of the FPGA is lower than that of GPUs with the same workload. These reasons make the FPGA suitable for implementing the CNN release phase. They can provide relative output performance for GPUs and achieve low power consumption, which is very important for portable devices. To effectively implement the CNN output phase on the FPGA, the design should have high parallelism, and the hardware resources used should be minimized to reduce the area and power consumption. In the process of working with the help of a neural network, an algorithm for recognizing handwritten numbers is implemented. A special architecture is being created to implement a neural network at the appatent level. The performance during operation and power consumption is comparable to the performance of the processor and the GPU.

Keywords: *FPGA, neural network, machine learning, architecture, memory.*

А. Б. НУГУМАНОВА*, **Д. Ж. АХМЕД-ЗАКИ²**, **Е. М. БАЙБУРИН¹**, **К. С. АПАЕВ³**

¹*Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
Усть-Каменогорск, Казахстан*

²*Astana IT University, Нур-Султан, Казахстан*

³*Восточно-Казахстанский университет имени Даулета Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан
yalisha@yandex.kz*

СЕНТИМЕНТ-АНАЛИЗ ОТЗЫВОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ФЕЙСБУКЕ: СРАВНЕНИЕ БИБЛИОТЕК TEXTBLOB И DOSTOEVSKY

В данной статье рассматривается работа двух библиотек Python TextBlob и Dostoevsky для определения тональности сообщений на русском языке. Библиотека TextBlob напрямую не поддерживает sentiment-анализ текстов на русском языке, но обладает возможностью передавать такие тексты на вход переводчику Google Translate, чтобы затем оценивать полярность этих текстов на основе сформированных английских переводов. Вторая библиотека Dostoevsky создана специально для sentiment-анализа текстов на русском языке и обучена на крупнейшем русскоязычном sentiment-корпусе RuSentiment, который содержит более 30 тысяч аннотированных вручную сообщений. Для сравнения указанных библиотек в данной статье используются реальные отзывы жителей города Нур-Султан о качестве жизни в столице, в том числе о деятельности городских служб и жилищно-коммунального сектора, работе объектов сферы обслуживания, образования, здравоохранения, культуры и т. д., опубликованные в общедоступных группах Фейсбука. Результаты проведенного sentiment-анализа оцениваются с помощью общепринятых метрик точности, полноты и F-меры и демонстрируют незначительное превосходство библиотеки Dostoevsky.

Ключевые слова: *sentiment-анализ, обработка естественного языка, анализ социальных сетей, умный город.*

Введение. Sentiment-анализ (анализ настроений) и извлечение мнений – это две активно развивающиеся отрасли обработки естественного языка, которые изучают проблемы автоматического анализа общественного мнения в масштабе больших данных. Как правило, эти отрасли ориентируются на социальные сети как основной источник данных для анализа, но также могут извлекать тренды общественного мнения из новостей, выступлений политиков, сайтов Интернет-торговли и сайтов рекомендаций. Существует определенное различие между sentiment-анализом и извлечением мнений. Методы извлечения мнений (Opinion Mining) выявляют мнение людей о тех или иных сущностях (товарах, услугах, событиях, персоналиях и организациях), в то время как методы sentiment-анализа (Sentiment analysis) выявляют настроения, выраженные в тексте [1-2]. Соответственно, sentiment-анализ можно рассматривать как задачу классификации сообщений как минимум по трем классам: сообщения с позитивной полярностью, сообщения с негативной полярностью и нейтральные сообщения. При этом полярность может определяться как на уровне всего текста или предложений, так и на уровне отдельных аспектов – характеристик сущности, о которой дается отзыв.

* E-mail корреспондирующего автора: yalisha@yandex.kz

Сентимент-анализ, проводимый на уровне аспектов, или, как его еще называют, аспектно-ориентированный сентимент-анализ, является наиболее востребованным в сфере Интернет-торговли, маркетинга и таргетинга, поскольку именно в этих сферах характерны отзывы с разными полярностями в одном и том же высказывании. Например, в высказывании «камера у данного телефона отличная, а вот звук оставляет желать лучшего» встречаются сразу обе полярности – позитивная по отношению к аспекту «камера» и негативная по отношению к аспекту «звук». В этом случае схема сентимент-анализа усложняется, к задаче определения полярности добавляется задача извлечения сущности и ее аспектов.

Сентимент-анализ на уровне всего текста или его отдельных предложений в основном применяется для измерения общественного мнения, для мониторинга социальных сетей, для оценки удовлетворенности граждан или потребителей оказываемым уровнем услуг. В данной работе мы исследуем технологии сентимент-анализа именно этого второго типа. Мы измеряем удовлетворенность жителей и гостей Нур-Султана качеством жизни в столице посредством сентимент-анализа сообщений в соответствующих открытых группах Фейсбука. Для реализации этой задачи мы используем две современные библиотеки Python TextBlob и Dostoevsky и сравниваем их между собой.

Методы и материалы. Получение отзывов пользователей мы выполняем путем скрапинга сообщений в заданных группах Фейсбука с использованием библиотеки Selenium [4]. Чтобы воспользоваться этой библиотекой, необходимо сначала установить ChromeDriver или другой драйвер, который отвечает за программное управление браузером, а затем настроить доступ, чтобы осуществлять навигацию в браузере, действуя как человек. Всего с помощью библиотеки Selenium мы извлекли 100 постов в группах, посвященных городу Нур-Султану, и более 1000 комментариев пользователей к этим постам. Полученные данные мы загрузили в среду Google Colab, на рисунке 1 показан фрагмент датасета с полученными данными.

```

ive already mounted at /content/gdrive; to attempt to forcibly remour
id          Text          Polarity
1 100 лошадей и 1000 баранов были куплены за счѐ... 1
2 Утром гулял с ребенком. Заметил очень много мо... -1
3 Подполковник Абикен лишился поста начальника Л... -1
4 БАНКОМАТ-БАНДИТ Неделю назад, чтобы оплатить к... -1
5 Добрый день! Есть ли тут охотники и рыбаки?Под... 0
6 Кто придумал такие дебильные правила?? Приѐм п... -1
7 В городе стало много таких автомашин, причѐм р... -1
8 Участок транспортной развязки на пересечении п... 0
9 В Нур-Султане благоустраивается новое обществе... 0
10 В Нур-Султане более 200 волонтеров помогают пр... 0
11 Обладатель уникального голоса, выдающийся каза... 1
12 До и после: Как преобразилась столица за год С... 0
13 Международный турнир памяти Дениса Тен под эги... 0
14 В столице прошла патриотическая акция «Мені? т... 0
15 Яндекс такси, вы там водителей как-то контроли... -1
16 Про вредность стаканчиков одноразовых. -1
17 Казахстан - нефтедобывающая страна с огромными... -1
18 Дорогие астанчане, будьте внимательны, смотрит... 0
19 Ничего нового, опять пишу про старую проблему.... -1
20 Здесь будет второй городской пляж. 0

```

Рисунок 1 – Фрагмент датасета с отзывами и комментариями пользователей

Как отмечалось выше, в качестве инструментов сентимент-анализа высказываний пользователей мы использовали две конкурирующие библиотеки языка Python:

1) библиотеку TextBlob [5], основанную на пакете NLTK и словаре слов с размеченной полярностью;

2) библиотеку Dostoevsky, обученную на русском корпусе образцов высказываний с размеченной полярностью [6].

Библиотека TextBlob не выполняет сентимент-анализ высказываний на русском языке, но зато поддерживает функцию их перевода на английский язык. Таким образом, для измерения полярности используются не оригинальные тексты, а их переводы. На рисунке 2 представлен фрагмент исходного датасета, к которому был присоединен столбец, содержащий переводы на английский язык.

	id	...	TextEn
0	1	...	The Seilkhanov family bought 100 horses and 10...
1	2	...	Walked with the child in the morning. I notice...
2	3	...	Lieutenant Colonel Abiken lost the post of hea...
3	4	...	ATM-BANDIT A week ago, in order to pay for the...
4	5	...	Good day! Are there hunters and fishermen here...
5	6	...	Who came up with such moronic rules ?? Receivi...
6	7	...	There are many such cars in the city, and they...
7	8	...	A section of a traffic intersection at the int...
8	9	...	A new public space is being improved in Nur-Su...
9	10	...	In Nur-Sultan, more than 200 volunteers help t...
10	11	...	The owner of a unique voice, the outstanding K...
11	12	...	Before and after: How the capital has changed ...
12	13	...	International tournament in memory of Denis Te...
13	14	...	A patriotic action "Meni? tuym! "In honor of t...
14	15	...	Yandex taxi, do you somehow control the driver...
15	16	...	About the harmfulness of disposable cups.
16	17	...	Kazakhstan is an oil-producing country with hu...
17	18	...	Dear Astana residents, be careful, look not on...
18	19	...	Nothing new, again I am writing about an old p...
19	20	...	There will be a second city beach here.

Рисунок 2 – Фрагмент датасета с отзывами и комментариями пользователей, а также с присоединенным столбцом их переводов

Анализатор TextBlob оценивает полярность и субъективность высказывания. Полярность оценивается по шкале от -1 до 1, отрицательные значения указывают на негативное настроение в тексте высказывания, а положительные указывают на позитивное настроение. Субъективность оценивается в диапазоне от 0 до 1, уровень субъективности равный 1 обычно означает выражение личного мнения или эмоций. Анализатор TextBlob действует на основе правил и заранее заданного лексикона тональностей. Если в тексте встречаются слова, тональность которых неизвестна, то анализатор пропускает такие слова. Сравните 2 примера на рисунках 3 и 4.

```

text_blob_ru = TextBlob('Связь в этом районе очень плохая')
text_blob_en = text_blob_ru.translate(from_lang='ru', to='en')

print(text_blob_en, '->', text_blob_en.sentiment)

Communication in the area is very poor -> Sentiment(polarity=-0.52, subjectivity=0.78)
    
```

Рисунок 3 – Полярность высказывания определена верно, т. к. определение «плохая» является негативно окрашенным и присутствует в лексиконе TextBlob

```

text_blob_ru = TextBlob('Завтраки в этом отеле выше всяких похвал')
text_blob_en = text_blob_ru.translate(from_lang='ru', to='en')

print(text_blob_en, '->', text_blob_en.sentiment)

Breakfasts at this hotel are beyond praise -> Sentiment(polarity=0.0, subjectivity=0.0)
    
```

Рисунок 4 – Полярность высказывания определена неверно, т. к. анализатор TextBlob не сумел распознать сложное определение «выше всяких похвал»

Мы выполнили sentiment-анализ высказываний с помощью TextBlob и вывели на экран 5 самых позитивных и 5 самых негативный высказываний (см. рисунок 5). Ни одно из высказываний не получило максимальной оценки ни в положительном, ни в отрицательном направлении.

id	Text	...	BlobPolarity	Pred
76	«Мир Керамики» на Бараева - не рекомендую нико...	...	-0.800000	-1.0
72	Очень опасный поворот тут, и дети ходят через	-0.780000	-1.0
21	Жирентаева 13,во дворе горка стоит, акимат убе...	...	-0.600000	-1.0
31	Когда уже решится проблема 61 маршрута?!это же...	...	-0.441667	-1.0
86	Опять молодой парень не справился с управление...	...	-0.300000	-1.0
..
11	Обладатель уникального голоса, выдающийся каза...	...	0.437500	1.0
93	Картошечка по 95 тг за кг\nВыглядит хорошо и м...	...	0.450000	1.0
83	Всем здравствуйте! Подскажите пожалуйста хорош...	...	0.450000	1.0
45	Доброе утро страна...	...	0.700000	1.0
66	Добрыи? день! Взяли вчера на вынос 2 пиццы с @...	...	0.750000	1.0

Рисунок 5 – Пять самых позитивных (сверху) и самых негативных (снизу) высказываний согласно TextBlob

В отличие от библиотеки TextBlob, библиотека Dostoevsky основана на машинном обучении. Для обучения анализатора Dostoevsky был использован крупнейший русскоязычный sentiment-корпус RuSentiment [], содержащий более 30 тысяч аннотированных вручную сообщений. Мы также выполнили sentiment-анализ высказываний с помощью Dostoevsky и вывели на экран 5 самых позитивных и 5 самых негативный высказываний (см. рисунок 6).

	text	dostoevsky	True
79	Ул. Толеби, выезд на ул.Сыганак, до конца года...	-0.822199	-1.0
94	Акимат воовще не работает ...зачем нам акимат ес...	-0.760661	-1.0
68	Вот акимат города ровно так же как и граждане ...	-0.629785	-1.0
41	Вандалы на городском кладбище совсем страх пот...	-0.622469	-1.0
30	Когда уже решится проблема 61 маршрута?!это же...	-0.592677	-1.0
..
27	Месяц назад с акимом района "Алматы" Бекмурзае...	0.000000	0.0
26	Месячник осведомленности о раке молочной желез...	0.000000	0.0
99	Безобразие в Евразии. Вообще не проверяют QR н...	0.000000	0.0
76	Мне тоже не очень понравилось обслуживание, ос...	0.327678	1.0
74	А мне нравится. Все же лучше, чем матерные сло...	0.665421	1.0

Рисунок 6 – Пять самых позитивных (сверху) и самых негативных (снизу) высказываний согласно Dostoevsky

Результаты и их обсуждение. Для проверки качества работы сентимент-анализаторов мы вручную разметили полярность 100 высказываний (-1 – негативные, 0 – нейтральные, 1 – позитивные), а затем сравнили с оценками, предсказанными обеими моделями: TextBlob и Dostoevsky. Матрицы ошибок этих моделей представлены на рисунках 7–8 соответственно. Затем на основе этих матриц были рассчитаны точность, полнота и F1-мера для каждого из методов (см. таблицу 1).

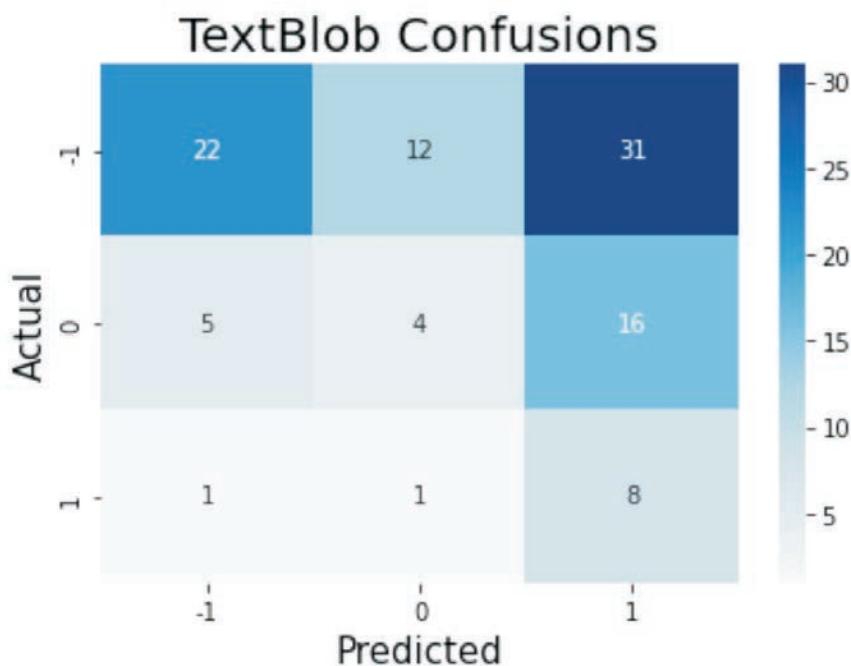


Рисунок 7 – Матрица ошибок сентимент-анализа посредством TextBlob

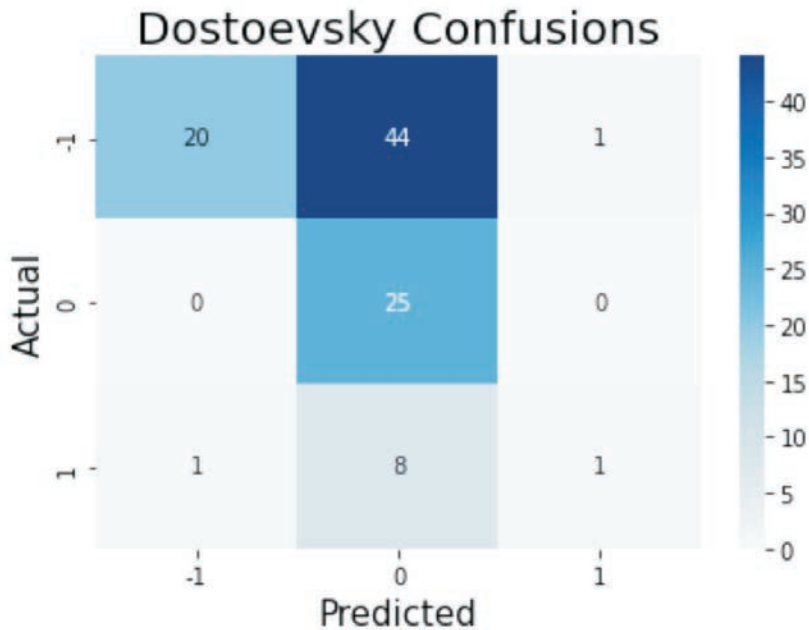


Рисунок 8 – Матрица ошибок sentiment-анализа посредством Dostoevsky

Таблица 1 – Сравнение точности, полноты и F1-меры, определенных с помощью библиотек TextBlob и Dostoevsky, для всех трех классов высказываний

	TextBlob			Dostoevsky		
	Pr	Re	F1	Pr	Re	F1
Negative (-1)	0.79	0.34	0.47	0.95	0.31	0.47
Neutral (0)	0.24	0.16	0.19	0.32	1.00	0.49
Positive (1)	0.15	0.80	0.25	0.50	0.10	0.17

Анализ результатов, приведенных в таблице 1, показывает, что для негативных высказываний библиотека Dostoevsky дает более точные результаты, но при этом жертвует полнотой, в то время как библиотека TextBlob дает большую полноту, но при этом захватывает лишние высказывания, т. е. жертвует точностью. На позитивных высказываниях результаты гораздо хуже, но также наблюдается перекося в сторону точности у библиотеки Dostoevsky, и в сторону полноты у библиотеки TextBlob. Что касается нейтральных высказываний, к ним также отнесены и высказывания, для которых тональность оказалось невозможным определить, поэтому оценить качество измерения нейтральных высказываний не представляется возможным.

Заключение. Социальные сети (Twitter, Facebook и Instagram) стали такими же полноценными источниками информации, как и цифровые датчики и системы, генерирующие данные в умных городах в режиме реального времени. В [8] пользователей социальных сетей сравнивают с социальными датчиками, которые передают больш-

шие и сложные наборы данных с целью поддержки процесса принятия решений. И для того, чтобы эти данные превратились в ценную информацию, необходимую для управления в самых разных сферах умных городов, включая транспорт, потребление энергии, мониторинг окружающей среды, жилищное хозяйство и т. д., они должны быть обработаны и правильно интерпретированы.

В этой работе мы исследовали, как данные социальной сети Фейсбук могут использоваться для измерения общественных настроений. Мы оценили точность и полноту определения полярности в высказываниях горожан в социальных сетях с помощью базовых библиотек Python, и пришли к выводу, что эти технологии недостаточно точны для того, чтобы информация, полученная на их основе, могла использоваться для поддержки принятия решений. В наших будущих работах мы планируем исследовать новые технологии сентимент-анализа, включая аспектно-ориентированный сентимент-анализ и тематическое моделирование.

Благодарности. Работа поддержана грантом ПЦФ BR10965311 «Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепте Smart City».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ravi K., Ravi V. A survey on opinion mining and sentiment analysis: tasks, approaches and applications // Knowledge-based systems. – 2015. – Vol. 89. – P. 14-46.
- 2 Malathi M. et al. A Systematic Review on Opinion Mining and Sentiment Analysis // International Journal of Data Structures. – 2020. – Vol. 6. – No. 2. – P. 21-29.
- 3 Medhat W., Hassan A., Korashy H. Sentiment analysis algorithms and applications: A survey // Ain Shams engineering journal. – 2014. – Vol. 5. – No. 4. – P. 1093-1113.
- 4 García B. et al. A survey of the selenium ecosystem // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – No. 7. – P. 1067.
- 5 Gujjar J. P., HR P. K. Sentiment Analysis: Textblob For Decision Making // International Journal of Scientific Research & Engineering Trends. – 2021. – Vol. 7. – P. 1097-1099.
- 6 Moskin N. D. et al. Comparative Analysis of Texts by FM Dostoevsky and Other Authors Using Decision Trees // 2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – IEEE, 2021. – P. 1-5.
- 7 Rogers A. et al. RuSentiment: An enriched sentiment analysis dataset for social media in Russian // Proceedings of the 27th international conference on computational linguistics. – 2018. – P. 755-763.
- 8 Al Nuaimi A. et al. Social media analytics for sentiment analysis and event detection in smart cities // Proc. 4th Int. Conf. Natural Lang. Comput.(NATL). – 2018. – P. 57-64.

А. Б. НУГУМАНОВА, Д. Ж. АХМЕД-ЗАКИ², Е. М. БАЙБУРИН¹, К. С. АПАЕВ³

¹ Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Өскемен, Қазақстан

² Астана ІТ университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

³ Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан

FACEBOOK-та ПАЙДАЛАНУШЫЛАРДЫҢ ПІКІРЛЕРІНІҢ СЕНТИМЕНТ-ТАЛДАУЫ: TEXTBLOB ЖӘНЕ DOSTOEVSKY КІТАПХАНАЛАРЫН САЛЫСТЫРУ

Бұл мақала екі Python кітапханасының TextBlob және Достоевскийдің орыс тіліндегі пікірлердің сезімін анықтауға арналған жұмысын қарастырады. TextBlob кітапханасы орыс тіліндегі мәтіндердің сезімдік талдауына тікелей қолдау көрсетпейді, бірақ жасалған ағылшын тіліндегі аудармалар негізінде осы мәтіндердің полярлығын бағалау үшін мұндай мәтіндерді Google Translate аудармашысының енгізуіне жіберу мүмкіндігі бар. Достоевскийдің екінші кітапханасы орыс тіліндегі мәтіндердің сезімдік талдауы үшін арнайы құрылған және 30 мыңнан астам қолмен аннотацияланған хабарламаларды қамтитын ең үлкен орыс тілді RuSentiment сезім корпусында оқытылады. Осы кітапханаларды салыстыру үшін бұл мақалада Нұр-Сұлтан қаласының тұрғындарының елорданың өмір сүру сапасы, оның ішінде қалалық қызметтер мен тұрғын үй-коммуналдық сектордың қызметі, қызмет көрсету нысандарының жұмысы, білім беру, қоғамдық Facebook топтарында жарияланған денсаулық сақтау, мәдениет және т.б. Жүргізілген көңіл-күйді талдау нәтижелері жалпы қабылданған дәлдік, толықтық және F-өлшеу көрсеткіштері арқылы бағаланады және Достоевский кітапханасының шамалы артықшылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: сентимент-талдау, табиғи тілді өңдеу, әлеуметтік медиа талдауы, ақылды қала.

A. B. NUGUMANOVA, D. ZH. AKHMED-ZAKP, E. M. BAYBURIN¹, K. S. APAEV³

¹Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

² Astana IT University, Nur-Sultan, Kazakhstan

³Daulet Serikbayev East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

SENTIMENT ANALYSIS OF USERS REVIEWS IN FACEBOOK: COMPARISON OF TEXTBLOB AND DOSTOEVSKY LIBRARIES

This article examines the work of two Python libraries TextBlob and Dostoevsky for determining the sentiment of reviews in Russian. The TextBlob library does not directly provide sentiment analysis of texts in Russian, but it has the ability to transfer such texts to the input of the Google Translate translator; in order to then evaluate the polarity of these texts based on the generated English translations. The second Dostoevsky library was created specifically for sentiment analysis of texts in Russian and is trained on the largest Russian-language sentiment corpus RuSentiment, which contains more than 30 thousand manually annotated messages. To compare these libraries, this article uses real feedback from residents of the city of Nur-Sultan about the quality of life in the capital, including about the activities of city services and the housing and communal sector, the work of service facilities, education, health care, culture, etc., posted on public Facebook groups. The results of the sentiment analysis carried out are evaluated using generally accepted metrics of accuracy, completeness and F-measure and demonstrate a slight superiority of the Dostoevsky library.

Keywords: sentiment analysis, natural language processing, social media analysis, smart city.

**D. SHINGISSOV^{1*}, V. GOIKHMAN², A. LAVROVA², SH. SEILOV¹,
YE. ZHURSINBEK¹**

¹*L. N. Gumilyov Eurasian National University, Doctoral student in the specialty
"Information Systems", Nur-Sultan, Kazakhstan*

²*Ph.D., Associate Professor at the Department of Infocommunicational systems The
Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, Russia*

²*Master of degree at the Department of Infocommunicational systems The Bonch-Bruevich
Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia*

¹*Dean of the Faculty of Information Technologies at L. N. Gumilyov Eurasian National
University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

¹*Master student in the specialty " Information Security " of the L. N. Gumilyov Eurasian
National University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

ON STABILITY OF DISTRIBUTIONS OF WHATSAPP TRAFFIC CHARACTERISTICS

This paper deals with the main methods of traffic classification and describes the functional scheme of a test bench and the test procedure. It provides the results of verifying the hypothesis about the stability of distributions of WhatsApp traffic characteristics. The delivered test results in this paper emphasize the influence of certain traffic characteristics on the final traffic distribution form. In addition, the comparison of the results obtained for the entire set of tests and the results received for individual test sets reveals the absence of other critical traffic characteristics significantly influencing the distribution form concluding in the need for further research. The paper concludes that the stability pattern of distributions of WhatsApp traffic characteristics can be obtained and visualized after more critical traffic characteristics are revealed and processed in similar tests. This paper stands as a pioneer research in assessing the traffic analysis and implementing the results in applied science.

Keywords: *traffic classification, traffic analysis, WhatsApp messaging app.*

Network traffic classification is one of the critical tasks for the communication and Internet service providers, as they need to know the structure of the traffic passing through their networks.

Traffic classification plays a significant role in ensuring network security, timely detection of intrusion attempts, and quality of service management.

Identifying the traffic and the applications that generate it allows the service providers to differentiate the billing policy, manage the bandwidth, and provide flexible traffic prioritization.

There are many papers devoted to the issue of traffic classification using various methods [1-12].

There are two main approaches to traffic classification:

1. Payload-based classification.
2. Classification based on the statistical analysis of traffic probability characteristics.

* E-mail корреспондирующего автора: e-mail: shingissova@gmail.com

The first method – payload-based – can be further divided into a general and advanced payload analysis.

The *general payload analysis* is based on the information contained in the IP header; normally, the following information is analyzed:

IP addresses, port numbers, and protocols.

This classification method has its limitations because not all applications have officially fixed transport layer port numbers, and some applications use ports that were intended for other applications. In addition, this method is not applicable to the encrypted or tunneled traffic.

The *advanced payload analysis* relies on deep packet inspection (DPI), which is based on the signature analysis. Signatures are unique patterns that are predefined for each known application.

The signature analysis involves various methods, such as:

- Pattern analysis, which means searching for a known fixed combination of bytes, symbols, strings inherent to this application.
- Numeric analysis, which includes the determination of packets' numerical characteristics, such as payload size, number of response packets, bit shift, and so on.
- Behavior analysis, which is based on the traffic behavior of the traffic of the initialized application, on a certain packet exchange sequence, packet size, number of opened sessions, etc.

The disadvantage of the payload-based classification method is its high implementation cost because it requires high-performance and high-speed computers and highly qualified personnel. In addition, as new applications and modifications of existing ones continue to appear, new signatures and patterns should be constantly developed and the existing databases should be regularly updated.

The second traffic classification method is based on the analysis of statistical traffic characteristics, namely:

- Characteristics of packets in a flow (packet-based)
- Characteristics of a flow in general (flow-based)
- Characteristics of flows coming from one host in the network (host-based)
- Characteristics of directed graphs of flows (graph-based)

Both methods are based on the research data, according to which network traffic has different probability characteristics that are unique to certain classes of applications, which makes it possible to identify different source applications [11].

Earlier studies [13-21] suggest that some user applications, instant messengers, in particular, show stable (unique) distributions of some probability characteristics of the traffic they generate.

To verify the proposed hypothesis, we created a test bench according to the functional scheme shown in Figure 1.

The WhatsApp messaging app was chosen as the test application. The choice was driven by the wide use of this messaging app: today, WhatsApp users amount to over 1 billion people in more than 180 countries. In 2018, the daily number of active users exceeded 450 million. The app is available both for smartphones running Android, iOS, or Windows

Phone operating systems, and for computers running Windows or MacO; there is also a web-based version of the app for Linux/Unix operating systems.

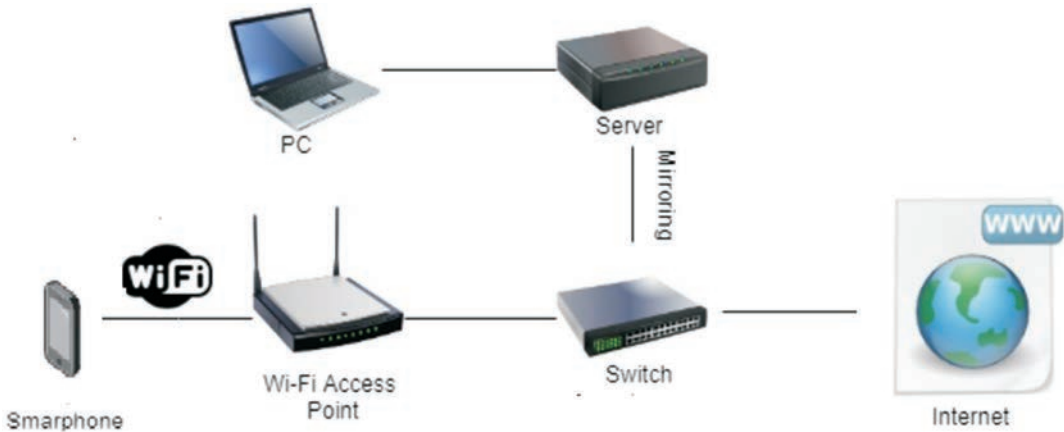


Figure 1 – Test bench scheme

A smartphone connects to the Internet via a Wi-Fi wireless access point and a switch.

The traffic passing through one of the switch ports was mirrored to a server. This allowed us to use tcpdump for writing traffic dump to a file.

An Android-based smartphone with WhatsApp 2.19.274 installed was the traffic source. The Android operating system has an advantage over iOS, which does not allow clearing the memory and cache of some apps.

Thus, selecting Android OS, which has the above features, allowed us to conduct each test under the same conditions.

To simulate the other communication party, we used another smartphone connected to the Internet outside the test zone.

Each test started with bringing the test smartphone to its default state.

The default state was as follows: mobile data is off, Wi-Fi is off, no third-party apps are initialized, memory and cache are cleared.

The traffic generated by WhatsApp was studied in two modes: chat mode and file transfer mode.

In the chat mode, three messages were sent from the test smartphone one after another: "Hello", "How are you", "What are you doing; the chat screenshot is shown in Figure 2.

In the file transfer mode, a 1 MB file was sent.

The chat mode tests followed the below procedure:

- Bring the test equipment to its default state.
- Enable writing of the mirrored traffic on the server using tcpdump.
- Enable a Wi-Fi connection on the test smartphone and connect to an access point.
- Start the WhatsApp app.
- Selecting a contact in the chat list.
- Type and send "Hello".
- Type and send "How are you".



Figure 2 – Chat window

- Type and send "What are you doing".
- Note the check mark indicating that all three messages have been delivered.
- Close the WhatsApp app.
- Clear cache and memory.
- Disconnect from the Wi-Fi network -> default state.
- Stop tcpdump.

In the file transfer mode, the following procedure was used:

- Bring the test equipment to its default state.
- Enable writing of the mirrored traffic on the server using tcpdump.
- Enable a Wi-Fi connection on the test smartphone and connect to an access point.
- Start the WhatsApp.
- Selecting a contact in the chat list.
- Send a file.
- Note the check mark indicating that the file has been delivered.
- Close the WhatsApp app.
- Disconnect from the Wi-Fi network.
- Stop tcpdump.
- Connect to another Wi-Fi network with access to the Internet.
- Open the WhatsApp app.
- Delete the file from the chat for both conversation participants.
- Close the WhatsApp app.

To minimize the influence of random factors, the tests were performed on different days of the week and at different times of the day. In total, we performed six sets of tests and analyzed them both individually and collectively.

The first step in processing the test data was to identify the traffic directly related to WhatsApp among all the traffic flows. To do this, we used Wireshark, a traffic analyzer that, among other things, allows filtering the traffic based on the specified parameters.

To isolate the flows generated by WhatsApp, we used the following filter: "ip.address==<WhatsApp IP-address>". In addition, we further checked that we had correctly selected the traffic flow related to WhatsApp by analyzing the responses to DNS queries for the WhatsApp domain name. The IP address in the DNS response should have been the same as the IP address used for filtering the traffic.

After the filtering and DNS-based validation, the filtered traffic was exported to a CSV file and then processed using Microsoft Excel.

Processing the test data was aimed at verifying the hypothesis about the stability of distributions of such WhatsApp traffic parameters as the packet intervals and the packet length. Given that specific values of these parameters appear randomly, we are dealing with a probability distribution.

We treated the data obtained in similar tests as samples taken from a general set and drew corresponding histograms.

For the histograms of packet intervals in the chat mode, we selected bins with a 5 ms increment. Then we divided the entire range of possible values of packet intervals into 31 bins, for which we calculated how often the corresponding values occur and drew the histograms. Figure 3 shows an example of such a histogram.

We also drew histograms for packet length values, with a 10-byte increment for the bins of possible values. Figure 4 shows an example of such a histogram.

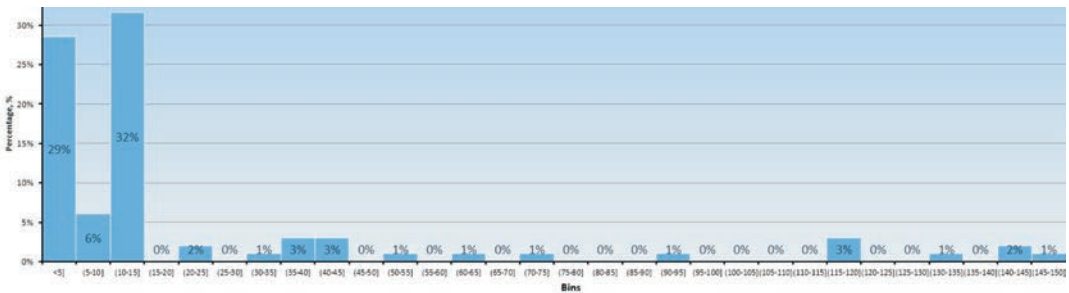


Figure 3 – Example of a histogram for packet intervals in the chat mode

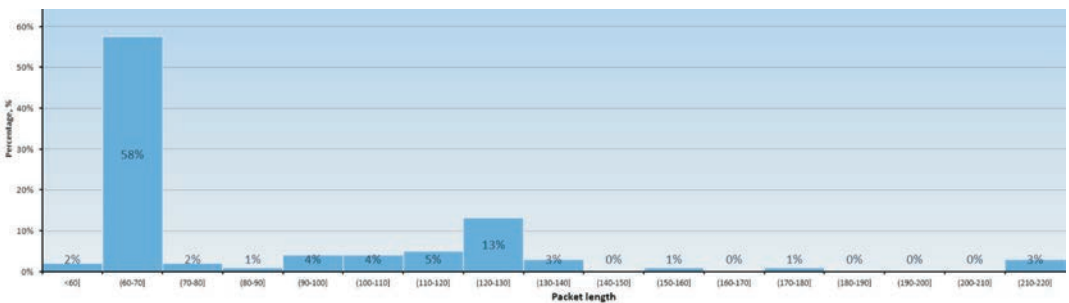


Figure 4 – Example of a histogram for packet lengths in the chat mode

Similar calculations were made for the file transfer mode. Figures 5 and 6 show examples of packet interval and packet length histograms for the file transfer mode.

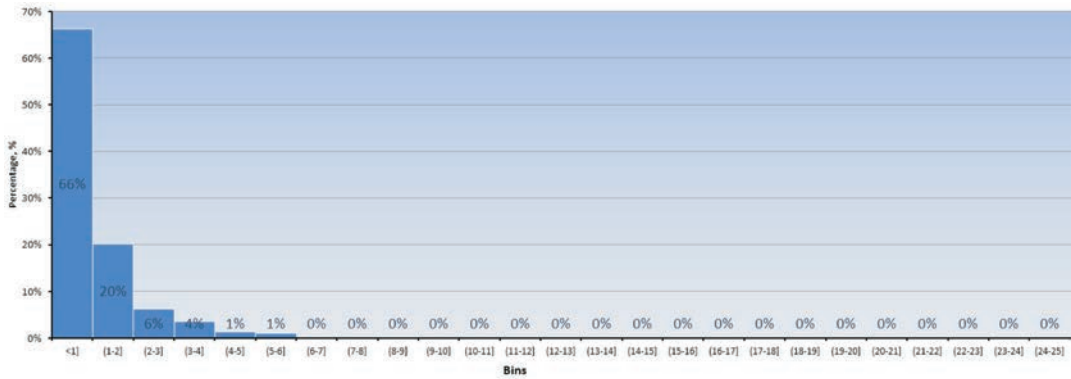


Figure 5 – Example of a histogram for packet intervals in the file transfer mode

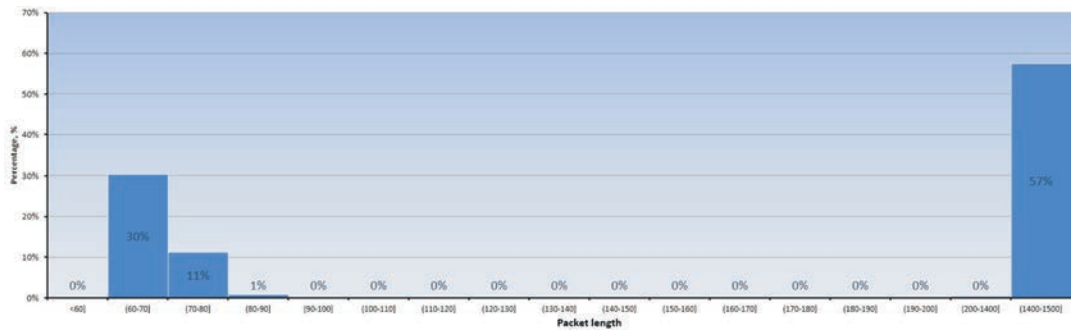


Figure 6 – Example of a histogram for packet lengths in the file transfer mode.

Similar histograms were drawn for each test.

To verify the proposed hypothesis about the stability of distributions, it is essential to confirm that distributions of the obtained samples are uniform.

For this purpose, we used one of the goodness-of-fit tests, namely, the Wilcoxon signed-rank test. We checked the distributions' uniformity both for samples obtained in the chat mode and those obtained in the file transfer mode, with tests performed separately for the packet intervals and the packet length in each mode. The significance level was assumed to be 0.05.

Let's consider the adopted analysis procedure based on the example of packet intervals in the chat mode.

The random pairwise analysis of the corresponding samples to check if they pass the Wilcoxon signed-rank test did not allow us to confirm that the tested distributions were uniform, but it showed that a large number of samples lean towards uniformity of distributions.

To evaluate how close the distributions are to each other, we compared their two initial moments. The average value was used to estimate the first initial moment. Figure 7 shows the range of average values obtained for each sample.

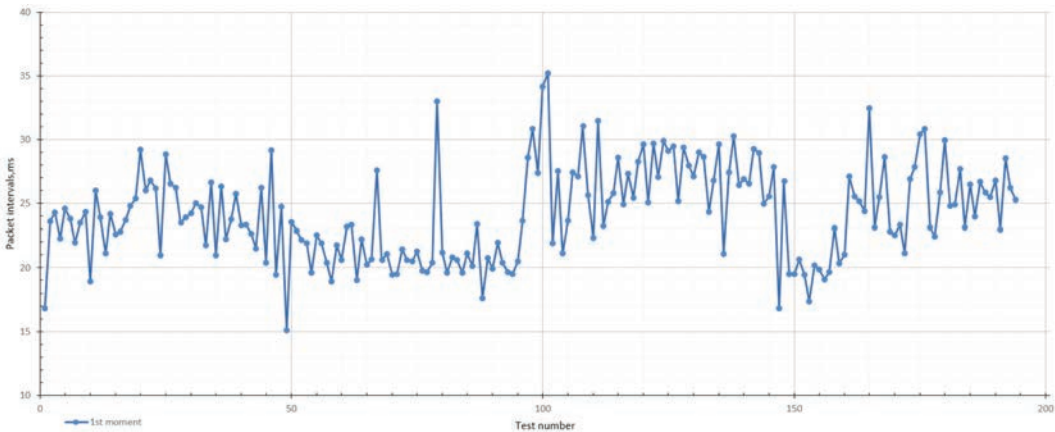


Figure 7 – Range of average values of packet intervals for the entire set of tests

The average value in this range was 24.186 ms. To compare all values in the above range, the proximity threshold was set to 15% relative to the calculated average value. The limit values for the obtained deviation band will be 27.81 ms and 20.56 ms, which are shown with yellow lines in Figure 8.

If the values of the first initial moments of a sample are within the above limits, we can consider such samples suitable for the comparison of their second initial moments.

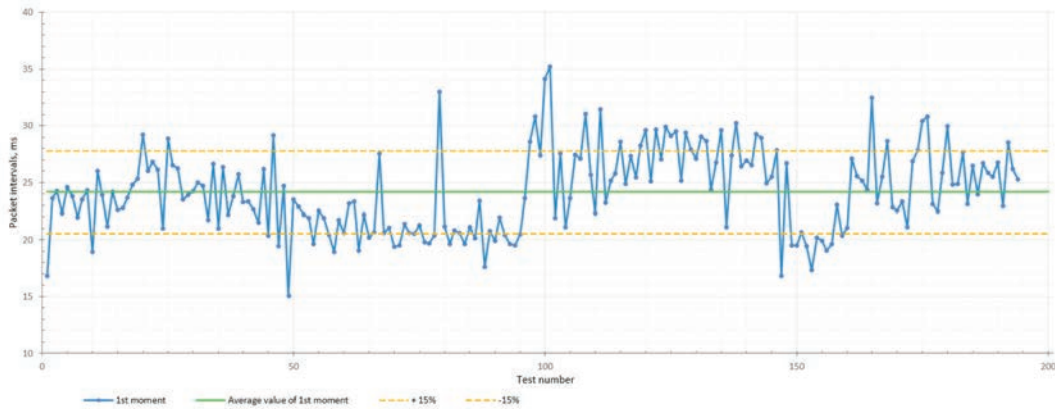


Figure 8 – 15% deviation band from the average value for the first initial moments.

The values shown in Figure 8 were divided into three subranges:

- a) less than the lower limit of the deviation
- b) greater than the lower limit and less than the upper limit of the deviation – within the deviation band
- c) greater than the upper limit of the deviation

The results are given in Table 1.

Table 1 – Number of values of the first initial moments that fall into the respective subranges

Subrange	Number	Percentage, %
<20,558	36	18%
20,558-27,814	126	64%
>27,814	34	17%
Total	196	100%

The obtained data show that only 64% of the values are within the deviation band.

Then we drew a graph of the second initial moments for the samples with the above values, on which the deviation band of 15% of the average value was overlaid – see Figure 9.

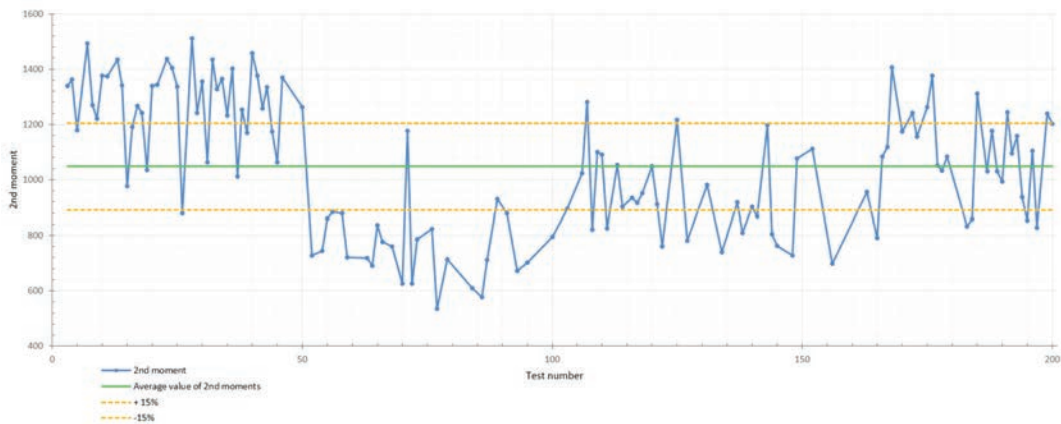


Figure 9 – Graph of the second initial moments for the packet intervals

This figure demonstrates that 45 samples out of 200 are within the deviation band. Thus, only 22.5% of samples differ from each other no more than by 15% in terms of their initial moments' values.

The above results describe the entire set of tests carried out in the chat mode.

However, the pattern is quite different if we address each of the six sets of tests separately, not taken as a whole, consider that the tests were conducted at different times.

A similar analysis performed within each set of tests allows us to conclude as follows.

- In the first set of tests, 66% of samples fall into the 15% deviation band.
- In the second set of tests – 52%.
- In the third set – 58%.
- In the fourth set – 67%.
- In the fifth set – 73%.
- In the sixth set – 50%.

The following results were obtained when we analyzed the samples of data for the packet length distribution in the chat mode.

The percentage of values of the first and second initial moments within the 15% deviation band is as follows:

- For all the tests – 38%.
- For the first set of tests – 84%.
- For the second set of tests – 94%.
- For the third set of tests – 78%.
- For the fourth set – 99%.
- For the fifth set – 79%.
- For the sixth set – 70%.

We obtained similar results for the analysis of samples in the file transfer mode.

The results allow us to conclude as follows:

- We cannot fully confirm that the distributions of the samples obtained during the Wilcoxon signed-rank tests are uniform as expected.
- We observed that the distributions of a large number of samples lean towards uniformity, which is confirmed by the comparison of estimates of the first two initial moments for the mentioned samples.
- The packet length distributions in the file transfer mode lean towards uniformity to the greatest extent.
- The observed difference between the results obtained for the entire set of tests and the results received for individual test sets indicates that there are still some factors, which have not yet been identified but influence the test results and, therefore, require further research.

REFERENCES

1 Zeba Atique Shaikh / An Overview of Network Traffic Classification Methods / Zeba Atique Shaikh, D.G.Harkut/ International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC) Volume:3 Issue:2 //2015;

2 Abirami Sivaprasad / Machine Learning based Traffic Classification using Statistical Analysis / Abirami Sivaprasad, Neha Ghawalkar, Maitri Sanghavi, Srushti Hodge, Vidhuya Shindle/ (IJRITCC) Volume:6 Issue:3 // 2018;

3 Marcin Pietrzyk/ Methods and Algorithms for Network Traffic Classification/ M Pietrzyk/ Telecom Paris Tech// 2011;

4 Shahbaz Rezaei / Deep Learning for Encrypted Traffic Classification: An Overview / Shahbaz Rezaei, Xin Lui / SUBMITTED TO IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE //2019;

5 Silvio Valenti / Reviewing Traffic Classification / Silvio Valenti, Dario Rossi, Alberto Dainotti, Antonio Pescape, Alessandro Finamore, Marco Melia / “Data Traffic Monitoring and Analysis: From Measurement, Classification, and Anomaly Detection to Quality of Experience” //2013;

6 Muhammad Shafiq/Network Traffic Classification Techniques and Comparative Analysis Using Machine Learning Algorithms/ M.Shafiq, X. Yu, L. Yao, F. Abdessamia/2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications //2016;

7 A. Dainotti / Issues and future directions on traffic classification/ A. Dianotti, A. Pescape / IEEE Network 26 //2012;

8 Manuel Crotti / Traffic Classification through Simple Statistical Fingerprinting / M. Crotti, M. Dusi, F.Gringoli / ACM SIGCOMM Computer Communication Review: Number 1Volume 37 //2007;

9 N. G. Shcherbakova / Analiz IP-trafika metodami Data-Mining. Problemy klassifikatsii [IP Traffic Analysis Using Data-Mining Methods. Classification Problems] / Vychislitelnye i setevye resursy //2012;

10 A. I. Getman / Obzor zadach i metodov ikh resheniya v oblasti klassifikatsii setevogo trafika (Overview of Problems and Solution Methods in the Network Traffic Classification Field) / A. I. Getman, Yu. V. Markin, E. F. Evstropov, D. O. Obydenkov / Proceedings of ISP RAS, Volume 29, Issue 3//2017;

11 R. Suguna / A survey on Network Traffic Classification Techniques / R. Suguna / International Journal of Pure and Applied Mathematics // 2017;

Cisco: Cisco WAN and Application Optimization Solution Guide [online]. http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/nsite/enterprise/wan/wan_optimization/wan_opt_sg/chap05.html ;

12 M. V. Avramenko, V. Yu. Goikhman "M2M RESHENIE DLYA EKOLOGICHESKOGO MONITORINGA OKRUZHAYUSHCHEY SREDY" ["M2M SOLUTION FOR ENVIRONMENTAL MONITORING"], Collected Papers of the V International Scientific, Technical, and Methodological Conference on Topical Problems of Infotelecommunications in Science and Education. 2016.

13 M. V. Avramenko, V. Yu. Goikhman. "Vybor discipliny peredachi dannykh sensorogo uzla [Selecting the Sensor Node Data Transfer Discipline] – Pervaya Milya, No. 2, 2017, pp. 34-39.

14 D. D. Bekmambetova "Issledovanie Internet-trafika kvartirnogo sektora" [Internet Traffic Research in the Residential Sector], Proceedings of APINO, 2018

15 M. A. Buranova, V. G. Kartashevsky, M. S. Samoilov "Analiz statisticheskikh kharakteristik multimedijnogo trafika uzla agregatsii v multiservisnoy seti" [Analysis of Statistical Characteristics of Multimedia Traffic of an Aggregation Node in a Multiservice Network], Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy, Murom, 2014.

16 A. I. Getman, E. F. Evstropov, Yu. V. Markin, Analiz setevogo trafika v rezhime realnogo vremeni: obzor prikladnykh zadach, podkhodov i resheniy [Real-Time Network Traffic Analysis: Overview of Applications, Approaches, and Solutions], http://www.ispras.ru/preprints/docs/prep_28_2015.pdf;

17 V. Yu. Goikhman, T. Yu. Lushnikova, Yu. A. Zinenko "Analiz trafika studencheskogo obshezhitiya [analysis of traffic in a dormitory]", Vestnik Kibernetiki. 2016. No. 1 (21).

18 V. YU. Goikhman, T. YU. Lushnikova "Kharakternye cherty kampusnogo trafika" [TYPICAL CHARACTERISTIC OF CAMPUS TRAFFIC], ELEKTROSVYAZ, NO. 4, 2017 PP. 51-55

19 V. Yu. Goikhman, A. Dremina "Statisticheskii analiz setevogo trafika, vznikayushchego pri zagruzke fotografii v socialnye seti" [STATISTICAL ANALYSIS OF THE NETWORK TRAFFIC WHEN UPLOADING PHOTOS TO SOCIAL NETWORKS] Collected Papers: "Topical Problems of Infotelecommunications in Science and Education", Collected Papers of the V International Scientific, Technical, and Methodological Conference. 2016.

20 V. Yu. Goikhman, N. A. Sokolov "Otsenka rosta intensivnosti vkhodyashchego trafika" [Estimation of the Incoming Traffic Intensity Growth], Elektrosvyaz, No. 3, 2018, pp. 75-77.

**Д. С. ШИНГИСОВ¹, В. Ю. ГОЙХМАН², А. Р. ЛАВРОВА², Ш. Ж. СЕИЛОВ¹,
Е. Ш. ЖҮРСІНБЕК¹**

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Ақпараттық жүйелер мамандығының докторанты, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

²Федералды мемлекеттік білім беру бюджеттік жоғары кәсіптік білім беру мекемесінің инфокоммуникация жүйелері кафедрасының доценті, т.ғ.к., «проф.

М.А. Бонч-Бруевич атындағы Санкт -Петербург мемлекеттік телекоммуникация университеті», Санкт -Петербург, Ресей

²Федералды мемлекеттік білім беру бюджеттік жоғары кәсіптік білім беру мекемесінің инфокоммуникация жүйелері кафедрасының магистрі, «проф. М.А. Бонч-Бруевич атындағы Санкт -Петербург мемлекеттік телекоммуникация университеті», Санкт-Петербург, Ресей

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Ақпараттық технологиялар факультетінің деканы, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Ақпараттық қауіпсіздік мамандығының магистранты, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

WHATSAPP ТРАФИГІНІҢ СИПАТТАМАЛАРЫН БӨЛУДІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ ТУРАЛЫ

Мақалада трафикті жіктеудің негізгі әдістері талқыланады, сынақ стендінің функционалдық диаграммасы мен тестілеу процедурасы сипатталған. WhatsApp трафиінің таралу тұрақтылығы туралы гипотезаны тексеру нәтижелері ұсынылады. Бұл мақалада ұсынылған тест нәтижелері трафиктің кейбір жеке сипаттамаларының оның таралуында тұрақты динамиканың пайда болуына елеулі әсер көрсететінің анықтайды. Сонымен қатар, барлық тест жинағы үшін алынған нәтижелер мен жеке тест жинағы үшін алынған нәтижелерді салыстыру барысында трафиктің таралуын толық тұрақтандыруға септігін тигізетін трафиктің басқа маңызды сипаттамаларының жоқтығын көрсетеді. Демек, жоғарыда ескерілген ақпарат, бұл тақырып қосымша зерттеулерді қажет ететінің білдіреді. Мақалада, WhatsApp -тың трафиктік сипаттамаларының таралуының тұрақты заңдылығын анықтап оны бейнелей алатын дәрежеге жету үшін трафиктің таралуын толық тұрақтандыруға елеулі септігін тигізетін трафиктің сипаттамалары анықтап, сынақ барысында өңдеу қажет деген қорытынды жасалады. Бұл мақала трафикті талдауды бағалаудағы және нәтижелерді қолданбалы ғылымға қолданудағы алғашқы зерттеу болып табылады.

Түйін сөздер: трафик классификациялау, трафикті талдау, WhatsApp хабар алмасу қосымшасы

**Д. С. ШИНГИСОВ, В. Ю. ГОЙХМАН, А. Р. ЛАВРОВА, Ш. Ж. СЕИЛОВ,
Е. Ш. ЖУРСИНБЕК**

¹докторант по специальности «Информационные системы» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

²Доцент кафедры инфокоммуникационных систем федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Санкт-Петербург, Россия

²Магистр кафедры инфокоммуникационных систем федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Санкт-Петербург, Россия

¹Декан факультета информационных технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

¹Магистрант по специальности «Информационная безопасность» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА WHATSAPP

В статье рассмотрены основные методы классификации трафика, описаны функциональная схема испытательного стенда и процедура тестирования. Приведены результаты проверки гипотезы о стабильности распределений характеристик трафика WhatsApp. Результаты тестирования, представленные в этой статье, подчеркивают влияние определенных характеристик трафика на конечную форму распределения трафика. Вдобавок, сравнение результатов, полученных для всего набора тестов, и результатов, полученных для отдельных наборов тестов, показывает недостаток других критических характеристик трафика, значительно влияющих на форму конечного распределения для выявления стабильного поведения. Следовательно, упомянутое выше приводит к необходимости дальнейших исследований. В статье делается вывод о том, что стабильное поведение распределения характеристик трафика WhatsApp может быть получено и визуализировано в том случае, когда будут выявлены и обработаны многие критичные характеристики трафика в аналогичных тестах. Эта статья представляет собой пионерское исследование в области оценки анализа трафика и внедрения результатов в прикладную науку.

Ключевые слова: классификация трафика, анализ трафика, приложение для обмена сообщениями WhatsApp.

УДК 517

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.122>

А. М. АБЫЛАЕВА*, Б. Н. СЕЙЛБЕКОВ, А. О. БАЙАРЫСТАНОВ

*Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева,
г.Нур-Султан, Казахстан*

e-mail: abylayeva_b@mail.ru, bolat_3084@mail.ru, oskar_62@mail.ru

КОМПАКТНОСТЬ ОДНОГО КЛАССА ОПЕРАТОРА ДРОБНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМ ВЕРХНИМ ПРЕДЕЛОМ

В статье устанавливается характеристика компактности дробных операторов общего класса, включающих операторы Римана-Лиувилля, Адамара и Эрдейи-Кобера. В работе рассматривается интегральный оператор дробного интегрирования типа Харди с неотрицательными ядрами и с переменным пределом интегрирования (функцией в качестве верхнего предела интегрирования), для которого при определенных условиях на ядро получен критерий компактности оператора в весовых пространствах Лебега, когда параметры пространств удовлетворяют условиям: $1 < p \leq q < \infty$, $\frac{1}{p} < \alpha < 1$ и $\beta \geq 0$. При этом для весового дифференциального неравенства

типа Харди на множестве локально абсолютно непрерывных функций, обращающихся в нуль и в бесконечность на концах интервала, получены более общие результаты, охватывающие ранее известные, и даны более точные оценки для наилучшей постоянной. При доказательстве основной теоремы использовались метод локализации, теорема Шаудера, признак Канторовича и теорема о равномерном пределе компактных операторов. Полученные результаты исследования вопроса компактности операторов дробного интегрирования могут быть применены в оценке решений дифференциальных уравнений, моделирующих различные процессы в математике. В частности, из этих результатов вытекают новые результаты в теории неравенств типа Харди.

Ключевые слова: *интегральный оператор, пространство Лебега, компактность, весовая функция.*

Введение. Пусть $1 < p, q < \infty$ и v, w – весовые функции, т.е. неотрицательные, измеримые и локально суммируемые на $I = (0, +\infty)$, т.е. $v \in L_1^{loc}(I)$, $w \in L_1(0, t)$, $\forall t > 0$. Положим $W(x) = \int_0^x w(s)ds$, $x > 0$. Пусть функция φ неотрицательная, строго возрастающая, локально абсолютно непрерывная функция: $\lim_{x \rightarrow 0} \varphi(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow \infty} \varphi(x) = \infty$ и $\varphi(x) \leq x$, $\forall x \in I$.

* E-mail корреспондирующего автора: abylayeva_b@mail.ru

В этой работе рассмотрим вопрос о компактности из $L_{p,w} \equiv L_{p,w}(I)$ в $L_{q,v} \equiv L_{q,v}(I)$ интегрального оператора

$$T_\varphi f(x) = \int_0^{\varphi(x)} \frac{u(s)W^\beta(s)f(s)w(s)ds}{(W(x) - W(s))^{1-\alpha}}, \quad x \in I, \tag{1}$$

где $L_{p,w}$ – пространство всех измеримых на I функции таких, что

$$\|f\|_{p,w} = \left(\int_0^\infty |f(s)|^p w(s)ds \right)^{\frac{1}{p}} < \infty, \quad 1 < p < \infty.$$

Если весовая функция $u(s) = 1$ и $\beta = 0$, тогда интегральный оператор (1) имеет вид:

$$K_{\alpha,\varphi} f(x) := \int_0^{\varphi(x)} \frac{f(s)w(s)ds}{(W(x) - W(s))^{1-\alpha}}, \quad x \in I$$

ограниченность и компактность этого оператора из $L_{p,w} \equiv L_{p,w}(I)$ в $L_{q,v} \equiv L_{q,v}(I)$ исследованы в работе [1]. Случай, когда верхний предел интеграла $\varphi(x) = x$, критерий ограниченности и компактности интегрального оператора (1) из $L_{p,w} \equiv L_{p,w}(I)$ в $L_{q,v} \equiv L_{q,v}(I)$ получены в работе [2].

В работе [3] мы получили ограниченность оператора (1) из $L_{p,w}$ в $L_{q,v}$.

При $\varphi(x) = x$ и $\alpha \geq 1$ вопрос ограниченности оператора типа (1), содержащего оператор Римана-Лиувилля из $L_{p,w}$ в $L_{q,v}$, вытекает из результатов работы [4-6] и поэтому в этой работе мы рассматриваем случай $0 < \alpha < 1$.

Для любого линейного оператора $T_\varphi : L_{p,w} \rightarrow L_{q,v}$ для удобства положим $\|T_\varphi\| = \|T_\varphi\|_{L_{p,w} \rightarrow L_{q,v}}$.

В рамках работы неопределенности вида $0 \cdot \infty, \frac{0}{0}, \frac{\infty}{\infty}$ полагаются равными нулю, соотношение вида $A \ll B$ означает $A \leq \beta B$, где некоторая положительная постоянная β , быть может, зависит от фиксированных параметров, а соотношение $A \approx B$ интерпретируется, как $A \ll B \ll A$. Z – множество всех целых чисел, p' – число, сопряженное к числу $1 < p < \infty$, т.е. $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$.

Вспомогательные утверждения. Для доказательства основных утверждений нам необходимы некоторые факты. Наряду с оператором (1), рассмотрим оператор

$$H_\varphi f(x) = \frac{1}{W^{1-\alpha}(x)} \int_0^{\varphi(x)} u(s)W^\beta(s)f(s)w(s)ds, \quad \varphi(x) \leq x, \quad \forall x \in I.$$

Легко видеть, что для $f \geq 0$

$$T_\varphi f(x) \geq H_\varphi f(x). \tag{2}$$

Из результатов работы [7] следует:

Лемма А: Пусть $1 < p \leq q < \infty$, $\alpha > 0$. Оператор H_φ ограничен из $L_{p,w}$ в $L_{q,v}$ тогда и только тогда, когда $A_\varphi = \sup_{z \in I} A_\varphi(z) < \infty$,

$$\text{где } A_\varphi(z) = \left(\int_0^{\varphi(z)} u^{p'}(s) W^{p\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_z^\infty W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}}, \text{ при этом } A_\varphi \approx \|H_\varphi\|.$$

Лемма В: Пусть $0 < \beta < 1$ и функция $\gamma(\cdot)$ определена на I , причем $0 < \gamma(x) \leq 1$, $\forall x \in I$. Тогда

$$\int_0^{\gamma(x)} \frac{dz}{(1-z)^{1-\beta}} \leq \frac{\gamma(x)}{\beta}, \forall x \in I.$$

Действительно, используя неравенство $(1 - \gamma(x))^\beta \geq 1 - \gamma(x)$, имеем

$$\int_0^{\gamma(x)} \frac{dz}{(1-z)^{1-\beta}} = \frac{1}{\beta} [1 - (1 - \gamma(x))^\beta] \leq \frac{1}{\beta} [1 - (1 - \gamma(x))] = \frac{\gamma(x)}{\beta}.$$

Основные результаты.

Теорема 1: Пусть $0 < \alpha < 1$, $\frac{1}{\alpha} < p \leq q < \infty$, $\beta \geq 0$. Пусть u – невозрастающая функция на I . Оператор T_φ компактен из $L_{p,w}$ в $L_{q,v}$ тогда и только тогда, если

$$\text{а) } A_\varphi = \sup_{s>0} A_\varphi(s) < \infty \text{ и б) } \lim_{s \rightarrow 0^+} A_\varphi(s) = \lim_{s \rightarrow \infty^-} A_\varphi(s) = 0.$$

Доказательство. Необходимость. Условие а) тривиально следует из теоремы [3], то есть из (2) следует неравенство $\|T_\varphi\| \geq \|H_\varphi\|$. Тогда в силу леммы А $\|T_\varphi\| \gg A_\varphi$.

Теперь докажем условие б) Для $0 < s < \infty$ рассмотрим семейство функций $\{f_s\}_{s>0}$, где

$$f_s(x) = \chi_{(0;\varphi(s))}(x) u^{p'-1}(x) W^{(p'-1)\beta}(x) \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(t) W^{p\beta}(t) w(t) dt \right)^{-\frac{1}{p}}, x \in I. \tag{3}$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} \|f_s\|_{p,w} &= \left(\int_0^\infty |f_s(x)|^p w(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\int_0^{\varphi(s)} |f_s(x)|^p w(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{(p'-1)p}(x) W^{p(p'-1)\beta}(x) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(t) W^{p\beta}(t) w(t) dt \right)^{-1} w(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} = \end{aligned} \tag{4}$$

$$= \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(t)W^{p'\beta}(t)w(t)dt \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(x)W^{p'\beta}(x)w(x)dx \right)^{\frac{1}{p}} = 1$$

Покажем, что семейство функции (3) слабо сходится к нулю в $L_{p,w}$. В силу теоремы ([8], VI, §2)) об общем виде линейных непрерывных функционалов на $L_{p,w}$, что имеют вид: $\int_0^{\infty} f(x)g(x)dx$, где $g \in L_{p',w^{1-p'}}$.

Поэтому, используя неравенство Гельдера с показателями p и $p' = \frac{p}{p-1}$ и с учетом (4), имеем:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} f_s(x)g(x)dx &= \int_0^{\varphi(s)} f_s(x)g(x)dx \leq \left(\int_0^{\varphi(s)} |f_s(x)|^p w(x)dx \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_0^{\varphi(s)} |g(x)|^{p'} w^{1-p'}(x)dx \right)^{\frac{1}{p'}} \\ &\leq \left(\int_0^{\infty} |f_s(x)|^p w(x)dx \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_0^{\varphi(s)} |g(x)|^{p'} w^{1-p'}(x)dx \right)^{\frac{1}{p'}} = \left(\int_0^{\varphi(s)} |g(x)|^{p'} w^{1-p'}(x)dx \right)^{\frac{1}{p'}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как $g \in L_{p',w^{1-p'}}$ то последний интеграл в (5) стремится к нулю, при $s \rightarrow 0$, что означает слабую сходимости $f_s \rightarrow 0$, при $s \rightarrow 0$.

Так как компактный оператор в банаховом пространстве всякую слабо сходящуюся последовательность переводит в сильно сходящуюся, ([9], VI, 5.), то

$$\lim_{s \rightarrow 0} \|T_{\varphi} f_s\|_{q,v} = 0. \quad (6)$$

Имеем:

$$\begin{aligned} \|T_{\varphi} f_s\|_{q,v}^q &= \int_0^{\infty} v(x) \left(\int_0^{\varphi(x)} \frac{u(t)W^{\beta}(t)f_s(t)w(t)dt}{(W(x) - W(t))^{1-\alpha}} \right)^q dx \geq \int_s^{\infty} v(x) \left(\int_0^{\varphi(x)} \frac{u(t)W^{\beta}(t)f_s(t)w(t)dt}{(W(x) - W(t))^{1-\alpha}} \right)^q dx \\ &\geq \int_s^{\infty} \frac{v(x)dx}{W^{q(1-\alpha)}(x)} \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(t)W^{p'\beta}(t)w(t)dt \right)^{\frac{q}{p}} \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(\tau)W^{p'\beta}(\tau)w(\tau)d\tau \right)^q \\ &= \int_s^{\infty} W^{q(\alpha-1)}(x)v(x)dx \left(\int_0^{\varphi(s)} u^{p'}(t)W^{p'\beta}(t)w(t)dt \right)^{\frac{q}{p'}} = A_{\varphi}^q(s). \end{aligned} \quad (7)$$

Так как $\varphi(x) \leq x$, из (6) и (7) следует, что $\lim_{s \rightarrow 0} A_{\varphi}(s) = 0$.

Осталось показать, что $\lim_{s \rightarrow \infty} A_{\varphi}(s) = 0$.

Из компактности оператора $T_{\varphi} : L_{p,w} \rightarrow L_{q,v}$ следует компактность сопряженного оператора

$$T_{\varphi}^* g(s) = u(s)W^{\beta}(s)w(s) \int_{\varphi^{-1}(s)}^{\infty} \frac{g(x)dx}{(W(x) - W(s))^{1-\alpha}}, \quad x \in I \text{ из } L_{q',v^{1-q'}} \text{ в } L_{p',w^{1-p'}}.$$

Для $0 < s < \infty$ введем семейство функций:

$$g_s(x) = \chi_{[s; \infty)}(x) \left(\int_s^\infty W^{q(\alpha-1)}(\tau) v(\tau) d\tau \right)^{-\frac{1}{q'}} W^{(q-1)(\alpha-1)}(x) v(x), \quad x \in I. \quad (8)$$

Эти функции корректно определены, поскольку интегралы, входящие в них, конечны в силу условия $A_\Phi < \infty$. Покажем, что для любого $s > 0$ функции $g_s \in L_{q', v^{1-q'}}$, более того, что g_s слабо сходится к нулю, при $s \rightarrow \infty$.

Также как в (4), находим норму функции (8), то есть $\|g_s\|_{q', v^{1-q'}}$. Действительно,

$$\begin{aligned} \|g_s\|_{q', v^{1-q'}} &= \left(\int_0^\infty |g_s(x)|^{q'} v^{1-q'}(x) dx \right)^{\frac{1}{q'}} = \left(\int_s^\infty |g_s(x)|^{q'} v^{1-q'}(x) dx \right)^{\frac{1}{q'}} \\ &= \left(\int_s^\infty \left(\int_s^\infty W^{q(\alpha-1)}(\tau) v(\tau) d\tau \right)^{-1} W^{q(q-1)(\alpha-1)}(x) v^{q'}(x) v^{1-q'}(x) dx \right)^{\frac{1}{q'}} = 1. \end{aligned}$$

Как и в (5), в силу (8) для $f \in L_{q, v}$, получим:

$$\int_0^\infty g_s(x) f(x) dx \leq \left(\int_s^\infty |f(x)|^q v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \left(\int_s^\infty |g_s(x)|^{q'} v^{1-q'}(x) dx \right)^{\frac{1}{q'}} \leq \left(\int_s^\infty |f(x)|^q v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}}.$$

Так как $f \in L_{q, v}$, то последний интеграл стремится к нулю, при $s \rightarrow \infty$, что показывает слабую сходимости $g_s \rightarrow 0$ в $L_{q', v^{1-q'}}$, при $s \rightarrow \infty$.

В силу компактности $T_\Phi^* : L_{q', v^{1-q'}} \rightarrow L_{p', w^{1-p'}}$, следует

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \|T_\Phi^* g_s\|_{p', w^{1-p'}} = 0. \quad (9)$$

К тому же

$$\begin{aligned} \|T_\Phi^* g_s\|_{p', w^{1-p'}} &= \left(\int_0^\infty w^{1-p'}(t) \left| u(t) W^\beta(t) w(t) \int_{\Phi^{-1}(t)}^\infty \frac{g_s(x) dx}{(W(x) - W(t))^{1-\alpha}} \right|^{p'} dt \right)^{\frac{1}{p'}} \\ &\geq \left(\int_0^{\Phi(s)} u^{p'}(t) W^{p'\beta}(t) w(t) dt \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_s^\infty W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} = A_\Phi(s). \end{aligned}$$

Из (9) вытекает: $\lim_{s \rightarrow \infty} A_\Phi(s) = 0$. Таким образом, необходимость доказана.

Достаточность. Для $0 < a < b < \infty$ и для всех $f \geq 0$ положим

$$P_a f = \chi_{(0;a]} f, P_{ab} f = \chi_{(a;b]} f, Q_b f = \chi_{[b; \infty)} f.$$

Тогда $f = P_a f + P_{ab} f + Q_b f$ и

$$\begin{aligned} T_\varphi f &= (P_a + P_{ab} + Q_b) T_\varphi f = (P_a + P_{ab}) T_\varphi (P_a + P_{ab} + Q_b) f + Q_b T_\varphi Q_b f \\ &= P_a T_\varphi P_a f + P_a T_\varphi P_{ab} f + P_a T_\varphi Q_b f + P_{ab} T_\varphi P_a f + P_{ab} T_\varphi P_{ab} f + P_{ab} T_\varphi Q_b f + Q_b T_\varphi Q_b f \end{aligned}$$

Так как $P_a T_\varphi P_{ab} \equiv 0, P_a T_\varphi Q_b \equiv 0, P_{ab} T_\varphi Q_b \equiv 0$, то

$$T_\varphi f = P_a T_\varphi P_a f + P_{ab} T_\varphi P_a f + P_{ab} T_\varphi P_{ab} f + Q_b T_\varphi Q_b f. \tag{10}$$

Покажем, что оператор $P_{ab} T_\varphi P_{ab}$ компактен из $L_{p,w}(I)$ в $L_{q,v}(I)$.

Так как $P_{ab} T_\varphi P_{ab} f(x) = P_{ab} T_\varphi \chi_{(a;b]}(x) f(x) \neq 0$ при $x \in (a;b]$, то достаточно показать, что оператор $P_{ab} T_\varphi P_{ab}$ компактен из $L_{p,w}(a,b)$ в $L_{q,v}(a,b)$, а это в свою очередь эквивалентно компактности оператора $Tf(x) = \int_a^b K(x,s) f(s) ds$ из $L_p(a,b)$ в $L_q(a,b)$ с ядром

$$K(x,s) = \frac{u(s) W^\beta(s) v^{\frac{1}{q}}(x) \chi_{(a;b]}(s) \theta(\varphi(x) - s) w^{\frac{1}{p'}}(s)}{(W(x) - W(s))^{1-\alpha}},$$

где $\theta(z)$ – функция Хевисайда, (это означает что $\theta(z) = 1$ для $z \geq 0$ и $\theta(z) = 0$ для $z < 0$).

Пусть $\{x_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ – последовательность точек, определенные в доказательстве теоремы 1 из [3]. Есть точки $x_i, x_{n+1}, x_i < x_{n+1}$ такие, что $x_i \leq a < x_{i+1}, x_n < b \leq x_{n+1}$. Мы предполагаем, что числа a, b выбраны так, что $x_i < x_n$. Поэтому, сделав замену переменной $W(s) = W(x)t$ в приведенном ниже интеграле и применив лемму В:

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(\int_a^b |K(x,s)|^{p'} ds \right)^{\frac{q}{p'}} dx &= \int_a^b v(x) \left(\int_a^{\varphi(x)} \frac{\chi_{(a;b]}(s) u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds}{(W(x) - W(s))^{(1-\alpha)p'}} \right)^{\frac{q}{p'}} dx \\ &\leq \sum_{k=i}^n \int_{x_k}^{x_{k+1}} v(x) \left(\int_0^{\varphi(x_{k-1})} \frac{u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds}{(W(x) - W(\varphi(x_{k-1})))^{(1-\alpha)p'}} \right)^{\frac{q}{p'}} dx \\ &+ \sum_{k=i}^n \int_{x_k}^{x_{k+1}} v(x) u^q(\varphi(x_{k-1})) W^{q\beta}(\varphi(x)) \left(\int_{\varphi(x_{k-1})}^{\varphi(x)} \frac{w(s) ds}{(W(x) - W(s))^{(1-\alpha)p'}} \right)^{\frac{q}{p'}} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq A_\phi^q \mu(n-i+1) + \sum_{k=i}^n \int_{x_k}^{x_{k+1}} W^{q(\alpha-1)}(x)v(x)dx u^q(\phi(x_{k-1})) \left(W^{\beta p'+1}(\phi(x_{k+1})) \right)^{\frac{q}{p'}} \\ &\leq A_\phi^q \mu(n-i+1) + (\beta p'+1) 2^{2\beta q + \frac{q}{p'}} \sum_{k=i}^n \left(\sup_{x_k > 0} \left(\int_{x_k}^\infty W^{q(\alpha-1)}(x)v(x)dx \right)^{\frac{1}{q}} \left(\int_0^{\phi(x_k)} u^{p'}(s)W^{\beta p'}(s)w(s)ds \right)^{\frac{1}{p'}} \right)^q \\ &\ll \mu(n-i+1)A_\phi^q < \infty, \text{ где } \sum_{k=i}^n 1 = \mu(n-i+1). \end{aligned}$$

Следовательно, по признаку Канторовича ([8], XI, §3), оператор T компактен из $L_{p,w}(a,b)$ в $L_{q,v}(a,b)$, что равносильно компактности из $L_{p,w}$ в $L_{q,v}$ оператора $P_{ab}T_\phi P_{ab}$.

Из (10) имеем

$$\|T_\phi - P_{ab}T_\phi P_{ab}\| \leq \|P_a T_\phi P_a\| + \|P_{ab} T_\phi P_a\| + \|Q_b T_\phi Q_b\| \tag{11}$$

Покажем, что правая часть (11) стремится к нулю при $a \rightarrow 0$ и $b \rightarrow \infty$. Тогда оператор T_ϕ , как равномерный предел компактных операторов ([9], VI.12) будет компактен из $L_{p,w}$ в $L_{q,v}$.

$$\begin{aligned} &\|P_a T_\phi P_a f\|_{q,v}^q = \int_0^a v(x) \left| \int_0^{\phi(x)} \frac{u(s)W^\beta(s)f(s)w(s)ds}{(W(x)-W(s))^{1-\alpha}} \right|^q dx \\ &= \sum_k \int_{x_k}^{x_{k+1}} v(x) \left| \int_0^{\phi(x_{k-1})} \frac{u(s)W^\beta(s)f(s)w(s)ds}{(W(x)-W(s))^{1-\alpha}} + \int_{\phi(x_{k-1})}^{\phi(x)} \frac{u(s)W^\beta(s)f(s)w(s)ds}{(W(x)-W(s))^{1-\alpha}} \right|^q dx := F_1 + F_2. \end{aligned}$$

На основании теоремы 1 из работы [3] известно, что $F_1 \ll \sup_{z \in I} A_\phi^q(z) \|f\|_{p,w}^q$, $F_2 \ll \sup_{z \in I} A_\phi^q(z) \|f\|_{p,w}^q$. Тогда получаем оценку

$$\|P_a T_\phi P_a f\|_{q,v} \ll \sup_{0 < z < a} A_\phi(z) \cdot \|f\|_{p,w}.$$

Следовательно, $\|P_a T_\phi P_a\| \ll \sup_{0 < z < a} A_\phi(z)$. Откуда

$$\lim_{a \rightarrow 0+} \|P_a T_\phi P_a\| \ll \lim_{a \rightarrow 0+} \sup_{0 < z < a} A_\phi(z) = \lim_{z \rightarrow 0+} A_\phi(z) = 0. \tag{12}$$

Далее, также оцениваем следующее слагаемое

$$\|Q_b T_\phi Q_b f\|_{q,v} = \left(\int_b^\infty v(x) \left| \int_0^{\phi(x)} \frac{u(s)W^\beta(s)f(s)w(s)ds}{(W(x)-W(s))^{1-\alpha}} \right|^q dx \right)^{\frac{1}{q}}$$

$$\lll \sup_{b < z < \infty} \left(\int_0^{\varphi(z)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_b^{\infty} W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \cdot \|f\|_{p,w} = \sup_{b < z < \infty} A_{\varphi}(z) \cdot \|f\|_{p,w} .$$

В результате имеем:

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \|Q_b T_{\varphi} Q_b\| \lll \lim_{z \rightarrow \infty} A_{\varphi}(z) = 0 . \tag{13}$$

Теперь мы докажем, что $\lim_{a \rightarrow 0+} \|P_{ab} T_{\varphi} P_a\| = 0$.

Положим $v_{\varepsilon}(x) = \varepsilon v(x)$ для $x \in (0; a)$, $v_{\varepsilon}(x) = v(x)$ для $x \in [a; b]$ и $u_{\varepsilon}(x) = u(x)$ для $x \in (0; a]$ и $u_{\varepsilon}(x) = \varepsilon \cdot u(x)$ для $x \in (a; \varphi(b)]$, где $\forall \varepsilon > 0$. По условию $\varphi(x) \leq x$ и $\lim_{x \rightarrow 0+} \varphi(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow \infty} \varphi(x) = \infty$. Поэтому, в силу непрерывности φ , существует $b_1 = b_1(a) \geq a$ такой, что $\varphi(b_1) = a$. Не ограничивая общности, предположим $a \leq b_1 < b$. Из свойства функции φ следует $\lim_{a \rightarrow 0+} b_1(a) = 0$ и $\lim_{a \rightarrow 0+} \varphi(b_1) = 0$. Пусть $\theta(z)$ – функция Хевисайда, (это означает что $\theta(z) = 1$ для $z \geq 0$ и $\theta(z) = 0$ для $z < 0$). Очевидно, что функция u_{ε} – невозрастающая на I . Тогда, согласно теореме 1, в работе [3] имеем

$$\begin{aligned} \|P_{ab} T_{\varphi} P_a f\|_{q,v} &= \left(\int_a^b v(x) \left| \int_0^{\varphi(x)} \frac{\theta(a-s) u(s) W^{\beta}(s) f(s) w(s) ds}{(W(x) - W(s))^{1-\alpha}} \right|^q dx \right)^{\frac{1}{q}} \\ &\leq \left(\int_0^b v_{\varepsilon}(x) \left| \int_0^{\varphi(x)} \frac{u_{\varepsilon}(s) W^{\beta}(s) f(s) w(s) ds}{(W(x) - W(s))^{1-\alpha}} \right|^q dx \right)^{\frac{1}{q}} \lll A_{\varphi}^{(\varepsilon)} \|f\|_{p,w} , \end{aligned} \tag{14}$$

$$\text{где } A_{\varphi}^{(\varepsilon)} = \sup_{0 < z < b} \left(\int_0^{\varphi(z)} u_{\varepsilon}^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_z^b W^{q(\alpha-1)}(x) v_{\varepsilon}(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} .$$

Теперь оценим $A_{\varphi}^{(\varepsilon)}$ сверху

$$\begin{aligned} A_{\varphi}^{(\varepsilon)} &\leq \sup_{b_1 < z < b} \left(\int_0^{\varphi(z)} u_{\varepsilon}^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_z^b W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \\ &+ \sup_{0 < z < b_1} \left(\int_0^{\varphi(z)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_z^b W^{q(\alpha-1)}(x) v_{\varepsilon}(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} = A_{\varphi,1}^{(\varepsilon)} + A_{\varphi,2}^{(\varepsilon)} . \end{aligned} \tag{15}$$

Оценим $A_{\varphi,1}^{(\varepsilon)}$ и $A_{\varphi,2}^{(\varepsilon)}$ по отдельности

$$A_{\varphi,1}^{(\varepsilon)} \leq \sup_{b_1 < z < b} \left(\int_{\varphi(b_1)}^{\varphi(z)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_z^b W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \varepsilon + \left(\int_0^{\varphi(b_1)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \times$$

$$\times \left(\int_{b_1}^b W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \leq \left(\int_{\varphi(b_1)}^{\varphi(b)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_{b_1}^b W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \varepsilon + A_{\varphi}(b_1). \quad (16)$$

Теперь оценим $A_{\varphi,2}^{(\varepsilon)}$:

$$A_{\varphi,2}^{(\varepsilon)} \leq \left(\int_0^{\varphi(b_1)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_{b_1}^b W^{q(\alpha-1)}(x) v_{\varepsilon}(x) dx \right)^{\frac{1}{q}}$$

$$+ \sup_{0 < z < b_1} \left(\int_0^{\varphi(z)} u^{p'}(s) W^{p'\beta}(s) w(s) ds \right)^{\frac{1}{p'}} \left(\int_z^{b_1} W^{q(\alpha-1)}(x) v(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \cdot \varepsilon^{\frac{1}{q}} = A_{\varphi}(b_1) + \sup_{0 < z < b_1} A_{\varphi}(z) \cdot \varepsilon^{\frac{1}{q}}.$$

Так как левая часть (14) не зависит от $\varepsilon > 0$, поэтому в (14), устремив $\varepsilon \rightarrow 0$ из (15), (16) и (17), имеем $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} A_{\varphi}^{(\varepsilon)} \leq 2A_{\varphi}(b_1)$. Следовательно, из (14) получим $\|P_{ab} T_{\varphi} P_a\| \ll A_{\varphi}(b_1)$. Откуда

$$\lim_{a \rightarrow 0+} \|P_{ab} T_{\varphi} P_a\| \ll \lim_{a \rightarrow 0+} A_{\varphi}(b_1) = 0. \quad (18)$$

Из (12), (13) и (18) следует, что правая часть (11) стремится к нулю при $a \rightarrow 0$ и $b \rightarrow \infty$. Теорема полностью доказана.

Работа над статьей выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки РК, проект: ИРН AP08856339 (приоритетное направление "Научные исследования в области естественных наук").

ЛИТЕРАТУРА

1 Abylayeva A. Boundedness and compactness of the Hardy type operator with variable upper limit in weighted Lebesgue spaces. // *Mathematical Inequalities Applications*. V.23, №3 (2020), 805-819; doi: 10.7153/mia-2020-23-66.

2 Abylayeva A., Oinarov R., and Persson L.-E. Boundedness and compactness of a class of Hardy type operators. *Journal of Inequal. and Appl. (JIA)*, № 324, 2016.

3 Абылаева А.М., Сейлбеков Б.Н., Ограниченность одного оператора дробного интегрирования с переменным верхним пределом. *КазНПУ вестник №3 (67)*, 2019. -С.7-11.

4 Ойнаров Р. Двусторонние оценки нормы некоторых классов интегральных операторов // *Труды МИ РАН*. - 1993. Т. 204, - С. 240-250.

5 Степанов В.Д. Двухвесовые оценки интегралов Римана-Лиувилля// *Изв. АН СССР. Серия физ.-мат.* 1990. Е.54, №3, -С.645-655.

6 Степанов В.Д. О весовом неравенстве типа Харди для дробных интегралов Римана-Лиувилля// *Сиб. мат. Журнал* 1990. Т.31, №3, -С.186-197.

7. Stepanov V.D., Ushakova E.P. Kernel operators with variable intervals of integration in Lebesgue spaces and applications // *Math. Inequal. Appl.*, –2010. 13:3. –P. 449–510.
8. Канторович Л.В., Акилов Г.Р. Функциональный анализ. М.: Наука 1977.
9. Рид М. Сайман Б. Методы современной математической физики. М. Мир. Т.1.1977.

REFERENCES

- 1 Abylayeva A. Boundedness and compactness of the Hardy type operator with variable upper limit in weighted Lebesgue spaces. // *Mathematical Inequalities Applications*. V.23, №3 (2020), 805-819; doi: 10.7153/mia-2020-23-66.
- 2 Abylayeva A., Oinarov R., and Persson L.-E. Boundedness and compactness of a class of Hardy type operators. *Journal of Inequal. and Appl.* (JIA), № 324, 2016.
- 3 Abylayeva A.M., Sejlbekov B.N., Ogranichennost' odnogo operatora drobnogo integrirovaniya s peremennim verhnim predelom. *KazNPU vestnik* №3 (67), 2019. -S.7-11.
- 4 Ojnarov R. Dvustoronnie ocenki normy nekotoryh klassov integral'nyh operatorov // *Trudy MI RAN*. - 1993. T. 204, - S. 240-250.
- 5 Stepanov V.D. Dvuhvesovye ocenki integralov Rimana-Liuvillya // *Izv. AN SSSR. Seriya fiz.-mat.* 1990. E.54, №3, -S.645-655.
- 6 Stepanov V.D. O vesovom neravenstve tipa Hardi dlya drobnih integralov Rimana-Liuvillya // *Sib. mat. Zhurnal* 1990. T.31, №3, -S.186-197.
- 7 Stepanov V.D., Ushakova E.P. Kernel operators with variable intervals of integration in Lebesgue spaces and applications // *Math. Inequal. Appl.*, –2010. 13:3. –P. 449–510.
- 8 Kantorovich L.V., Akilov G.R. *Funkcional'nyj analiz*. М.: Nauka 1977.
- 9 Rid M. Sajman B. *Metody sovremennoj matematicheskoy fiziki*. М. Мир. Т.1.1977.

А. М. АБЫЛАЕВА, Б. Н. СЕЙЛБЕКОВ, А. О. БАЙАРЫСТАНОВ

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

БІР КЛАСТАҒЫ ЖОҒАРҒЫ ШЕГІ АЙНЫМАЛЫ БОЛАТЫН БӨЛШЕК РЕТТІ ИНТЕГРАЛДЫҚ ОПЕРАТОРДЫҢ КОМПАКТЫЛЫҒЫ

Мақалада жалпы кластың бөлшек ретті интегралдық операторларының, оның ішінде Риман-Лиувилль, Адамар және Эрдейи-Кобер операторларының компакттылық сипаттамасы алынады. Бұл жұмыста Харди типтес бөлшек ретті интегралдық операторының ядросы теріс емес және шегі айнымалы болатын интеграл қарастырылған (интегралдың жоғарғы шегі ретінде функция), ол үшін кеңістіктің параметрлері мынадай шарттарды қанағаттандыратын: $1 < p \leq q < \infty$, $\frac{1}{p} < \alpha < 1$ және $\beta \geq 0$ салмақты Лебег кеңістігінде оператордың ядросына белгілі бір жағдайларға байланысты компакттылық критерийі алынған. Сонымен қатар, интервал соңында нөлге және шексіздікке айналатын локальды абсолютті үзіліссіз функциялар жиынында Харди типтес салмақты дифференциалды теңсіздігі үшін бұрын белгілі болған нәтижелер қамтылып және де ең жақсы тұрақты үшін дәлірек бағалаулар алынады. Негізгі теореманы дәлелдеу үшін локализация әдісі, Шаудер теоремасы, Канторович қасиеті және компакттылық операторлардың бірқалыпты шегі туралы теорема қолданылды. Бөлшек ретті интегралдау операторларының компакттылығы туралы мәселені зерттеуден алынған нәтижелерін математикадағы әр түрлі процестерді модельдейтін дифференциалдық теңдеулер шешімдерін бағалауда қолдануға болады.

Атап айтқанда, бұл нәтижелер Харди типіндегі теңсіздіктер теориясында жаңа нәтижелер береді.

Түйін сөздер: интегралдық оператор, Лебег кеңістігі, компактылық, салмақты функция.

A. M. ABYLAYEVA, B. N. SEILBEKOV, A. O. BAIARYSTANOV

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

COMPACTNESS OF ONE CLASS OF FRACTIONAL INTEGRATING OPERATOR WITH VARIABLE UPPER LIMIT

The paper establishes a characterization of the compactness for fractional operators of a general class, including the Riemann-Liouville, Hadamard and Erdelyi-Kober operators. The paper considers an integral fractional integration operator of Hardy type with nonnegative kernels and a variable limit of integration (a function as the upper limit of integration) and under certain conditions on the kernel, a criterion of the compactness in weighted Lebesgue spaces is obtained for this operator, when the parameters of the spaces satisfy the conditions $1 < p \leq q < \infty$, $\frac{1}{p} < \alpha < 1$ and $\beta \geq 0$. Moreover, more general results are

obtained for the weighted differential inequality of Hardy type on the set of locally absolutely continuous functions that vanish and infinity at the ends of the interval, covering the previously known results, and more precise estimates for the best constant are given. The localization method, Schauder's theorem, the Kantorovich test, and the theorem on the uniform limit of compact operators were used in the proof of the main theorem. The obtained results of the study the compactness of fractional integration operators can be used in the estimation of solutions of differential equations that model various processes in mathematics. In particular, these results yield new results in the theory of Hardy-type inequalities.

Keywords: integral operator; Lebesgue space, compactness, weighted function.

B. T. ZHUMAGULOV¹, D. B. ZHAKEBAYEV^{1,2*}, A. S. ZHUMALI^{1,2}, B. A. SATENOVA²

¹*National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan*

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

LBM MODELING OF SOLID PARTICLE DYNAMICS IN A VISCOUS MEDIUM

This article discusses the mathematical and computer modeling of single solid particle dynamics in a viscous medium. The results of the study were obtained using a 3D numerical algorithm implemented on the basis of the D3Q19 model of the lattice Boltzmann method (LBM). The moving «liquid-solid» interface is accounted for using an interpolated bounce back (IBB) scheme.

The velocity of a solid particle motion and the trajectory of a particle at $Re = 1,56$ are obtained. The results are in good agreement with the experimental and numerical results of other authors.

Keywords: LBM, IBB, D3Q19, solid particle, viscous medium.

Introduction. Fluid-particle systems are of significant scientific and technological interest in a wide range of disciplines. The problem of particle settling in a viscous fluid occurs in many natural and industrial applications such as the oil and paper industry, mineral ore processing, pollutant flow, blood cell transport in the human body, sediment transport, warm rain process, volcanic ash eruptions, dust storms and sea spray. In view of the importance of these applications, the problems of fluid-particle interaction have attracted considerable attention, both experimentally and numerically

Various numerical methods have been used to study solid particle fluxes involving the interaction of a dynamically evolving fluid and suspended solids. To accurately predict flow behavior, it is very important to study the interaction between fluid and particles. The interaction between particle and liquid affects the dynamics of suspended particles (e.g., dispersion, settling rate, collision frequency, settling rate) and bulk properties of multiphase flow (e.g., wall or surface resistance, turbulence intensity).

To date, many different formulations have been developed based on the Navier - Stokes (N - S) equation. The most commonly used numerical models for tracing the particle-liquid interface are: immersed boundary method [1], direct force method [2], local analytical method [3], overset- grid method [4], force - coupling [5] or penalization method [6].

In recent years, the lattice Boltzmann method (LBM) based on kinetic theory has received a lot of attention and has become a reliable tool for modeling problems with complex geometry, such as flow in a porous medium, interaction of fluid structures and turbulent flows loaded with particles [7]. This is a mesoscopic method based on the discrete Boltzmann equation. The main problem in these applications is the handling of the adhesion boundary condition at fluid-solid interfaces, which affects the overall accuracy, numerical stability, and computational efficiency of the lattice Boltzmann method. In LBM, there are two main methods for modeling the sticking boundary condition at fluid-solid interfaces, they are the immersed boundary method (IBM) and the interpolated bounce back method (IBB).

* E-mail корреспондирующего автора: dauren.zhakebayev@gmail.com

Many LBM models have been developed for particle-loaded fluid flows [8]. In particular, for a fixed straight boundary, many different implementations of the boundary condition for velocity have been developed. One of the first interpolated bounce back schemes was proposed by Ladd [9], in which the particle surface is approximated as polylines in the form of a ladder. Previous studies have used a standard (or intermediate) rebound pattern, resulting in a curved boundary effectively approximating a zig-zag staircase. Later, improved proposed various interpolated rebound schemes were developed to more accurately represent the real liquid-solid interface [10]. In the model by Bouzidi et al. [11] a curved boundary scheme has been developed that does not require interpolation from a ghostly node inside a solid. The main idea of the scheme is to interpolate the distribution functions in the interior of the fluid and include additional information about the location of the wall during the rebound process. Recently, a one-node curvilinear boundary scheme was developed to simulate suspended particles, which were determined by Maxwell's iteration [12-13].

Although each boundary processing scheme has been separately tested and applied to different physical problems, as far as we know, they have yet to be systematically compared and evaluated under the same conditions.

The aim of this work is to develop a mathematical model of the settling of solid particles in a viscous fluid using the interpolated bounce back method based on solving Navier-Stokes equation, in which the momentum exchange method is used to find the hydrodynamic force acting on the particle surface. The numerical model is built on the basis of the LBM using the D3Q19 model. The accuracy and efficiency of the existing method have been tested on the basis of the test problem of the settling of a solid particle in a viscous medium. The results obtained are in good agreement with the experimental and numerical results of other authors.

Problem statement. Figure 1 shows the computational domain, which is a parallelepiped. The walls of the parallelepiped are impenetrable. All boundary conditions are constant in this work.

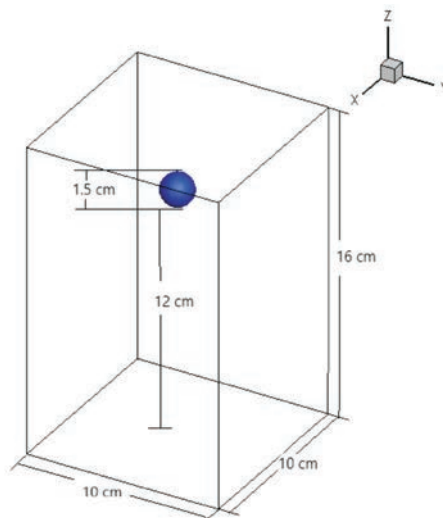


Figure 1 – Computational domain.

The system of equations in three-dimensional space is as follows:

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu_f \Delta \vec{u} \tag{2}$$

where \vec{u} is the velocity vector, p is the pressure, ρ_f is the fluid density, ν_f is the kinematic viscosity and t is the time.

At the initial moment of time, as well as on the walls of the considered region, the fluid flow velocities are equal to zero.

The system of equations (1) - (2) can be reduced to a dimensionless form using the following dimensionless quantities:

$$\vec{x}^* = \frac{\vec{x}}{L}, \quad \vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{U_0}, \tag{3}$$

$$p^* = \frac{pL}{U_0}, \quad t^* = \frac{tU_0}{L}, \quad \operatorname{Re} = \frac{U_0 L}{\nu_f}$$

where \vec{u}^* is the dimensionless velocity components, U_0 is the characteristic velocity, p^* is the dimensionless pressure, t^* is the dimensionless time and Re is the Reynolds number.

The equations take the following dimensionless form:

$$\operatorname{div} \vec{u}^* = 0 \tag{4}$$

$$\operatorname{Re} \left(\frac{\partial \vec{u}^*}{\partial t} + (\vec{u}^* \cdot \nabla) \vec{u}^* \right) = -\nabla p^* + \Delta \vec{u}^* \tag{5}$$

Particle dynamics. The motion of a solid particle in a viscous medium is determined by the following equations:

$$M \frac{d\vec{u}_b}{dt} = \vec{F} - M \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \vec{g}, \tag{6}$$

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \vec{u}_b, \tag{7}$$

where M is the mass of solid particle, ρ_s is the density of solid particle, \vec{F} is the hydrodynamic force acting on a solid particle, \vec{X} is the particle position.

Numerical method. The numerical solution in this work is based on the D3Q19 model of the lattice Boltzmann method [14]. The boundary condition between fluid and solid is determined by the IBB method [11]. The movement of a solid particle is carried out using the momentum exchange method [10].

The lattice Boltzmann equation in the Batnagar-Gross-Krook (BGK) approximation is as follows:

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{x}, t) = -\frac{f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)}{\tau_f}$$

where f_i is the velocity distribution functions, \bar{e}_i is the discrete lattice speed, τ_f is the relaxation time, Δt is the lattice time step, f_i^{eq} is the equilibrium distribution function.

The equilibrium function is defined by the following formula:

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho \left[1 + 3 \frac{\bar{e}_i \bar{u}^{eq}}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(\bar{e}_i \bar{u}^{eq})^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{\bar{u}^{eq} \bar{u}^{eq}}{c^2} \right]$$

where $c = \Delta x / \Delta t$, Δx and Δt are the lattice steps in space and time, which are equal to one. The following shows the weights in all directions:

$$\omega_i = \begin{cases} 1/3, & i = 0, \\ 1/18, & i = 1 - 6, \\ 1/36, & i = 7 - 18, \end{cases}$$

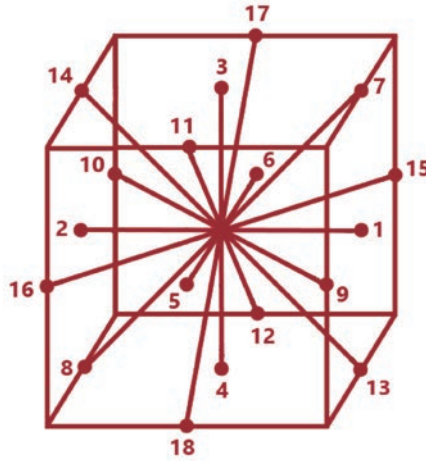


Figure 2 – D3Q19 model.

In the D3Q19 model (Fig. 2), discrete speeds are calculated using the following formula:

$$\bar{e}_i = \begin{cases} (0,0,0)c, & i = 0, \\ (\pm 1, 0, 0)c, (0, \pm 1, 0)c, (0, 0, \pm 1)c, & i = 1 - 6, \\ (\pm 1, \pm 1, 0)c, (\pm 1, 0, \pm 1)c, (0, \pm 1, \pm 1)c, & i = 7 - 18, \end{cases}$$

The evolution equation is divided into two steps, collision and streaming:

1. $\tilde{f}_i(\bar{x}, t) = f_i(\bar{x}, t) - \frac{f_i(\bar{x}, t) - f_i^{eq}(\bar{x}, t)}{\tau_f}$

2. $\bar{f}_i(\bar{x} + \bar{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = \tilde{f}_i(\bar{x}, t)$

After the second step, it is necessary to update the macroparameters (density, velocity) according to the following formulas:

$$\rho = \sum_{i=0}^{18} \bar{f}_i, \quad \rho \bar{u} = \sum_{i=0}^{18} \bar{f}_i \bar{e}_i.$$

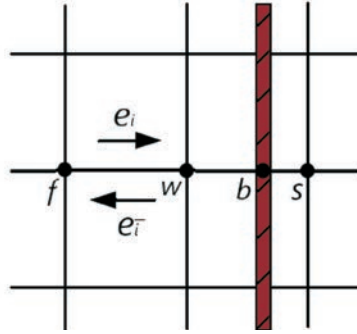


Figure 3 – «Fluid-solid particle» interface.

The following boundary conditions were used to close the system of equations. The bounce back rule was used to process the boundary condition on all walls [14]:

$$f_{\bar{i}}(\bar{x}_w, t + \Delta t) = \tilde{f}_i(\bar{x}_w, t), \quad \bar{e}_i \cdot \bar{n} > 0.$$

The bar above the index indicates the opposite direction.

To obtain the optimal condition at the moving solid-fluid interface, we use Bouzidi's interpolated bounce back scheme [10, 11]:

$$\begin{cases} f_{\bar{i}}(\bar{x}_w, t + \Delta t) = 2q\tilde{f}_i(\bar{x}_w, t) + (1 - 2q)\tilde{f}_i(\bar{x}_f, t) + 2\omega_i\rho_0 \frac{\bar{e}_{\bar{i}} \cdot \bar{u}_b}{c_s^2}, & q \leq 0.5, \\ f_{\bar{i}}(\bar{x}_w, t + \Delta t) = \frac{1}{2q} \left(\tilde{f}_i(\bar{x}_w, t) + 2\omega_i\rho_0 \frac{\bar{e}_{\bar{i}} \cdot \bar{u}_b}{c_s^2} \right) + \frac{2q-1}{2q} \tilde{f}_i(\bar{x}_w, t), & q \geq 0.5, \end{cases}$$

where $q = \frac{\bar{x}_w - \bar{x}_b}{\bar{x}_w - \bar{x}_s}$, \bar{u}_b is the flow velocity on the surface of a solid particle, the location of the nodes $\bar{x}_w, \bar{x}_f, \bar{x}_w, \bar{x}_b, \bar{x}_s$ is shown in Figure 3.

To determine the velocity and location of a solid particle, we approximate equations (6) - (7):

$$\bar{u}_b^{n+1} = \bar{u}_b^n + 0.5\Delta t \frac{\bar{F}^{n+1} + \bar{F}^n}{M} + \Delta t \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \bar{g},$$

$$\bar{X}^{n+1} = \bar{X}^n + 0.5\Delta t (\bar{u}_b^{n+1} + \bar{u}_b^n),$$

To obtain the more accurate results, this article uses the momentum exchange method to find the hydrodynamic force [10]:

$$\vec{F} = \sum_{\vec{x}_w} \sum_i \left(\tilde{f}_i(\vec{x}_w, t) + f_{\vec{i}}(\vec{x}_w, t + \Delta t) \right) \vec{e}_i$$

It remains to find the distribution functions for the new nodes of the fluid that appeared during the displacement of the solid particle. For this, the averaged extrapolation procedure is applied [10]:

$$f_{i,k}(\vec{x}_{new}, t + \Delta t) = 2f_i(\vec{x}_{new} + \vec{e}_k \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{x}_{new} + 2\vec{e}_k \Delta t, t + \Delta t),$$

$$f_i(\vec{x}_{new}, t + \Delta t) = \frac{1}{Nk} \sum_k f_{i,k}(\vec{x}_{new}, t + \Delta t),$$

where k means possible extrapolation directions and Nk is the number of possible extrapolation directions.

Simulation results. Numerical experiments were carried out to simulate the dynamics of a solid particle in a viscous medium. The length, width and height of the computational area are 10×10×16 cm, respectively. At the initial moment of time, the solid sphere hangs at a distance 12 cm from the lower boundary of the parallelepiped (Figure 1). The required physical parameters are shown in Table 1.

Table 1 – Physical parameters

ρ_f	μ_f	U_0	Re	S_i
$\left[\frac{g}{cm^3} \right]$	$\left[\frac{g}{cm \cdot s} \right]$	$\left[\frac{cm}{s} \right]$		
0,97	3,37	4	1,56	2

Figure 4 shows the change in the trajectory of a solid particle depending on time and comparison between LBM simulation and experimental solution obtained by ten Cate et al. [15]. Figure 5 demonstrates the vertical component of particle sedimentation velocity at different time instants in comparison with the experimental solution obtained by ten Cate et al. [15]. As can be seen from the figures, the numerical data agree well with the experimental data. In figures 6 and 7, you can see a 2D plot of vertical velocity profiles of solid particle and a 3D plot of solid particle sedimentation at different points in time.

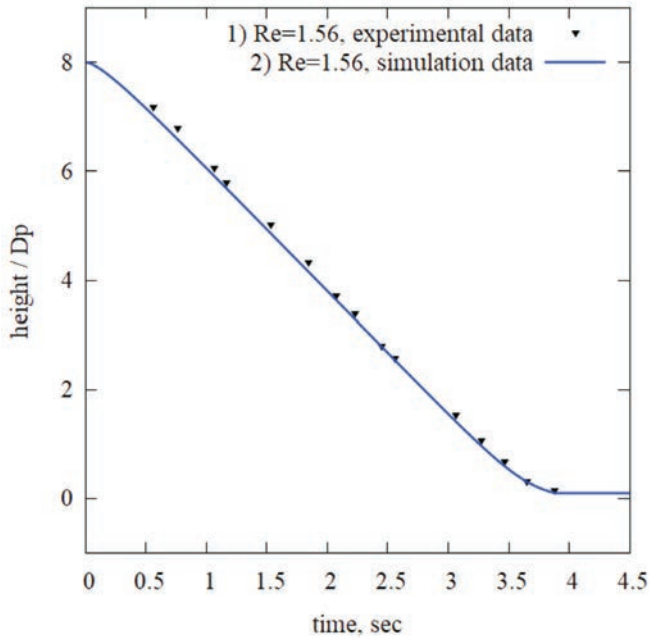


Figure 4 – Solid particle trajectory.
Comparison of the simulation data with experimental data at $Re = 1,56$.

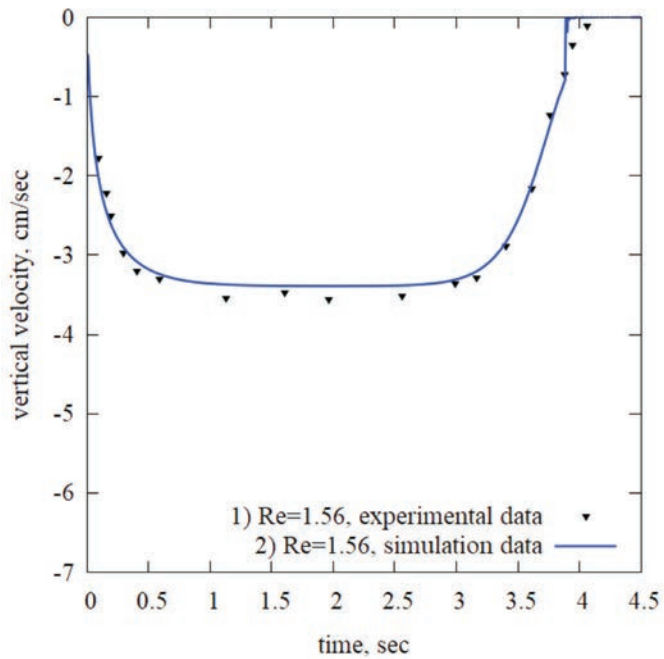


Figure 5 – Vertical velocity of solid particle motion.
Comparison of the simulation data with experimental data at $Re = 1,56$.

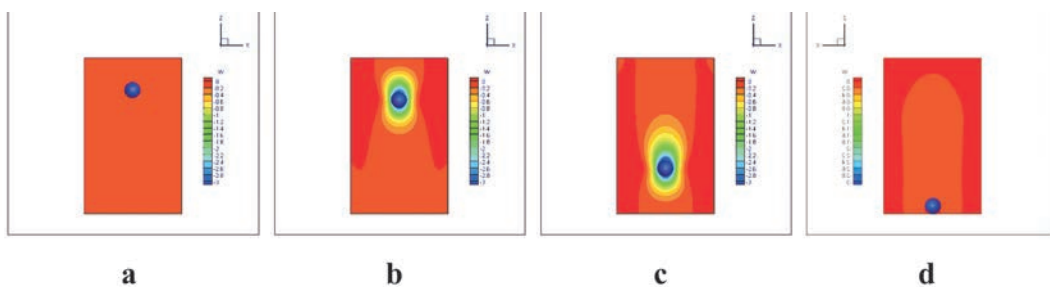


Figure 6 – Vertical velocity profiles of solid particle motion on the plane $Y = 0,5$ at times a) $t = 0 c.$, b) $t = 0,3 c.$, c) $t = 2 c.$, d) $t = 4 c.$

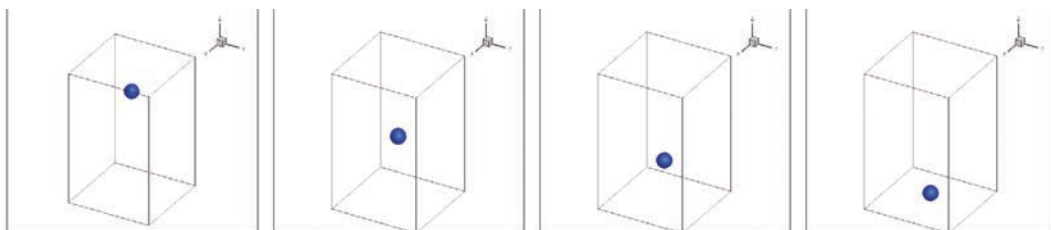


Figure 7 – 3D dynamics of solid particle at times a) $t = 0 c.$, b) $t = 0,3 c.$, c) $t = 2 c.$, d) $t = 4 c.$

Conclusion. In this paper, the modeling of solid particle motion in a viscous medium is considered. Numerical simulation is carried out in the computational domain of a parallelepiped shape using the LBM with nineteen lattice velocities. The IBB method is used to effectively determine the boundary condition at the «fluid - solid particle» interface. The derived simulation results are in good agreement with the results of other authors. This means that the developed algorithm may well be applied to solving the problem of the solid particles dynamics in a thermal viscous flow. This result will be obtained and shown in a future research.

This work was supported by grant funding for scientific and technical programs and projects of the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, grant no. AP09260528.

REFERENCES

- 1 Peskin CS. The immersed boundary method. *Acta Numer* 2002; 11:479–517.
- 2 Uhlmann M. An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows. *J Comput Phys* 2005;209(2):448–76.
- 3 Z. Zhang, A. Prosperetti, A second-order method for three-dimensional particle simulation, *J. Comput. Phys.* 210 (2005) 292–324.
- 4 T.M. Burton, J.K. Eaton, Fully resolved simulations of particle-turbulence interaction, *J. Fluid Mech.* 545 (2005) 67–111.
- 5 K. Yeo, S. Dong, E. Climent, M.R. Maxey, Modulation of homogeneous turbulence seeded with finite size bubbles or particles, *Int. J. Multiphase Flow* 36 (2010) 221–233.

6 H. Homann, J. Bec, Finite-size effects in the dynamics of Neutrally buoyant particles in turbulent flow, *J. Fluid Mech.* 651 (2010) 81–91.

7 Wang L-P, Peng C, Guo Z, Yu Z. Lattice Boltzmann simulation of particle-laden turbulent channel flow. *Comput Fluid* 2016; 124:226–36.

8 L.-P. Wang, O. Ayala, H. Gao, et al., Study of forced turbulence and its modulation by finite-size solid particles using the lattice Boltzmann approach, *Comput. Math. Appl.* 67 (2014) 363–380.

9 J. Latt, B. Chopard, O. Malaspinas, M. Deville, A. Michler, Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method, *Phys. Rev. E* 77 (2008) 056703.

10 Ch. Peng, Y. Teng, B. Hwang, Zh. Guo, L- P Wang. Implementation issues and benchmarking of lattice Boltzmann method for moving rigid particle simulations in a viscous flow. *Computers and Mathematics with Applications* 72 (2016) 349–374.

11 M. Bouzidi, M. Firdaouss, P. Lallemand, Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries, *J. Comput. Phys.* 13 (2001) 3452–3459.

12 Zhao W, Yong W-A. Single-node second-order boundary schemes for the lattice Boltzmann method. *J Comput Phys* 2017;329(6):1–15.

13 Tao S, He Q, Chen B, Yang X, Huang S. One-point second-order curved boundary condition for lattice Boltzmann simulation of suspended particles. *Comput Math Applica* 2018.

14 T. Krüger, H. Kusumaatmaja, A. Kuzmin, O. Shardt, G. Silva, E.M. Viggen. *The Lattice Boltzmann Method.* – Switzerland: Springer International Publishing, 2017. - 61–293 p.

15 A. ten Cate, C. H. Nieuwstadt, J. J. Derksen, and H. E. A. Van den Akker. Particle imaging velocimetry experiments and lattice-Boltzmann simulations on a single sphere settling under gravity // *Physics of Fluids.* – 2002. V. 14, N 11. P. 4012 – 4025.

**Б. Т. ЖҰМАҒҰЛОВ¹, Д. Б. ЖӘКЕБАЕВ^{1,2},
А. С. ЖҰМӘЛІ^{1,2}, Б. А. САТЕНОВА²**

¹Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясы,
Алматы қаласы, Қазақстан

² Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қаласы, Қазақстан
*e-mail: ainura.z89@gmail.com

ТҰТҚЫР ОРТАДАҒЫ ҚАТТЫ БӨЛШЕК ДИНАМИКАСЫН LBM ПІШІНДЕУ

Мақалада тұтқыр ортадағы жалғыз қатты бөлшектің динамикасын математикалық және компьютерлік модельдеу қарастырылады. Зерттеу нәтижелері Больцманның торлы теңдеулері әдісінің (LBM) D3Q19 моделі негізінде жүзеге асырылған 3D сандық алгоритмнің көмегімен алынды. «Сұйықтық – қатты бөлік» бөлігінің қозғалмалы шекарасы интерполяцияланған кері қайту (IBV) схемасын қолдану арқылы ескеріледі.

$Re = 1,56$ үшін қатты бөлшек қозғалысының жылдамдығы мен бөлшек траекториясы алынды. Нәтижелер басқа авторлардың эксперименталды және сандық нәтижелерімен жақсы сәйкес келеді.

Түйін сөздер: LBM, IBV, D3Q19, қатты бөлшек, тұтқыр орта.

Б. Т. ЖУМАГУЛОВ¹, Д. Б. ЖАКЕБАЕВ^{1,2}, А. С. ЖУМАЛИ^{1,2}, Б. А. САТЕНОВА²

¹Национальная инженерная академия Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: ainura.z89@gmail.com

LBM- МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

В данной статье рассматривается математическое и компьютерное моделирование динамики одиночной твердой частицы в вязкой среде. Результаты исследования получены с помощью 3D численного алгоритма, осуществленного на базе D3Q19 модели метода решеточных уравнений Больцмана (LBM). Движущаяся граница раздела «жидкость – твердая частица» учитывается применением интерполированной схемы обратного отскока (IBB).

Получены скорость движения твердой частицы и траектория частицы при $Re = 1,56$. Результаты имеют хорошее согласование с экспериментальными и численными результатами других авторов.

Ключевые слова: LBM, IBB, D3Q19, твердая частица, вязкая среда.

М.И.ЖҰМАНОВА*

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

РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ КӨМУ КЕЗІНДЕ САЗДЫ ҚАБАТТАРДАҒЫ РАДИОАКТИВТІ ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ КӨШІ-ҚОНЫН ЗЕРТТЕУ

2015 жылы Қазақстан мен Атом энергия Халықаралық агенттігі (МАГАТЭ) Өскеменде төмен байытылған уран банкі орналастыру туралы келісімге қол қойды. 2019 жылы байытылған уранның бірнеше партиясы Қазақстанға жеткізілді және банк Үлбі металлургиялық зауыты аумағында жұмыс істей бастады. Радиоактивті элементтерді тасымалдау мен көму кезінде уранның жерасты қоймаларынан жерасты суларына өтуіне шектеу қою арқылы бұл мүмкіндікті азайту қажеттілігі туындайды. Сол себепті берілген мақалада радиоактивті уранның қалдықтарын көму кезінде сазды қабаттардағы радиоактивті элементтердің көші-қонына зерттеу жүргізілді.

Қазіргі уақытта көптеген жерасты сақтау қоймалары радиоактивті қалдықтардың кейбір түрлері үшін жұмыс істеуде. Бұл жүйелер әртүрлі геологиялық формацияларға арналған жерасты қоймаларының әртүрлі құрылыстарына негізделген. Байытылған уранның көші-қонуы мүмкін геологиялық ортада орналасқан жерасты қоймалары үшін жүйенің басқа компоненттері уранның қозғалыштығын болдырмау немесе шектеу арқылы бұл мүмкіндікті төмендетуі қажет.

Жұмыста қосымша табиғи кедергі-сазды қабатты орнату арқылы, қауіпсіз жерлеу кезіндегі радиоактивті элементтердің көші қонысы, диффузияның әсері және қатты қалдықтар қабаты арқылы ылғал топырақ қабатындағы радиоактивті элементтердің конвективті өту процесі зерттелді.

***Түйін сөздер:** көші-қон, жер асты сақтау қоймалары, сазды қабат, жер асты сулар, жақын аймақ, Фиктің екінші заңы.*

Кіріспе. Төмен байытылған уранның екінші партиясы біздің елге жеткізілді, ол Өскемендегі МАГАТЭ ядролық отын қоймасында сақталады. Ядролық отын банкі - Өскеменде де, бүкіл Қазақстанда да қорғалатын орындардың бірі. Оны ашу кезінде көптеген пікірлер мен қайшылықтар туындады, өйткені радиоактивті қалдықтарды төгу біздің елде жүзеге асырылады деген пікір бар. Алайда энергетика мамандары олай деп санамайды. Олардың пікірінше, қорқудың қажеті жоқ, себебі аз байытылған уран сақталатын контейнерлер берік және радиоактивті сәуле таратпайды. Осыған орай, Қазақстан Республикасы Атомдық-энергетикалық қадағалау және бақылау комитеті төрағасының орынбасары Ғұмар Серғазин контейнерлер барлық сынақтардан өтті, атап айтқанда биіктіктен құлап, су, отқа төзімділікке тексерілгенін айтты.[1]

Радиоактивті элементтерді тасымалдануы мүмкін геологиялық ортада орналасқан жерасты қоймалары үшін жүйенің басқа компоненттері радиоактивті элементтердің қозғалысын болдырмау немесе шектеу арқылы бұл мүмкіндікті азайтуы қажет. Жақын аймақ құбылысы - бұл әдетте сақтау қоймасы, радиоактивті қалдықтарды орайтын контейнерлер және қоршаған жер-асты жыныстарға қатысты қолданылатын термин

* E-mail корреспондирующего автора: zhumanovamarzhanisakyzy@gmail.com

[2]. Жақын аймақ процестері қалдықтар қаптамасының коррозиясына, химиялық және минералогиялық өзгерістерге, сондай-ақ жер асты суларының қозғалысы мен радионуклидтердің алыс аймаққа тасымалдануына қатысты. Қолданыс жүйелерінің жұмысын радионуклидтерді сақтау тұрғысынан бағалау үшін, осы процестердің барлығын бірге қарастыру қажет. Дәл осы мәселелер жиынтығы бағалаудың ең қиын бөлігі болып табылады, себебі жақын аймақ жұмысына қатысты әр түрлі белгісіздіктерді азайту үшін қосымша жұмысты қажет етеді.

Саз балшық - жер бетіндегі ең көп таралған топырақ. Ол тау жыныстарының ұсақ бөлшектерге дейін ыдырап, бұзылуынан кейін пайда болады және олардың ыдырауының соңғы сатысы болып табылады. Саз балшықтар түрінің ең кеңінен тараған түрі – бентонит [3]. Бентонит қоспалары, ең алдымен, олардың қаныққан күйінде гидравликалық өткізгіштігі төмен болғандықтан таңдалады. Бұл диффузия тосқауылының басым механизмі болуын қамтамасыз етеді. Тағы бір маңызды артықшылық - бұл ісіну қысымы, ол өздігінен бітеліп қалу қабілетін қамтамасыз етеді және жер қойнауларына орнатылған тосқауыл мен қазбалардан кейінгі зақымдану аймағындағы саңылауларды жауып тастайды [4]. Бентонит - бұл миллиондаған жылдар бойы тұрақты болып келген табиғи геологиялық материал және бұл өте маңызды, өйткені кедергілер 10^6 жылға дейін өз қасиеттерін сақтауы керек.

Есептің қойылымы. Радиоактивті қалдықтардың қоймасынан қоршап тұрған тау жыныстарына енетін радиоактивті элементтер сыртқы күштердің әсерінен көлденең және тік бағытта ығысуы мүмкін екендігі белгілі, бұл олардың жер асты суларына, су қоймаларына түсуіне ықпал етеді. Бұл күштерге мыналар жатады: сұйықтықтың булануы, топырақтағы жауын-шашынның және техногендік ылғалдың сүзілуі, температураның градиенті әсерінен ылғалдың массалық алмасу, адсорбцияланған және бос иондардың диффузиясы. (5) Бұдан басқа, радионуклидтердің миграциясын есептегенде радиоактивті ыдырау, радиоактивті ыдырау нәтижесінде энергияның бөлінуі, конвективті және өткізгіштік жылу алмасу процестерін ескеру қажет [6]. Маса алмасу процесіне әсер ететін көптеген сыртқы факторлардың болуына байланысты бұндай гетерогенді жүйені модельдеу қиынға соғады. Осы зерттеу аймағында төмен байытылған уранның радиоактивті қалдықтарының U_0 жылдамдығымен көлденең бағытта қозғалатын шартты қоймасының су басу процесін, яғни конвективті ауысуды қарастырамыз (1-сурет). [7-9]

Ылғалдың диффузиялық және конвективті қозғалуының арқасында радиоактивті төмен байытылған уран жасанды балшықтан жасалған, ені L_1 тосқауылдарға көшеді, және филтрге қарсы, миграцияға қарсы қасиеттерімен сипатталады. Уақыт өте келе радиоактивті элементтер ұзындығы L_2 табиғи топыраққа өтуі мүмкін. Сонымен бірге есептеу моделінде саз балшықты тосқауылдың ені табиғи топырақтың енінен әлдеқайда аз ($L_1 \ll L_2$) екендігі ұсынылады.



Зерттеу әдістері және материалдары. Төмен байытылған уран - тосқауыл - жыныс жүйесіндегі масса алмасу процесін модельдеу үшін Фиктің екінші заңы қолданылды және квазиөлшемді стационарлы емес диффузиялық тендеулер декарттық координаттар жүйесінде шешілді (1)-(3). Ылғалдың сүзілу қозғалысын және радиоактивті ыдырау белсенділігінің төмендеуі есепке алынды.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \cdot \nabla C_i) + u \cdot \nabla C_i = R_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} - D_{1i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + u_{1i} \frac{\partial C_i}{\partial x} = \lambda_i C_i, \quad 0 < x < L_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} - D_{2i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + u_{2i} \frac{\partial C_i}{\partial x} = \lambda_i C_i, \quad L_1 < x < L_2 \quad (3)$$

Мұндағы C_i – геологиялық қабаттағы ұзақ өмір сүретін радиоактивті элемент концентрациясы, Бк/м³;

C_{1i} және C_{2i} – бұл қауіпсіздік тосқауылындағы және топырақтағы радиоактивті элементтің диффузия коэффициенті, сәйкесінше, м²/с;

u_{1i} және u_{2i} – бұл қауіпсіздік тосқауылындағы және жердегі радиоактивті элементтің қозғалыс жылдамдығы, сәйкесінше, м/с;

λ_i – i -ші радиоактивті элементтің ыдырау константасы, ол жартылай ыдырау кезеңімен ерекше байланысты, с⁻¹; t – уақыт, с.

Есептеу аймағының шекараларының бірінде радиоактивті элементтің сыртқы тосқауылға уақытша тұрақты массалық ағыны бар, ол сыртқы радиацияның әсерінен радиоактивті қалдықтардың бетінен шаймалау кезінде пайда болады.

$$-D_{1i} \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=0} = Ra_0 e^{-\lambda t} = F_0 e^{-\lambda t} = F \quad (4)$$

Мұндағы – радиоактивті элементтің меншікті белсенділігі, Бк/м³;

R – радиоактивті элементтің сілтілену жылдамдығы, г/(см² · тәулік) [10];

F_0 – бірлік беттен радиоактивті элементтің ыдырау жылдамдығы және оның жылжымалы түрге өту жылдамдығы, Бк/(см² · тәулік);

F – бірлік беттен радиоактивті элементтің ыдырау жылдамдығы және радиоактивті ыдырауды ескере отырып, жылжымалы түрге өту жылдамдығы, Бк/(см² · тәулік).

Саздың қорғаныш тосқауылы мен жер жынысымен жанасу нүктесінде диффузиялық ағындардың теңдігі орын алады:

$$D_{1i} \frac{\partial C_i}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = D_{2i} \frac{\partial C_i}{\partial x} \Big|_{x=L_2} \quad (5)$$

Оң жақ шекарадағы шарт таңдалған радиоактивті элементтің жартылай ыдырау кезеңімен салыстырмалы уақыт өткеннен кейін осы жерде радиоактивті элементтің болмау кепілінен таңдалды:

$$C_i \Big|_{x=L_2} = 0 \quad (6)$$

Қауіпсіздік тосқауылындағы және табиғи жер қыртысындағы ылғалдың әсерінен радиоактивті элементтің қозғалысының орташа сызықтық жылдамдығы u_i және u_{2i} , жалпы жағдайда, материалдың сүзілу ағыны мен кеуектілігін ескере отырып, теңдеуден анықталды [11-13]:

$$u = \frac{\theta u_0}{K_d \rho_\varepsilon} \quad (7)$$

Мұндағы θ – геологиялық материалдың орташа ылғалдылығы, %; K_d – радиоактивті элементтің фазалық таралу коэффициенті, м³/кг; ρ_ε – кеуектілікке қатысты материалдың тығыздығы кг/м³.

Уақыттың бастапқы сәтінде тосқауыл материалы мен табиғи жер қыртысында белсенділік және сәйкесінше концентрация болжанған і-ші радиоактивті элемент нөлге тең.

$$C_i \Big|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Қойылған есеп ұзақ өмір сүретін уран элементтінің геологиялық түзілімдер материалына химиялық инертті, термодинамикалық жағдайларға қарамастан ылғал тұрақты жылдамдықпен қозғалады деген болжамдарды ескере отырып шешілді. Қолда бар әдеби деректерге талдау жасай отырып, жыныстардың негізгі сипаттамалары (сорбциялық, физикалық және химиялық) және таңдалған ұзақ өмір сүретін радиоактивті элементке қатысты қолданылатын саз балшықтары анықталды.

Кесте 1 – Есептеуге қажетті өлшемдер

Объект	Диффузия коэффициенті, D (м ² /жыл)	Фазалық таралу коэффициенті K_d (м ³ /кг)	Тығыздық ρ_ε (г/см ³)	Орташа ылғалдылық θ (%)
Саз балшық	10 ⁻⁵	0-0,12	1-1,5	10-23
Жер қыртысы	10 ⁻¹¹	0	1,75-1,8	

Алынған нәтижелерді талқылау. Қолда бар мәліметтерге сәйкес (1 кестеде) ылғал ағынының әсерінен төмен байытылған уранның радиоактивті қалдықтарын

сақтаудағы миграция жылдамдығын есептеу, сазды тосқауылдың әр түрлі параметрлері бойынша және іргелес жер қыртысында жүргізілді. Сызбада байқалып тұрғандай, саз балшықты тосқауыл 10000 жыл ішінде өз қызметін келесі мәндерде жақсы атқаруда:

$$u_0 = 3,171 \cdot 10^{-8} \text{ м/сек}$$

$$L_l = 10 \text{ м,}$$

$$\theta = 23\%,$$

$$\rho_s = 1400 \text{ кг/м}^3,$$

$$F_0 = 0,01 \text{ Бк/(см}^2 \cdot \text{тәулік)},$$

$$K_d = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Төмен байытылған уранның жартылай ыдырау периоды $T^{1/2} = 1,807 \cdot 10^{11} \text{ сек.}$

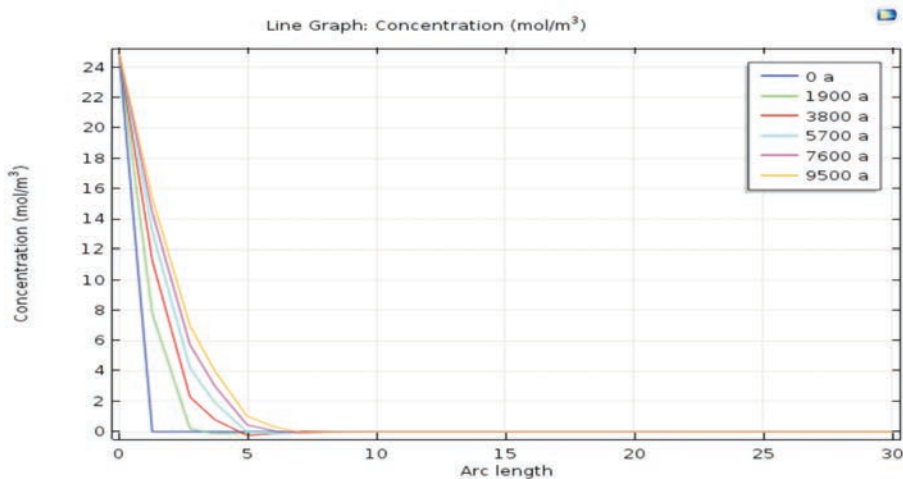
i-ші радиоактивті элементтің ыдырау константасы λ_i :

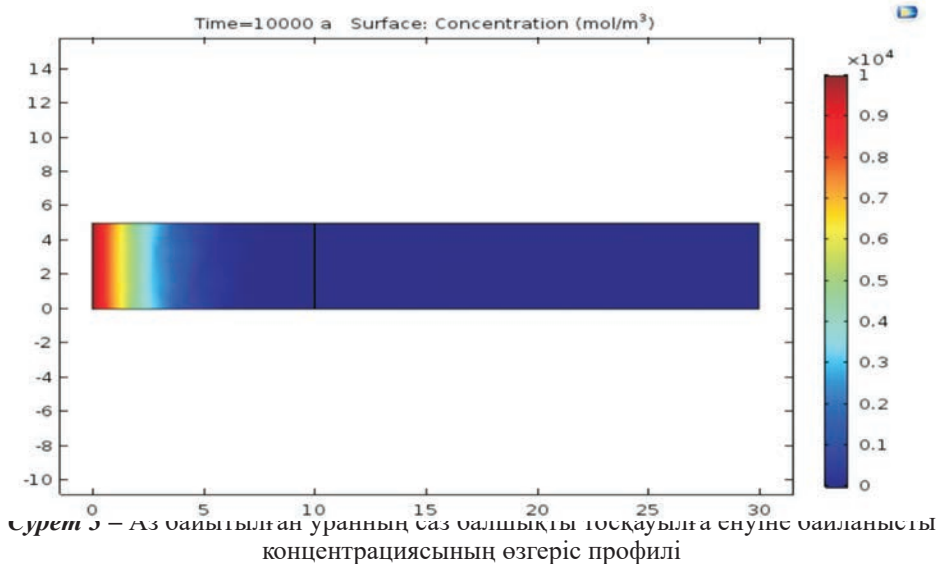
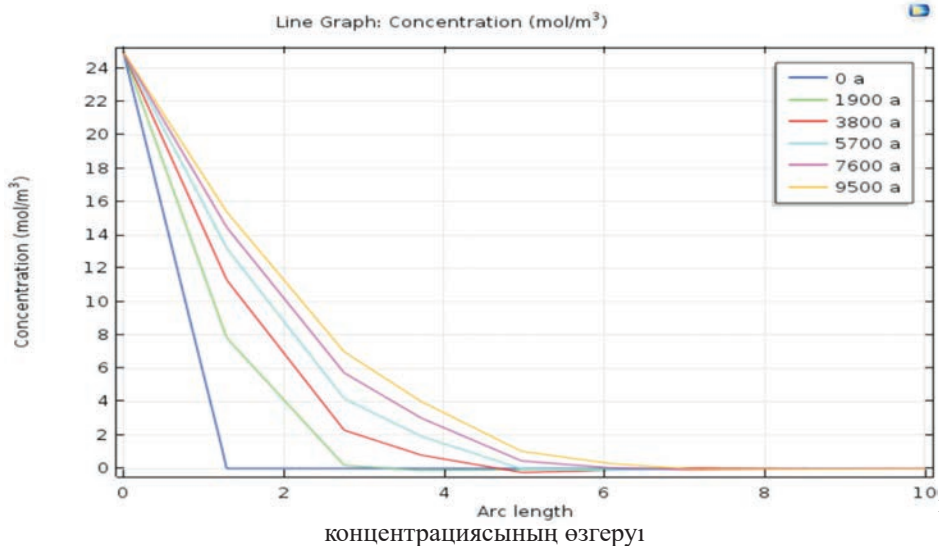
$$\lambda_i = \frac{0,693}{T^{1/2}} = 3,835 \cdot 10^{-12} \text{ сек} \quad (9)$$

Радиоактивті элементтің сілтілену жылдамдығы R :

$$R = \lambda_i C = 3,447 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{м}^3} \quad (10)$$

2-суретте саз балшықтан жасалған жасанды қауіпсіздік тосқауылы радиоактивті қалдықтарды сенімді түрде оқшаулауға мүмкіндік беретіндігі көрінеді, өйткені 10 000 жылдан астам уақыт ішінде аз байытылған уран тосқауылдың тереңдігіне 7 м-ден артық енбеген, бұл жағдайда конвективті тасымалдау процесі шешуші болып табылады. Диффузиялық ағындар диффузия коэффициенттерінің салыстырмалы түрде аз мәндеріне байланысты (10-15 м² / жыл) көші-қон процесіне аз әсер етеді, бұл уранның сазды тосқауыл интерфейсында жиналуына әкеледі. Демек, көші-қон жылдамдығы интервал аралық таралу коэффициентімен және сүзілу жылдамдығымен анықталады, ол таңдалған саз үшін (10⁻⁵–10⁻³) м / тәул.





Қорытынды. Осылайша, радиоактивті қалдықтарды сақтау қауіпсіздігі, жер астына су кіру нәтижесінде сілтіленуге ұшараған төмен байытылған уранның көші-қонысымен анықталады. Сондықтан қауіпсіздік тосқауылдарының материалына қойылатын негізгі талаптар - сүзгілеуге және миграцияға қарсы жоғары сипаттамалар. Сонымен қатар, мұндай тосқауылдар сенімді гидрооқшаулауды қамтамасыз етуі керек.

Жұмыста таңдалған радиоактивті элемент үшін табиғи саз балшықтардағы диффузиялық ағындардың шамалы болатындығы және іс жүзінде көші-қон процесіне

әсер етпейтіндігі

COMSOL Multiphysics бағдарламасы арқылы көрсетілген. Ылғалдың конвекциясы ең маңызды фактор болып табылады. Нәтижесінде радиоактивті элементтер қауіпсіздік тосқауылдары арқылы жер қабатына ауысуға мүмкіндіктері туады. Алайда, фильтрация ағындарының болуына байланысты көші-қон жылдамдығы жылына 0,5-0,7 мм-ден аспайды, бұл оның саз балшық арқылы ұзақ уақыт бойы жер асты қабатына таралуына мүмкіндік бермейтінің көрсетеді (шамамен 10 000 жылдық есеппен). Төмен байытылған урандардан жасанды жолмен жасалған қауіпсіздік тосқауылының радиоактивті элементтердің көші-қон жылдамдығын төмендететінін, бірақ оны толығымен тежемейтінің көруге болады. Бұл саздағы және оған іргелес топырақтағы әр түрлі диффузия коэффициентімен байланысты болуы мүмкін.

Осылайша, қазіргі уақытта құрамында саз балшық бар қауіпсіздік тосқауылдары төмен байытылған уранды сенімді түрде оқшаулайды, тіпті олар су астында қалған болса да.

ӘДЕБИЕТ

1 Kazakhstan and IAEA signed agreement on establishment of LEU Bank <https://strategy2050.kz/en/news/25285/>

2 J. Heinonen and F. Gera, Nuclear waste disposal: - Understanding what happens underground Assessing "near-field" effects for safe long-term isolation, IAEA BULLETIN, 1985

3 Velde B, Meunier A. The origin of clay minerals in soils and weathered rocks. Berlin: Springer; 2008.

4 Madsen FT, Müller-Vonmoos M. The swelling behaviour of clays. Appl Clay Sci. 1989;4(2):143–56.

5 Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические механизмы и моделирование / под ред. Р.М. Алексахина. – М.: Энергоиздат, 1981.

6 Истомин А.Д., Кораблев С.А., Носков М.Д. Математическое моделирование миграции радионуклидов в поверхностном слое грунта // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С.74–78.

7 Антоненко М.В., Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Моделирование процесса диффузии радиоуглерода из активной зоны выводимого из эксплуатации ПУГР АД // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – С. 63–68.

8 Базылев В.В. Параметры миграции радионуклидов из грунтовых могильников твердых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – № 1.

9 Ferroni L., Miracapillo C. Radionuclides migration in the far field of geological repositories a numerical example. Energy Procedia, 2014

10 Экспериментальное моделирование поведения радионуклидов при создании дополнительных барьеров безопасности в хранилищах твердых радиоактивных отходов, содержащих облученный графит / А.О. Павлюк, А.М. Измestьев, С.Г. Котляревский, Е.В. Беспала // Вопросы радиационной безопасности. – 2016. – № 1.

11 Кудряшов Н.А., Серебрякова И.Е. Математическое моделирование миграции долгоживущих радионуклидов в почве в результате радиоактивных выпадений // Атомная энергия.

– 1993.

12 Modeling of irradiated graphite ¹⁴C transfer through engineered barriers of a generic geological repository in crystalline rocks / P. Poskas, D. Grigaliuniene, A. Narkuniene, R. Kilda, D. Justinavicius // *Science of the Total Environment*. – 2016. – V. 569–570. – P. 1126–1135.

13 Van Loon L.R., Mibus J. A modified version of Archiers law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argilla ceous rocks and its application in safety analysis studies // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 59. – P. 85–94.

REFERENCES

1 Kazakhstan and IAEA signed agreement on establishment of LEU Bank <https://strategy2050.kz/en/news/25285/>

2 J. Heinonen and F. Gera, Nuclear waste disposal: - Understanding what happens underground Assessing "near-field" effects for safe long-term isolation, IAEA BULLETIN, 1985

3 Velde B, Meunier A. The origin of clay minerals in soils and weathered rocks. Berlin: Springer; 2008.

4 Madsen FT, Müller-Vonmoos M. The swelling behaviour of clays. *Appl Clay Sci*. 1989;4(2):143–56.

5 Prohorov V.M. Migraciya radioaktivnyh zagryaznenij v pochvah. Fiziko-himicheskie mekhanizmy i modelirovanie / pod red. R.M. Aleksahina. – M.: Energoizdat, 1981.

6 Istomin A.D., Korablev S.A., Noskov M.D. Matematicheskoe modelirovanie migracii radionuklidov v poverhnostnom sloe grunta // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. – 2005. – T. 308. – № 3. – S.74–78.

7 Antonenko M.V., CHubreev D.O., Kuznecov G.V. Modelirovanie processa diffuzii radiougleroda iz aktivnoj zony vyvodimogo iz ekspluatatsii PUGR AD // *Atomnaya energiya*. – 2015. – T. 118. – S. 63–68.

8 Bazylev V.V. Parametry migracii radionuklidov iz gruntovyh mogil'nikov tverdyh radioaktivnyh othodov // *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. – 1997. – № 1.

9 Ferroni L., Miracapillo C. Radionuclides migration in the far field of geological repositories a numerical example. *Energy Procedia*, 2014

10 Eksperimental'noe modelirovanie povedeniya radionuklidov pri sozdanii dopolnitel'nyh bar'erov bezopasnosti v hranilishchah tverdyh radioaktivnyh othodov, sodержashchih obluchen nyj grafit / A.O. Pavlyuk, A.M. Izmes't'ev, S.G. Kotlyarevskij, E.V. Bespala // *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. – 2016. – № 1.

11 Kudryashov N.A., Serebryakova I.E. Matematicheskoe modelirovanie migracii dolgozhivushchih radionuklidov v pochve v rezul'tate radioaktivnyh vypadenij // *Atomnaya energiya*. – 1993.

12 Modeling of irradiated graphite ¹⁴C transfer through engineered barriers of a generic geological repository in crystalline rocks / P. Poskas, D. Grigaliuniene, A. Narkuniene, R. Kilda, D. Justinavicius // *Science of the Total Environment*. – 2016. – V. 569–570. – P. 1126–1135.

13 Van Loon L.R., Mibus J. A modified version of Archiers law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argilla ceous rocks and its application in safety analysis studies // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 59. – P. 85–94.

М. И. ЖУМАНОВА

*Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
e-mail: zhumanovamarzhanisakyzy@gmail.com*

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЛИНИСТЫХ СЛОЯХ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

В 2015 году Казахстан и Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) подписали соглашение о размещении банка низкообогащенного урана в Усть-Каменогорске. В 2019 году несколько партий обогащенного урана было доставлено в Казахстан, и банк начал работу на территории Ульбинского металлургического комбината. При транспортировке и захоронении радиоактивных элементов возникает необходимость снижения этой возможности путем ограничения перехода урана из подземных хранилищ в подземные воды. Поэтому в данной статье было проведено исследование миграции радиоактивных элементов в глинистых слоях при захоронении отходов радиоактивного урана.

В настоящее время существует множество подземных хранилищ (для некоторых видов радиоактивных отходов). Эти системы основаны на разных структурах подземных контейнеров для разных геологических формаций. Для подземных хранилищ, расположенных в геологической среде, где обогащенный уран может мигрировать, другие компоненты системы должны уменьшить эту возможность, предотвращая или ограничивая подвижность урана.

В работе изучен процесс конвективного переноса радиоактивных элементов во влажном слое почвы посредством установки дополнительного естественного барьерного слоя глины, миграция радиоактивных элементов при безопасном захоронении, эффект диффузии и конвекции через слой твердых отходов.

***Ключевые слова:** миграция, подземные хранилища, слой глины, грунтовые воды, ближняя зона, второй закон Фика.*

M. I. ZHUMANOVA

*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: zhumanovamarzhanisakyzy@gmail.com*

STUDY OF MIGRATION OF RADIOACTIVE ELEMENTS IN CLAY LAYERS DURING THE BURIAL OF RADIOACTIVE WASTE

In 2015, Kazakhstan and the International Atomic Energy Agency (IAEA) signed an agreement to host a low-enriched uranium bank in Ust-Kamenogorsk. In 2019, several batches of enriched uranium were delivered to Kazakhstan and the bank began operations at the Ulba Metallurgical Plant. When transporting and disposing of radioactive elements, there is a need to reduce this possibility by limiting the transfer of uranium from underground storage to underground water. Therefore, in this article, a study was conducted on the migration of radioactive elements in clay layers during the disposal of radioactive uranium waste.

There are now many underground repositories (for some types of radioactive waste). These systems are based on different underground container structures for different geological formations. For underground

repositories located in geological environments where enriched uranium can migrate, other system components must reduce this possibility by preventing or limiting uranium mobility.

This work investigates the process of convective transport of radioactive elements, in a moist soil layer through the installation of an additional natural clay barrier layer; the migration of radioactive elements during safe disposal, the effect of diffusion and convection through the solid waste layer.

Keywords: *migration, underground storage, clay layer, groundwater, near zone, Fick's second law.*

MAKSAT B. KURMANSEIIT^{1,2}, MADINA S. TUNGATAROVA^{1,2*},

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

e-mail kurmanseiiit.maksat@gmail.com, m.tungatarova@satbayev.university

INFLUENCE OF GRAVITY EFFECT TO THE RECOVERY RATE AT URANIUM IN-SITU LEACHING

In-Situ Leaching is a method of extracting minerals by selectively dissolving it with a leaching solution directly in the place of occurrence of the mineral. In practice, during the development of deposits with the In-Situ Leaching method, situations arise when the solution tends to go down below the active thickness of the stratum. This may be due to geological heterogeneity of the rock or gravitational sedimentation of the solution in the rock due to the difference in the densities of the solution and groundwater. As a result of the deposition of the solution along the height, there is a decrease in the recovery of the metal located in the upper part of the geological layers.

This article examines the effect of gravity on the flow regime during the filtration of the solution in the rock. The influence of the gravitational effect on the flow of solution in the rock is studied for different ratios of the densities of the solution and groundwater without taking into account the interaction of the solution with the rock. The CUDA technology is used to improve the performance of calculations. The results show that the use of CUDA technology allows to increase the performance of calculations by 40-80 times compared to calculations on a central processing unit (CPU) for different computational grids.

Keywords: *In-Situ leaching, mineral recovery, stream lines, gravity, CUDA technology, graphics processing unit (GPU), graphics processing unit (GPU).*

Introduction. In-Situ Leaching (ISL) is a common method used to recover minerals in the mining industry, above all for uranium deposits such as those exploited in Kazakhstan [1-3].

ISL is the process of developing low-concentration deposits in by injecting leaching solutions through a network of injection wells and withdrawing a dissolved useful component through production wells (figure). In some fields, the deposition of the leaching solution is observed along the height and its flow into the lower layers of the rock. As a result, the mineral in the upper layers of the rock may remain unrecovered, since the leaching solution has not reached there [4]. This may be due to the presence of highly permeable areas in the geological structure of the reservoir. The lack of detailed information on the geological structure of the deposit in the interwell space does not allow to unambiguously determine whether the decrease in the level of the solution along the height is related to the geology of the reservoir. Another reason for the decrease in the level of the solution along the height may be the influence of gravitational effects due to the difference in the densities of the leaching solution and groundwater. Depending on the composition of the rock, various types of solvents can be used; in Kazakhstan, uranium is mined with sulfuric acid leaching. Moreover, the concentration of sulfuric acid in the leaching solution does not exceed 20-25 g/l at the stage of block acidification [3, 5, 6]. In the process of leaching, along with the

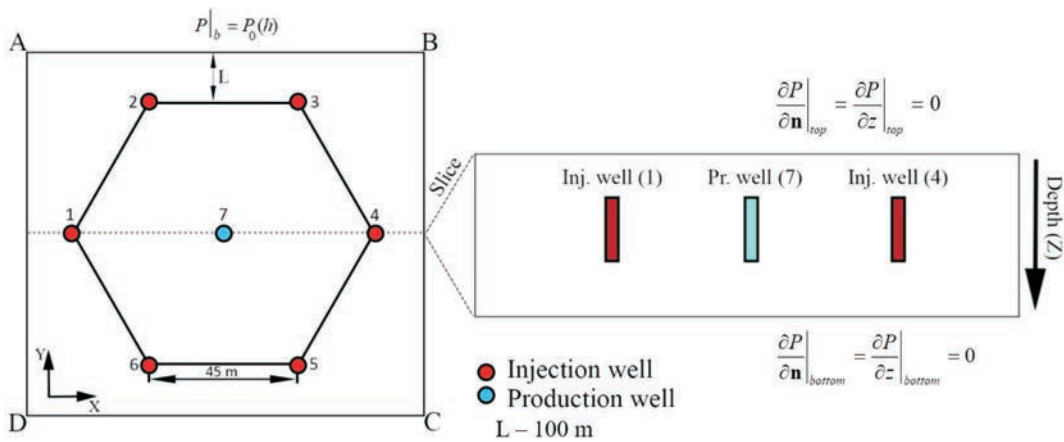
* E-mail корреспондирующего автора: madina.tungatarova@gmail.com

useful component, the rock components dissolve, which leads to an increase in the density of the leaching solution.

As the leaching agent density is slightly greater than groundwater density gravitational effect has to be accounted for as it may affect the flow direction. Due to this gravitational effect, the denser fluid tends to flow downward while the lighter fluid flows directly to the production well. Accounting for gravitation effect in CFD can complicate streamline simulation method, due to a need for a constant recalculation of streamlines at each iteration.

Task (problem) description and boundary conditions. To study the effect of gravity on the fluid flow in the rock, let us consider a region with uniform isotropic permeability with one hexagonal cell (Figure 2). It is assumed that the uranium ore is trapped between two impermeable layers, with thickness¹ greater than 12 m, так как для меньшей мощности пласта влиянием гравитации можно пренебречь. The filtration open section for each well is about 6-8 m in length imposed as a Dirichlet boundary condition in the numerical simulation. Figure 2 illustrates a vertical cross-section passing along the wells 1,7,4.

For the pressure, a Van Neumann boundary condition was applied to the top and bottom impermeable layers (no flow passing through). The boundary pressure conditions applied to each vertical sides of the domain are functions of depth and chosen as constant (assuming a constant pressure along the vertical of the layer), i.e. as shown on Figure 2, the distance from the injection well to the boundary is 100 m.



Study of gravitational effects on ISL. As the leaching agent density is slightly greater (about $\rho_l = 1.1$ [g.cm⁻³]) than groundwater density ($\rho_w = 1$ [g.cm⁻³]) gravitational effect has to be accounted for as it may affect the flow direction. Due to this gravitational effect, the denser fluid tends to flow downward while the lighter fluid flows directly to the production well. The acid fluid water interface (density of reagent+ water compared to pure water) is more or less tabular near the injection well, but this density contrast produces a drawdown of this interface near by the production well as shown on Figure 2. Sketch explaining the in-

¹ For smaller thickness the gravity effects can be neglected.

situ leaching technique used to recover uranium in roll-fronts , a) before uranium extraction b) after uranium extraction.

Thus, during the leaching process some regions (residual zones) are not leached because of this gravitational effect, an effect often neglected in numerical simulation of the ISL process [7, 8]. Therefore, any hydrodynamic modelling of ISL process should take into consideration the gravity forces in the Darcy Law (1):

$$\mathbf{U}\phi = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot (\mathbf{grad}(p) + \rho \mathbf{g}) \tag{1}$$

where \mathbf{U} is the filtration velocity (in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), ϕ the porosity (notice that $\mathbf{v} = \mathbf{U}\phi$ is the classical Darcy velocity), \mathbf{k} the permeability tensor (in $\text{m}\cdot\text{s}^2$) of porous medium ($\mathbf{k} = k \mathbf{I}$ for the isotropic case), μ the dynamic viscosity (in $\text{Pa}\cdot\text{s}$) of fluid, p the fluid pressure (in Pa), ρ - the fluid density (in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), and \mathbf{g} the gravitational acceleration ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) vector [2]. The mass Conservation Equation (2) of the injected fluid can be written as [5, 6]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}\phi) = q \tag{2}$$

where t is the time (in s), and q the total source rate, the sum of in-flow q_{in} and out-flow q_{out} in a volume element: $q = \sum q_{in} + \sum q_{out}$ (in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$) terms counted positively in the case of an injection of fluid, and negatively for the production of the fluid. After expansion, Eq (2) can be rewritten as:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \phi \mathbf{U} \cdot \mathbf{grad}(\rho) + \rho \text{div}(\mathbf{U}\phi) = q \tag{3}$$

Assuming that fluids are incompressible $\left(\frac{d\rho}{dt} = 0\right)$, it comes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \phi \mathbf{U} \cdot \mathbf{grad}(\rho) = 0 \tag{4}$$

And, thus the mass balance equation Eq (3) can be simplified into the following form:

$$[\rho \text{div}(\mathbf{U}\phi) = q] \tag{5}$$

Substituting the Darcy Law (Eq. 1) into the mass balance equation Eq (5), it comes (assuming a non-zero fluid density ρ):

$$\text{div}\left(-\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot (\mathbf{grad}(p) + \rho \mathbf{g})\right) = \frac{q}{\rho} \tag{6}$$

After some arithmetic, Eq. (6) can be developed as (assuming Eq. (4) stands true i.e. fluid properties are spatially stationary):

$$\text{div}\left(\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot \mathbf{grad}(p)\right) + \frac{1}{\mu} \text{div}(\rho \mathbf{k} \cdot \mathbf{g}) = -\frac{q}{\rho} \tag{7}$$

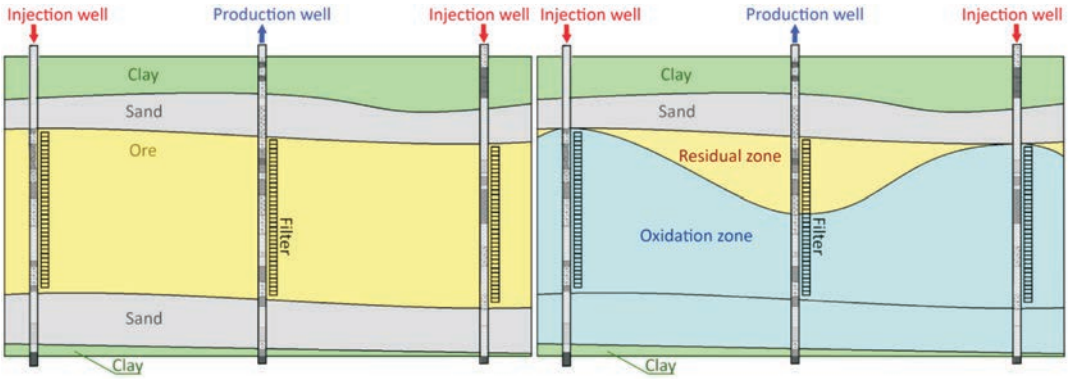


Figure 2 – Sketch explaining the in-situ leaching technique used to recover uranium in roll-fronts, a) before uranium extraction b) after uranium extraction

Eq. (7) describes the general case when permeability tensor is anisotropic. However, in sedimentary medium, the permeability tensor is often assumed to be constant in case of isotropic media or diagonal (after choosing an appropriate coordinate system). In last case, the permeability tensor can be written as:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

where k_{ii} , $i \in \{x, y, z\}$ are the permeability in the i direction. In a Cartesian coordinate grid system, the gravity vector \mathbf{g} is directed downward along the Z axis, Eq. (6) can be simplified into:

$$\text{div} \left(\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot \mathbf{grad}(p) \right) + \frac{1}{\mu} \mathbf{g} \cdot \mathbf{grad}(\rho k_{zz}) = -\frac{q}{\rho} \quad (9)$$

The scalar product of Eq. (9) can be simplified into:

$$\text{div} \left(\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot \mathbf{grad}(p) \right) + \frac{g}{\mu} \frac{\partial(\rho k_{zz})}{\partial z} = -\frac{q}{\rho} \quad (10)$$

Furthermore, assuming that the vertical permeability k_{zz} is spatial quasi constant in the layer, the derivative against z can be assumed as null, and Eq. (10) can be simplified into:

$$\text{div} \left(\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot \mathbf{grad}(p) \right) + \frac{g k_{zz}}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\frac{q}{\rho} \quad (11)$$

Isotropic case: when the porous medium is isotropic, the permeability tensor is diagonal $\mathbf{k} = k \mathbf{I}$ where \mathbf{I} is the identity and k the scalar intrinsic permeability; thus, Eq. (11) is still valid substituting the term k_{zz} by the scalar permeability k :

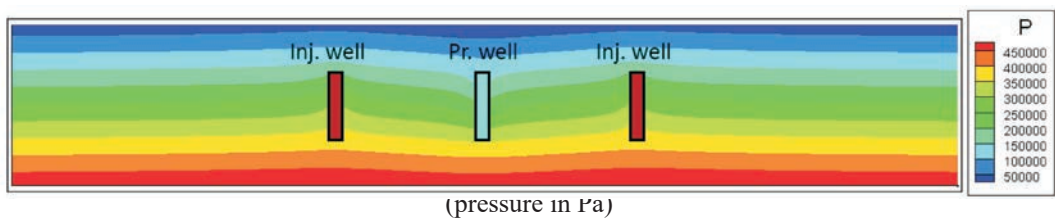
$$\text{div} \left(\frac{\mathbf{k}}{\mu} \cdot \mathbf{grad}(p) \right) + \frac{g k}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\frac{q}{\rho} \quad (12)$$

Consequently, Eqs. (1), (4) and (11) constitute a partial differential equations system with three unknowns including the filtration velocity U , the fluid density ρ which depends on the acid concentration and amount of metal dissolved in the leaching fluid, and the fluid pressure p , respectively.

1.2 Results and discussion. Explicit iteration method was used to calculate the pressure distribution and density in the horizontal layer, since it can be easily parallelized. The velocity in each computational cell is determined from Darcy law, Pollack’s method was used to determine stream lines from velocity field [9, 10]. Streamline simulation is a determining streamlines and calculating the time it takes to move from one point to another along a path. The sum of the time of flight on the cells traversed by the particle gives the total time of travel of the particle (TOF). This method allows us to move from a three-dimensional problem to several one-dimensional problems, where the dimension is the time of flight of a particle.

Equation (12) is an elliptic equation and imposes certain requirements on computing resources. The numerical experimentation was implemented in three main steps: (I) estimation of the pressure field accounting for the gravity term and the above given boundary conditions by solving Eqs. 12; (II) estimation of the velocity fields using Eqs. 1; (III) density calculation from Eqs. 4. The first step was solved on the CPU and the GPU. The CUDA parallel technology was used to accelerate the calculation time [11, 12].

The calculations were made with and without gravity consideration for comparison influence of gravity effects. The cross section view of pressure distribution is presented at **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, the top view of pressure distribution with iso-lines are presented at Fig. 4 (a), and streamline at Fig. 4 (b).

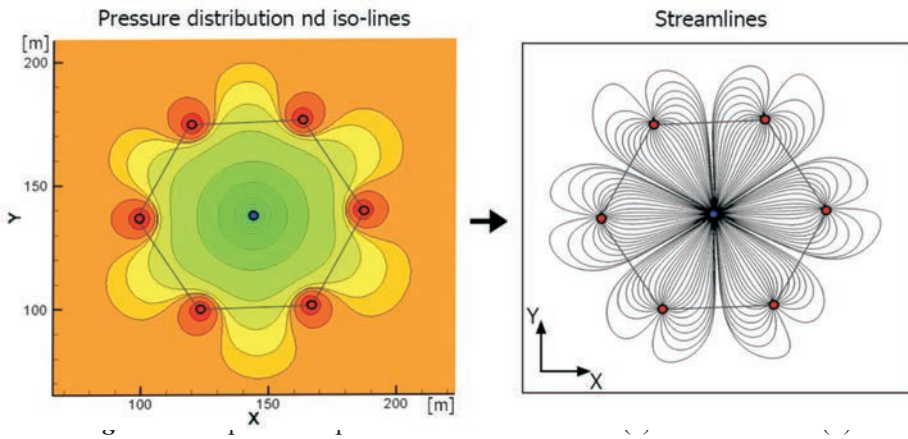


To compare computational performance calculations were conducted on CPU (Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU 3.6 GHz) and GPU (NVIDIA GeForce GTX 980 GPU 1.2 GHz) for various grid configurations. The calculation is performed for different mesh sizes listed in Table 1.

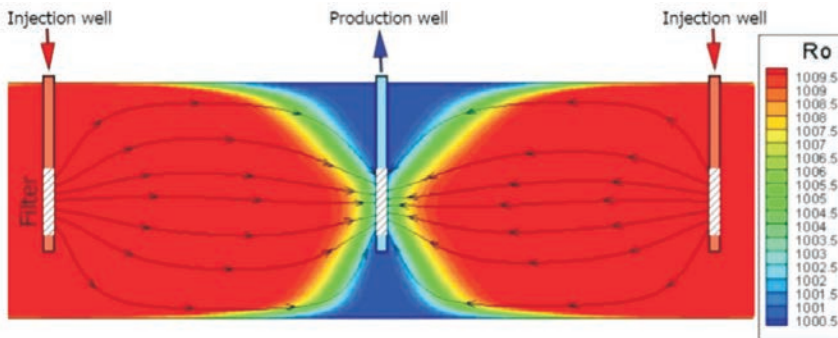
Table 1 – Computing time for CPU and GPU

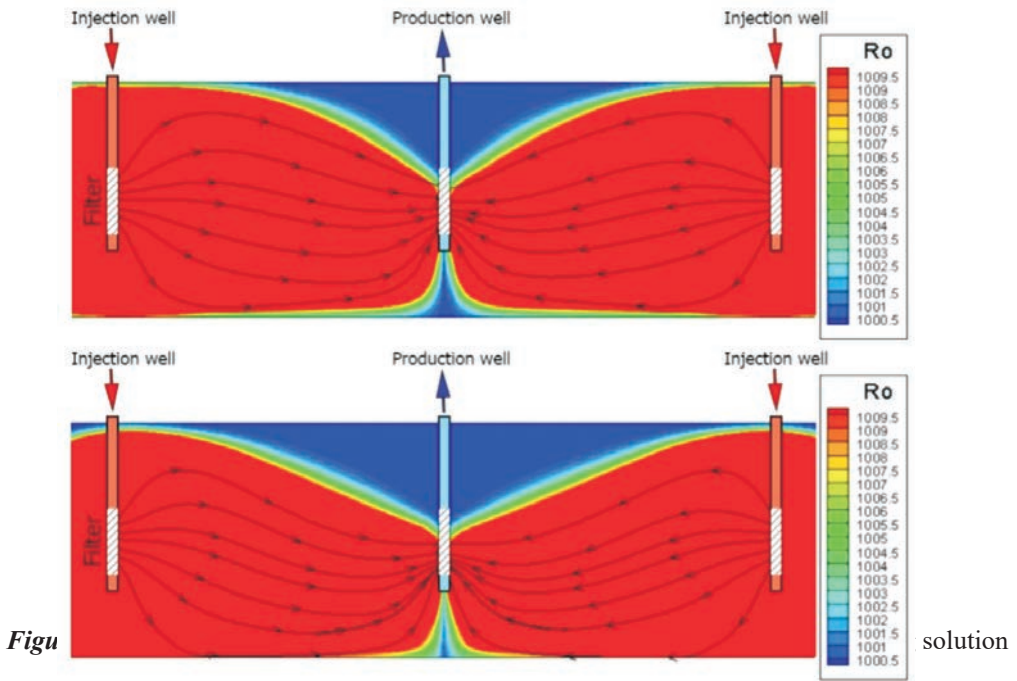
№	Grid	Computing time [s] on CPU	Computing time [s] on GPU	Ratio
1	64x64x64	126.72	1.878	67.47
2	128x128x64	420.51	5.073	82.89
3	192x192x96	2355.36	48.29	48.77
4	256x256x96	4397.71	89.49	49.14
5	256x256x128	7249.26	116.15	62.41

As shown on table 1 calculation using GPU allow to reduce the computing time an order of magnitude compared to the use of the CPU.

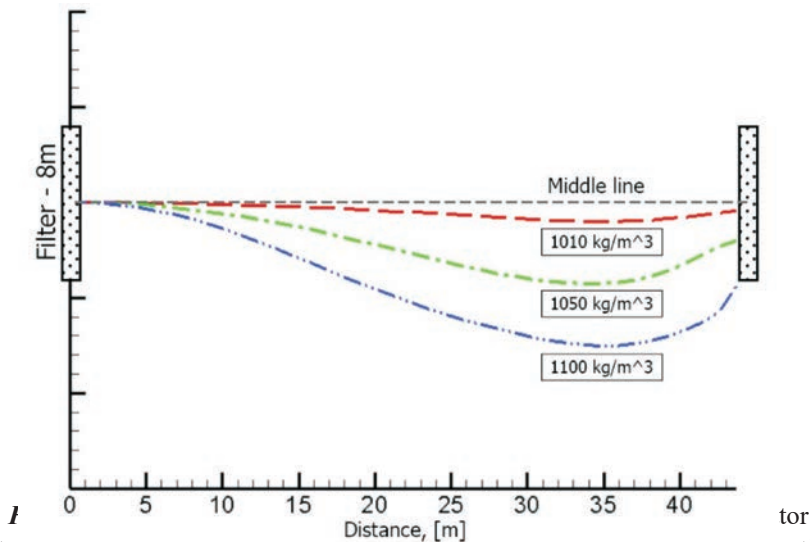


To determine the effect of gravity, three different values of the density of the injected reagents (1010, 1015, 1100 [kg.m⁻³]) were considered. Density distributions in the rock were obtained and streamlines from the injection wells to the pumping well were plotted for the indicated cases (Fig. 5). The results show that with an increase in the density of the solution, the influence of the gravitational effect increases, the flow descends along the height, the streamlines lose their symmetry relative to the midline of the filters.





To analyze the symmetry of the streamline, the average height between streamlines along the wells was determined (Figure 6) for different values of the density of the leaching solution. As can be seen in the figure, as the density of the reagent increases, the middle streamline drops below, thereby showing that the streamlines are losing their symmetry.



In light of the fact that an aqueous solution of sulfuric acid with a concentration of up to 20-25 g/l is used for the leaching solution at uranium deposits, its solution density will be

about 1010 kg.m⁻³ [2, 3]. Dissolution of the mineral and rock component with the leaching solution will not lead to such a significant increase in the density of the solution, i.e. the gravitational effect due to the density difference can be neglected. Thus, the decrease in the height of the leaching solution at the fields is largely due to the existing heterogeneity in the geological structure of the field.

Conclusion. Accounting for gravity effect can seriously change the way a horizontal layer is being oxidized, and consequently leached during an ISL process. In present work this change has been demonstrated by conducting hydrodynamic calculations using a parallelized CUDA - based numerical solver. When gravity effects are accounted for, consequent changes in the spatial distribution of the density (and so in acid concentration) around the injection wells are observed, and lead to a very different pressure gradient field. As a consequence, the way leaching solution flows in the stratum is changed. Resource intensive pressure calculations had to be solved on each density changing, which leads to increasing calculation times. Therefore, CUDA parallel technology was successfully used in each step in order to accelerate these calculations. A speed factor of 40 to 80 is thus obtained, depending on the mesh size used.

Future work requires the implementation of the chemical kinetics reactive transport, planned to be solved along the streamlines, in order to estimate the amounts of uranium left over in the underground. Modeling of such process with account for the gravity effect can help in determining the optimal well pattern and their filtration zone positions for a most cost effective production.

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Education of Kazakhstan through the project of grant financing AP08051929.

REFERENCES

1 Zhivov V.L., Bojcov A.V., SHumilin M.V. Uran: geologiya, dobycha, ekonomika. – M.: Atomizdat, 2012. – 304 s. [Zhivov V.L., Boytsov A.V., Shumilin M.V. Uran: geologiya, dobycha, ekonomika. – M.: Atomizdat, 2012. – 304 p.]

2 Brovin K.G., Grabovnikov V.A., SHumilin M.V., YAzikov V.G. Prognoz, poiski, razvedka i promyshlennaya ocenka mestorozhdenij urana dlya otrabotki podzemnym vyshchelachivaniem. – Almaty: Galym, 1997. – 248 s. [Brovin K.G., Grabovnikov V.A., Shumilin M.V., YAzikov V.G. Prognoz, poiski, razvedka i promyshlennaya otsenka mestorozhdeniy urana dlya otrabotki podzemnym vyshchelachivaniyem. – Almaty: Galym, 1997. – 248 p.]

3 Gromov B.V. Vvedenie v himicheskuyu tekhnologiyu urana. – M.: Atomizdat, 1978. – 336 s. [Gromov B.V. Vvedeniye v khimicheskuyu tekhnologiyu urana. – M.: Atomizdat, 1978. – 336 p.]

4 Poezzhaev I.P., Abdulmanova D.M. Issledovanie gidrodinamiki processa vyshchelachivaniya na nekotoryh ob'ektah PSV // Sbornik dokladov 3-ey mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy uranovoy promyshlennosti». – Almaty, 2004. – S. 163-165. [Poezzhaev, I.P., Abdul'manova, D.M. Issledovanie gidrodinamiki processa vyshhelachivaniya na nekotoryh obektah PSV // Sbornik dokladov 3-ei mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy uranovoi promyshlennosti ». – Almaty, 2004. – P. 163-165]

5 Mamilov V.A., Petrov R.P., SHushaniya G.R. Dobycha urana metodom podzemnogo vyshchelachivaniya. – M.: Atomizdat, 1980. – 248 c. [Mamilov V.A., Petrov R.P., Shushaniya G.R. Dobycha urana metodom podzemnogo vyshchelachivaniya. – M.: Atomizdat, 1980. – 248 p.]

6 Beleckij V.A., Bogatkov JI.K., Volkov N.I. Spravochnik po geotekhnologii urana / Pod red. Skorovarova D.I. – M.: Energoatomizdag, 1997. – 602 c. [Beletskiy V.A., Bogatkov JI.K., Volkov

N.I. Spravochnik po geotekhnologii urana / Pod red. Skorovarova D.I. – M.: Energoatomizdag, 1997. – 602 p.]

7 Barenblatt G.I. Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnyh plastah. – M.: Nedra, 1984. – 288 s. [Barenblatt G.I. Dvizheniye zhidkostej i gazov v prirodnykh plastakh. – M.: Nedra, 1984. – 288 p.]

8 Danaev N.T., Korsakova N.K., Pen'kovskij V.I. Massoperenos v priskvazhinnoj zone i elektromagnitnyj karotazh plasta. – Almaty: Kazak universiteti, 2005. – 180 s. [Danayev N.T., Korsakova N.K., Pen'kovskiy V.I. Massoperenos v priskvazhinnoy zone i elektromagnitnyy karotazh plasta. – Almaty: Kazakh universiteti, 2005. – 180 p.]

9 Datta-Gupta, A., King, M.J. Streamline Simulation: Theory and Practice / SPE Textbook Series. - Vol. 11. – 2007. – 394 p.

10 Pollock, D. W. Semi-analytical Computation of Path Line for Finite Difference Models // Ground Water. – Vol. 26(6). – 1988. – P. 743-750.

11 Imankulov T.S., Daribayev B., Comparative analysis of parallel algorithms for solving oil recovery problem using CUDA and OPENCL // International Journal of Nonlinear Analysis and Applications. – Vol. 12 (1). - 2021. – P. 351 – 364

12 Kim H.-S., Wu S. Chang L.-W. A scalable tridiagonal solver for GPUs // Proceedings of the International Conference on Parallel Processing. – 2011. – P. 444-453 (10.1109/ICPP.2011.41)

М. Б. ҚҰРМАНСЕЙІТ^{1,2}, М. С. ТУНГАТАРОВА^{1,2}

¹Сатпаев университет, Алматы Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ УРАНА ПРИ ДОБЫЧЕ МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Подземное выщелачивание – способ добычи минералов путем их селективного растворения выщелачивающим раствором непосредственно на месте залегания минерала. На практике при разработке месторождений методом подземного выщелачивания возникают ситуации, когда раствор опускается по мощности пласта. Это может быть связано с геологической неоднородностью породы или гравитационного осаждения раствора в породе за счет разности плотностей раствора и грунтовых вод. В результате осаждения раствора по высоте происходит снижение извлечения металла, расположенного в верхней части геологических слоев.

В данной статье исследуется влияние гравитации на режим течения при фильтрации раствора в породе. Влияние гравитационного эффекта на течение раствора в породе исследуется для различного отношения плотностей раствора и грунтовых вод без учета взаимодействия раствора с породой. Для повышения производительности расчетов применяется технология CUDA. Результаты показывают, что применение технологии CUDA позволяет повысить производительность расчетов в 40-80 раз по сравнению с вычислениями на центральном процессоре (CPU) для различной расчетной сетки.

Ключевые слова: подземное выщелачивание, извлечение минерала, линии тока, гравитация, технология CUDA, графический процессор, центральный процессор.

М. Б. ҚҰРМАНСЕЙІТ^{1,2}, М. С. ТУНГАТАРОВА^{1,2}

¹*Сатпаев университеті, Алматы, Қазақстан*

²*әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

УРАНДЫ ЖЕР АСТЫ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІМЕН ӨНДІРУ КЕЗІНДЕ ГРАВИТАЦИЯ ЭФФЕКТИСІНІҢ ӘСЕРІ

Жер асты шаймалау – тікелей минерал пайда болған жерде шаймалау арқылы селективті еріту, пайдалы қазбаларды алу әдісі туралы айтылады. Сілтісіздендіру кезінде ерітінді кенді жыныспен әрекеттесуі ерітіндінің тығыздығының өзгеруіне әкеледі. Ерітінді мен жер асты суының тығыздықтарының айырмашылығы жағдайында жыныстағы ерітіндінің ағысына гравитациялық әсер басым бола бастайды. Бұдан, ерітіндінің тығыздығы жер асты суларының тығыздығынан жоғары болса, ерітінді жыныста қозғалуы биіктік бойынша ағынның деңгейін төмендеуіне әкеледі, нәтижесінде жоғары бөлігінде орналасқан металға ерітінді жетпеуінен өндіруін төмендеуіне әкеледі.

Бұл мақалада жыныстағы ерітінді фильтрация кезінде гравитация күшінің ағын режиміне әсері зерттеледі. Жыныс пен ерітінді арасындағы әрекеттесуін есепке алмай тек тығыздықтарының әр түрлі қатынастағы жағдайда гравитация эффектісі ағынға әсері зерттеледі. Есептеулердің орындалуын жақсарту үшін CUDA технологиясы қолданылды. Нәтижелер CUDA технологиясын қолдану орталық процессор (CPU) арқылы есептеулермен салыстырғанда есептеу өнімділігі 40-80 есе арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Түйін сөздер: *жерасты шаймалау, минералды өндіру, ағын сызықтары, гравитация, CUDA технология, графикалық процессор, орталық процессор.*

**Б. Б. ОРАЗБАЕВ¹, А. К. ЖУМАДИЛЛАЕВА¹, А. А. ТАНИРБЕРГЕНОВА¹,
К. Н. ОРАЗБАЕВА², А. Б. КАЗИЕВА^{3*}**

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
г. Нур-Султан, Казахстан,

² Казахский университет экономики, финансов и международной торговли,
г. Нур-Султан, Казахстан,

³ Атырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева,
г. Атырау, Казахстан

ЗАДАЧА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ГИДРООЧИСТКИ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА В НЕЧЕТКОЙ СРЕДЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЕЕ РЕШЕНИЯ

Исследованы проблемы постановки и решения задачи принятия решений по управлению процессом гидроочистки в нечеткой среде и предложен эффективный метод решения таких задач с привлечением специалистов-экспертов и использованием их опыта, знания и интуиции. Математическая постановка задачи управления процессом гидроочистки, который протекает в реакторе гидроочистки и характеризуется нечеткостью исходной информации, получена в виде задачи принятия решений по выбору оптимального режима работы реактора гидроочистки. Критериями управления выбраны максимизация объема продукции, т.е. гидрогенизата, и улучшения качественных характеристик (минимизация содержания ненасыщенных углеводородов, серы, водорастворимых кислот и щелочей в гидрогенизате) производимой продукции. При математической постановке задачи принятия решений по управлению процессом гидроочистки в нечеткой среде и разработке метода ее решения использованы идеи принцип главного критерия и максимина путем адаптации их для работы в нечеткой среде. Разработан эвристический метод решения поставленной задачи принятия решений по управлению процессом гидроочистки в нечеткой среде. Новизна предлагаемого подхода к постановке и решению задачи принятия решений в нечеткой среде и оригинальность работы заключается в повышении адекватности принимаемого решения в нечеткой среде за счет максимального использования исходной нечеткой информации.

Ключевые слова: задача принятия решений, управление, процесс гидроочистки, реактор гидроочистки, гидрогенизат, эвристический метод, лицо, принимающее решение.

Введение. Для производства высококачественного бензина в нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ в основном используются технологические установки каталитического риформинга, состоящие из нескольких блоков [1, 2]. Первым и одним из основных блоков установки каталитического риформинга является блок гидроочистки. В блоке гидроочистки происходит процесс гидроочистки с участием технического водорода (водородсодержащий газ - ВСГ) и катализатора UOP – S-12T [3]. Установка каталитического риформинга ЛГ-35-11/300-95 предназначена для производства высокооктанового автомобильных бензинов с октановым числом до 95 пунктов по исследовательскому методу, ароматических углеводородов, используемых как сырье для нефтехимического синтеза и ВСГ [4, 5]. Описание технологической схемы блока гидроочистки установки ЛГ-35-11/300-95 Атырауского НПЗ и разработанные нами

* E-mail корреспондирующего автора: alua_15_1982@mail.ru

модели реактора риформинга, отпарной колонны, абсорберов и печи риформинга, являющиеся основными агрегатами блока гидроочистки приведены в работах [6, 7]. На основе этих моделей можно решить задачи принятия решений.

В настоящее время с возрастанием спроса на качественные моторные топлива на рынке нефтепродуктов, проблемы повышения качества бензина, в т.ч. очисткой бензина от вредных для двигателей и окружающей среде сернистых и других вредных соединений, является важной задачей науки и технологии нефтепереработки [8 – 10].

В этой связи весьма актуальной становятся решение задачи принятия решений по эффективному управлению процессом гидроочистки бензина и улучшения качества моторных топлив на основе современных математических методов.

Так как установка ЛГ-35-11/300-95 Атырауского НПЗ, в т.ч. блок риформинга данной установки, характеризуется дефицитом измеряемой, количественной информации и нечеткостью некоторых важных параметров, которые влияют на качество объекта, возникают проблемы разработки математического описания, оптимизации и управления процессом гидроочистки традиционными математическими методами. Но на данном объекте долгие годы работают опытные операторы-технологи, которые являются лицом, принимающим решение (ЛПР), экспертами и могут оптимально управлять процессом гидроочистки на основе своего опыта, знания и интуиций, т.е. используя нечеткую информацию.

В данной работе объектом исследования является блок гидроочистки установки каталитического риформинга типа ЛГ-35-11/300-95, которая эксплуатируется на Атырауском НПЗ [3]. В качестве сырья блока гидроочистки на Атырауском НПЗ используется прямогонный бензин, который поступает от установки первичной переработки нефти АВТ-3 ЭТ данного завода. Процесс гидроочистки протекает в среде водородсодержащего газа (ВСГ) и относится к каталитическим процессам, предназначенного для очистки и удаления из состава прямогонного бензина органических соединений серы, кислорода и азота, которые являются ядом для используемого в процессе гидроочистки катализатора.

В процесс гидроочистки происходит химическое преобразование сырья под воздействием водородного газа с высоким давлением и высокой температуры. При этом в составе нефтепродуктов, топлив снижается сернистые соединения, происходит насыщение дополнительных ненасыщенных углеводородов, уменьшение кислородсодержащиеся соединения и состава смолы, а также гидрокрекинг молекул углеводородов. Целевой продукцией блока гидроочистки является очищенный от перечисленных вредных соединений и составляющих бензин, который называется *гидрогенизатом*.

В связи с этим в качестве цели данной работы определена формулировка задач принятия решений по управлению процессом гидроочистки и разработка метода ее решения. Для достижения сформулированной цели в работе ставятся и решаются задачи: формализация и получения математической постановки задачи принятия решений по управлению процессом гидроочистки блока риформинга Атырауского НПЗ в нечеткой среде; разработка эвристического метода решения поставленной задачи принятия решений нечеткой среде на основе модификации методов главного критерия и максимина для работы в нечеткой среде.

Методы и материалы исследования. При управлении процессом гидроочистки приходится учитывать нечеткость некоторой части исходной информации и многокритериальность задачи, так как необходимо максимизировать объем целевой продукции и улучшить ее качественных показателей и минимизировать затраты, эти критерии могут быть противоречивыми. Поэтому задачу управления процессом гидроочистки следует сформулировать в виде задачи принятия решений (ПР) в нечеткой среде, решение которое позволяет найти оптимальный режим работы блока гидроочистки, позволяющий достигнуть экстремальных значений критериев управления. При решении сформулированной задачи определение значений критериев осуществляется на основе математических моделей процесса, позволяющие описать зависимость критериев (объем и качества продукции) от входных, режимных параметров технологических объектов блока гидроочистки.

Для формализации и математической постановки задачи ПР по оптимальному управлению процессов гидроочистки в нечеткой среде используются методология системного анализа [11], методы теорий принятия решений [12], нечетких множеств и экспертных оценок [10, 13, 14].

Результаты и их обсуждение. В блоке гидроочистки гидрогенизат, т.е. очищенный от вредных примесей бензин, получается на выходе реактора гидроочистки Р-1 и характеризуется объемом и качеством. В результате исследования определено, объем катализата можно определить на основе модели Р-1, разработанной на основе экспериментально-статистических, а качественные показатели гидрогенизата, так как характеризуются нечеткостью, определяются на основе нечеткой модели [6]. Задача ПР по управлению процессом гидроочистки в нечеткой среде решаются на основе этих моделей ректора гидроочистки Р-1 и формализуется следующим образом.

Пусть $F(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), f_4(\mathbf{x}))$ – вектор критериев оптимизации процесса гидроочистки, оценивающий объем $f_1(\mathbf{x})$ и качественные показатели гидрогенизата ($f_2(\mathbf{x})$ – содержание ненасыщенных углеводородов, $f_3(\mathbf{x})$ – серы и $f_4(\mathbf{x})$ – водорастворимых кислот и щелочей в продукции). Эти критерии зависят от вектора входных и режимных параметров $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ с помощью которых управляется процесс, где x_1 – расход сырья, т.е. объем прямогонного бензина на входе реактора Р-1; x_2 – давление в Р-1; x_3 – температура Р-1 и x_4 – объемная скорость подачи сырья; x_5 – отношение $\text{H}_2/\text{углеводороды}$, циркулирующий ВСГ. Возможные значения этих параметров ограничены и их значения могут меняться в определенных интервалах, задаваемые технологическим регламентом: $x_j \in \Omega \supset X$, $X = [x_j^{\min}, x_j^{\max}]$, $j = 1, 5$, где x_j^{\min}, x_j^{\max} – нижний и верхний пределы изменения параметра x_j , $j = 1, 5$. Эти ограничения, интервалы изменения могут быть нечеткими ($\tilde{>}, \tilde{<}, \tilde{=}$). Следует отметить, что локальные критерии, оценивающие качества гидрогенизата, т.е. $f_2(\mathbf{x})$, $f_3(\mathbf{x})$ и $f_4(\mathbf{x})$ описываются нечетко, например, с нечеткой инструкции типа: чем «меньше» заданного порогового значения, тем «лучше».

Требуется принимать решение по оптимальному управлению режимами работы реактора гидроочистки, позволяющий обеспечивать экстремальные значения критериев, соблюдая выполнения всех требований наложенных ограничений. Математи-

чекскую постановку формализованной задачи управления процессом гидроочистки в общем виде можно записать как задача ПР в нечеткой среде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} f_i(\mathbf{x}) \tag{1}$$

$$X = \{ \mathbf{x} \in \Omega, \varphi_q(\mathbf{x}) \gtrsim b_q, q = \overline{1, L} \} \tag{2}$$

Решением данной задачи ПР является значение вектора управляющих параметров $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*)$, которые обеспечивают наилучшие значения критериев $f_1^*(\mathbf{x})$, $f_2^*(\mathbf{x})$, $f_3^*(\mathbf{x})$, $f_4^*(\mathbf{x})$, удовлетворяющие ЛПР.

На практике при решении сложных производственных задач нечеткая информация, которая выражается ЛПР, экспертом в виде нечеткого высказывания, суждения и интуиции, а естественном языке, является основными и привычными для человека. Преобразование нечеткого описания в количественное не всегда удается или оказывается нецелесообразным. В этих случаях для решения нечеткой задачи более перспективным является подход, который основан на разработке методов ПР, приспособленных к человеческому языку, к нечетким факторам любого характера, к человеческим процедурам принятия решений. Известен подход, который на этапе постановки задачи исходная нечеткая задача на основе множеств уровня α заменяется набором четких задач, далее полученные четкие задачи решаются с помощью известных методов [13, 15]. Но при этом часть исходной нечеткой информации теряется, что приводит к снижению адекватности решения. В данной работе предлагается более эффективный подход, основанный на постановке и решения задачи в нечеткой среде, не преобразуя их к детерминированным задачам, т.е не теряя доступной информации нечеткого характера. В этом подходе за счет максимального использования собранной исходной нечеткой информации повышается адекватность полученного решения нечеткой задачи.

Для получения постановки задачи сформулированной задачи (1)–(2) в нечеткой среде примем определенные допущения и обозначения.

Пусть $\mu_0^1(\mathbf{x}), \mu_0^2(\mathbf{x}), \mu_0^3(\mathbf{x}), \mu_0^4(\mathbf{x})$ – нормализованные локальные критерии $f_1^*(\mathbf{x})$, $f_2^*(\mathbf{x})$, $f_3^*(\mathbf{x})$, $f_4^*(\mathbf{x})$, принимающие значения в интервале $[0, 1]$ и критериями управления процессом гидроочистки. Допустим, что для каждого нечеткого ограничения $\varphi_q(\mathbf{x}) \gtrsim b_q, q = \overline{1, 5}$ построена функция принадлежности, оценивающие их степень выполнения $\mu_q(\mathbf{x}), q = \overline{1, 5}$. Считаем известны или могут быть определены ряд приоритетов для критериев $I_C = \{1, 2, 3, 4\}$ и ограничений $I_R = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, либо весовые векторы, отражающие взаимную важность критериев $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ и ограничений $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)$.

Тогда, модифицируя идеи методов *главного критерия* (ГК) и *максимина* (ММ) для работы в нечеткой среде задачу принятия решений по управлению процессом гидроочистки, (1)–(2) можно записать в следующей постановке:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \tag{3}$$

$$X = \{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge \arg(\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_R^i) \wedge \arg(\max_{\mathbf{x} \in X} \min_q(\beta_q \mu_q(\mathbf{x})), i = \overline{2, 4}, q = \overline{1, 5}) \} \quad (4)$$

где \wedge – знак логического «и», который требует, чтобы все связываемые им утверждения были истинными, μ_R^i – граничные значения для локальных критериев $\mu_0^i(x), i = \overline{2, 4}$, задаваемые ЛПР. Область определения переменных $x_j, j = \overline{1, 5}$ и выполнения нечетких ограничений определяется на основе принципа максимина (гарантированного результата).

Меняя μ_R^i и вектора важности ограничений $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_5)$, можно получить семейство решений задачи (3)–(4): $x_i^*(\mu_R^i, \beta)$. Выбор наилучшего решения производится в итеративном режиме на основе диалога с ЛПР.

На основе принципов ГК (для критериев) и ММ (для ограничений) предлагается следующий эвристический метод решения задачи ПР (3)–(4), сформулированной для управления технологическим процессом (на примере процесса гидроочистки).

Метод ГК+ММ:

1. Задается число шагов по каждой q -ой координате $p_q, q = \overline{1, L}$ и ряд приоритета для локальных критериев $I_C = \{1, \dots, m\}$, где L и m – количество ограничений и критериев. При этом главному критерию должен присваиваться приоритет 1;

2. ЛПР вводится значение весового вектора ограничений $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_L)$, учитывающее важность каждого ограничения β_1, \dots, β_L .

3. ЛПР назначаются граничные значения для локальных критериев (кроме первого), которые учитываются в составе ограничений $\mu_R^i(x), i = \overline{2, m}$.

4. Вычисляются $h_q = \frac{1}{p_q}, q = \overline{1, L}$ – величины шагов для изменения координат весового вектора β .

5. Построение набора весовых векторов $\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N, N = (p_1 + 1) \cdot (p_2 + 1) \cdot \dots \cdot (p_L + 1)$, путем изменения координат на отрезках $[0, 1]$ с шагом h_q .

6. Определяется терм-множество $T(X, Y)$, которое нечетко описывает параметры объекта и процесса.

7. Строятся функции принадлежности выполнения нечетких ограничений $\mu_q(x), q = \overline{1, L}$.

8. На основе модели производится максимизируется главный критерий (3) на множестве X , определяемом по принципу максимина (4) и определяются текущие решения: $\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta); \mu_0^1(\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta)), \mu_0^2(\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta)); \mu_1(\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta)), i = \overline{2, m}$.

9. Полученные результаты предъявляются ЛПР. Если текущие решения не удовлетворяют ЛПР, то им корректируются значения $\mu_R^i(x), i = \overline{2, m}$ и/или β и осуществляется возврат к пункту 3. Иначе, перейти к следующему пункту.

10. Поиск решения прекращается, выводятся результаты окончательного выбора ЛПР: значения вектора управления $\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \beta)$; значения локальных критериев

$\mu_0^1(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \beta)), \mu_0^2(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \beta)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \beta)), i = \overline{2, m}$ и степень выполнения нечетких ограничений $\mu_1(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \beta)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \beta)), i = \overline{2, m}$.

Полученные результаты оптимизации выхода гидрогенизата с ректора Р-1 в зависимости от изменения температуры в Р-1 при фиксированных значения остальных входных, режимных параметров (x_1, x_2, x_4 и x_5) приведены в виде графика на рисунке 1.

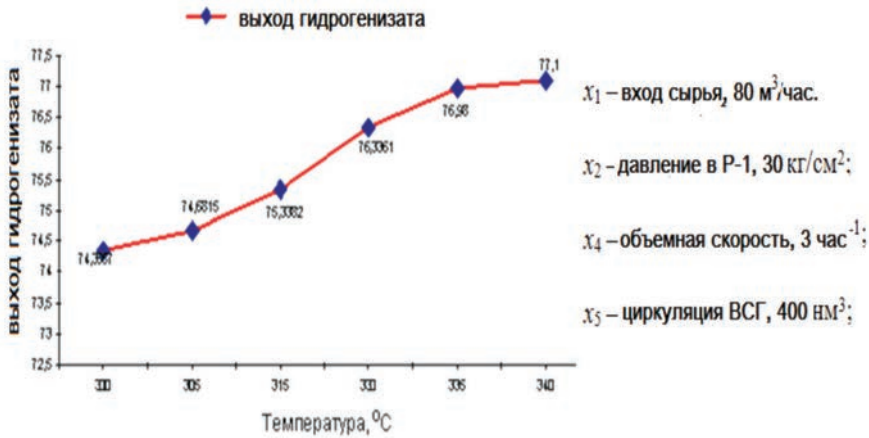


Рисунок 1 – График зависимости $y_1 = f_1(x_3)$ при фиксированных x_1, x_2, x_4 и x_5 .

Обсуждение результатов. Формализованная задача ПР по управлению процессом гидроочистки с учетом нечеткости некоторой части исходной информации и полученная математическая постановка данной задачи (3)–(4) является общей для задач управления различными технологическими процессами. Для применения предложенного подхода к постановке задач управления технологическими процессами в нечеткой среде необходимо конкретизировать количество критериев, ограничения и определить источники нечеткости в критериях, ограничениях или весовых коэффициентах. В приведенной постановке задачи рассмотрена случай нечеткости в ограничениях, которые учитываются на основе функции принадлежности, оценивающие степень выполнения этих нечетких ограничений. Если критерии или весовые коэффициенты являются нечеткими, то для них следует строить функции принадлежности, которые позволяют учитывать их нечеткости. В приведенной постановке задачи управления (3)–(4), для удобства применения методов нечетких множеств критерии предварительно нормализуются, чтобы они принимали значения, как и функции принадлежности, в интервале [0, 1]. Для определения значения критериев используются математические модели реактора Р-1, построенные в [6] с учетом нечеткости исходной информации.

Предложенный эвристический метод решения задачи ПР по управлению технологическим процессом описан для общего случая, с произвольным количеством критериев и ограничений. Метод основан на использовании и модификации идеи принципов главного критерия (для критериев) и максимина (для ограничений). Данный

метод более эффективно применяется в случае возможности выделения ЛПП, экспертами главного критерия и необходимости обеспечения гарантированного выполнения требований нечетких ограничений. В случае затруднения или невозможности использования принципов главного критерия и максимина рекомендуется выбрать другие принципы оптимальности (Парето оптимальности, равенства, идеальной точки и др.) и их сочетания, которые подходят для сложившейся на производстве ситуации и имеющейся исходной информации.

Заключение. В работе исследованы проблемы постановки задачи принятия решений по управлению процессом гидроочистки установки каталитического риформинга в нечеткой среде и подходы к решению таких задач. Разработан эвристический метод решения поставленной задач принятия решений по управлению процессом гидроочистки в нечеткой среде. В известные постановки и нечетких задач, и методов их решения, которые основаны на этапе постановки преобразование исходной нечеткой задачи к набору эквивалентных четких задач на основе множества уровня α , что приводит к потере части собранной исходной нечеткой информации и впоследствии снижается адекватность принимаемого решения. В отличие от этого в предложенном нечетком подходе задача ставится и решается в нечеткой среде. При постановке задачи принятия решений по управлению режимами работы реактора с целью оптимизации процесса гидроочистки и разработке метода ее решения использованы модифицированные для работы в нечеткой среде принципы главного критерия и максимина. Предложенный метод основан на использование знания, опыта и интуиции ЛПП и является итеративным, позволяющим последовательно улучшать результаты решения.

Новизна предлагаемого подхода к решению задачи управления в нечеткой среде заключается в постановке и решении нечеткой задачи в нечеткой среде, не преобразуя ее в систему четких задач. В результате максимального использования исходной нечеткой информации (опыт, знания, интуиции специалистов-экспертов) повышается адекватность решения задачи в нечеткой среде. Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности эффективного применения их при решении производственных задач в нечеткой среде для управления режимами работы реальных технологических объектов.

Багодарности. *Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08855680 - Интеллектуализированная система поддержки принятия решений для управления режимами работы установки каталитического риформинга).*

ЛИТЕРАТУРА

1 Кондрашева Н.К., Кондрашев Д.О. Технологические расчеты и теория каталитического риформинга бензина. –Уфа: ООО "Монография", 2018. 2-изд. – 212 с.

2. Adzamic Z., Besic S. The impact of the catalytic reforming operation severity on cycle duration and product quality at the Rijeka oil refinery // Fuels and lubricants. –2013, – Vol. 42, –No 1, – P. 83–87.

3 Технологический регламент установки каталитического риформинга ЛГ-35-11/300-95. -Атырау: 2018. -135 с.

4 Смидович Е.В. Технология переработки нефти и газа. Крекинг нефтяного сырья и переработка углеводородных газов. 4-е изд., стереотип. – М.: ИД Альянс, 2011. – С.186–195.

5 Абдульминев К.Г., Ахметов А.Ф., Сайфуллин Н.Р. Производство ароматических углеводородов и высокооктановых бензинов // Башкирский химический журнал. – 2017. Том 7. – No 2, – С. 47–50.

6 Orazbayev B., Ospanov Ye.A., Orazbayeva K.N., Makhatova V.E, Development of mathematical models of R-1 reactor hydrotreatment unit using available information of various types // Journal of Physics: Conference Series 1399. –2019. 044024. –P.1-6. doi:10.1088/1742-6596/1399/4/044024.

7 Оразбаев Б.Б., Танирбергенова А.А., Оразбаева К.Н., Тулеуова Р., Курмангазиева Л.Т. Разработка комплекса математических моделей колонн и печи блока гидроочистки на основе исходной информации различного характера // Вестник КазНИТУ. – 2020. – No 4(140), – С. 261–269.

8 Sharikov Yu.V., Petrov P.A. Universal model for catalytic reforming // Chemical and Petroleum Engineering. –2013. Vol. 43. – No 9, – P. 580–597.

9 Сотников В.В., Борзов А.Н., Сибаров Д.А., Лисицын Н.В. Математическая модель для управления процессом гидроочистки // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Сб. тр. Междунар. науч. конф. –Орел: ОрелГТУ, 2004. Т. 3. – С. 43–48.

10 B.B. Orazbayev, D.O. Kozhakhmetova, K.N. Orazbayeva, G.Y. Berikkhanova. Development of System of Model Columns K-1, K-2 And K-3 for Fluid Catalytic Cracking Unit based on Varying Information // Workshop The 2nd Int. Conf. on Information Management and Processing. 2019. -P. 122-125. Doi.org/10.1145/3312714.3312727.

11 Pavlov S.Yu., Kulov N.N., Kerimov R.M. Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. –2016. V. 53. – No 2. – P. 117–133.

12 Юдин Д.Б. Вычислительные методы теории принятия решений. –М.: Наука, 2015. –320 с.

13 Рыжов А.П. Теория нечетких множеств и ее приложений. –М.: МГУ. 2017. – 115 с.

14 Гуцыкова С. Метод экспертных оценок. Теория и практика. – М.: Когито-Центр. 2017. –509 с.

15 Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. –М.: Энергоатомиздат, 1991. 307 с.

REFERENCES

1 Kondrasheva N.K., Kondrashev D.O. Technological calculations and the theory of catalytic reforming of gasoline. -Ufa: LLC "Monograph", 2018.2-ed. - 212 p. [in Russian]

2 Adzamic Z., Besic S. The impact of the catalytic reforming operation severity on cycle duration and product quality at the Rijeka oil refinery // Fuels and lubricants. –2013, –Vol. 42, –No 1, –P. 83-87.

3 Technological regulations for the catalytic reforming unit LG-35-11/300-95. -Atyrau: 2018.-135 p. [in Russian]

4 Smidovich E.V. Oil and gas processing technology. Cracking of crude oil and processing of hydrocarbon gases. 4th ed., Stereotype. –M.: ID Alliance, 2011. –S.186–195. [in Russian]

5 Abdulminev K.G., Akhmetov A.F., Sayfullin N.R. Production of aromatic hydrocarbons and high-octane gasolines // Bashkir Chemical Journal. –2017. Vol. 7. –No 2, –С. 47-50. [in Russian]

6 Orazbayev B., Ospanov Ye.A., Orazbayeva K.N., Makhatova V.E, Development of mathematical models of R-1 reactor hydrotreatment unit using available information of various types // Journal of Physics: Conference Series 1399. –2019. 044024. –P.1-6. doi: 10.1088 / 1742-6596 / 1399/4/044024.

7 Orazbaev BB, Tanirbergenova A.A., Orazbaeva K.N., Tuleuova R., Kurmangazieva L.T. Development of a complex of mathematical models of columns and furnaces of a hydrotreating unit based on initial information of various nature // Bulletin of KazNRTU. –2020. –No 4 (140), –С. 261-269. [in Russian]

8 Sharikov Yu.V., Petrov P.A. Universal model for catalytic reforming // Chemical and Petroleum Engineering. –2013. Vol. 43. –No 9, –P. 580-597.

9 Sotnikov V.V., Borzov A.N., Sibarov D.A., Lisitsyn N.V. Mathematical model for control of the hydrotreating process // Information technologies in science, education and production: Collection of articles. tr. Int. scientific. conf. –Orel: OrelGTU, 2004. Т. 3. –S. 43–48. [in Russian]

10 B.B. Orazbayev, D.O. Kozhakhmetova, K.N. Orazbayeva, G.Y. Berikkhanova. Development of System of Model Columns K-1, K-2 And K-3 for Fluid Catalytic Cracking Unit based on Varying Information // Workshop The 2nd Int. Conf. on Information Management and Processing. 2019. –P. 122-125. Doi.org/10.1145/3312714.3312727.

11 Pavlov S. Yu., Kulov N.N., Kerimov R.M. Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. –2016. Vol. 53. –No 2. –P. 117-133.

12 Yudin D.B. Computational methods of decision theory. –M: Nauka, 2015. –320 p. [in Russian]

13 Ryzhov A.P. The theory of fuzzy sets and its applications. –M: MSU. 2017. –115 p. [in Russian]

14 Gutsikova S. Method of expert assessments. Theory and practice. –M: Kogito-Center. 2017. –509 p. [in Russian]

15 Aliev R.A., Tserkovny A.E., Mamedova G.A. Production management with fuzzy initial information. –M: Energoatomizdat, 1991. 307 p. [in Russian]

**Б. Б. ОРАЗБАЕВ¹, А. К. ЖУМАДИЛЛАЕВА¹, А. А. ТАНИРБЕРГЕНОВА¹,
К. Н. ОРАЗБАЕВА², А. Б. КАЗИЕВА³**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нур-Сұлтан қ., Қазақстан,

²Қазақ экономика және халықаралық сауды университеті,
Нур-Сұлтан қ., Қазақстан,

³С. Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті,
Атырау қ. Қазақстан

КАТАЛИТИКАЛЫҚ РИФОРМИНГ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ГИДРОТАЗАЛАУ ПРОЦЕСІН БАСҚАРУ БОЙЫНША АЙҚЫН ЕМЕС ОРТАДА ШЕШІМ ҚАБЫЛДАУ ЕСЕБІ ЖӘНЕ ОНЫ ШЕШУ ТӘСІЛІН ЖАСАҚТАУ

Айқын емес ортада гидротазалау процесін басқару бойынша шешім қабылдау есептерін тұжырымдау және шешу проблемалары зерттеліп, мамандарды қатысуымен, олардың тәжірибесін, білімі мен интуициясын қолдана отырып осындай есептерді шешудің тиімді тәсілі ұсынылған. Гидротазалау реакторында болатын және алғашқы ақпараттың айқынсыздығымен сипатталатын гидротазалау процесін басқару есебігің математикалық қойылымы гидротазалау реакторының оптималды жұмыс режимін таңдау бойынша шешім қабылдау есебі түрінде алынған. Басқару критерийлері ретінде өндірілетін өнім, яғни гидрогенизат көлемін максимизация-

ялау және оның сапалық сипаттамаларын жақсарту минимизациялау алынған. Айқын емес ортада гидротазалау процесін басқару үшін шешім қабылдау есебінің математикалық қойылымында және оларды шешу тәсілін құруда бас критерий мен максимин принциптерінің идеялары оларды айқынсыздықта жұмыс жасауға бейімдеу арқылы қолданылды. Айқын емес ортада гидротазалау процесін басқару бойынша шешім қабылдау есебін шешу үшін эвристикалық әдіс жасақталды. Айқын емес ортада басқару есебін қою мен оны шешу үшін ұсынылған тәсілдеменің жаңалығы айқын емес ақпаратты максималды қолданылуы арқылы айқынсыздықта қабылданған шешімнің адекваттығының артуында.

Түйін сөздер: шешім қабылдау, басқару, гидротазалау процесі, гидротазалау реакторы, гидрогенизация, эвристикалық тәсіл, шешім қабылдаушы тұлға.

**B. ORAZBAYEV, A. ZHUMADILLAYEVA,
A. TANIRBERGENOVA, K. ORAZBAYEVA, A. KAZIEVA**

¹ *L.N. Gumilev Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

² *Казахский университет экономики, финансов и международной торговли
Nur-Sultan, Kazakhstan*

³ *Атырауский университет нефти и газа им. С.Утебаева, г.Атырау. Kazakhstan*

PROBLEM OF DECISION-MAKING ON CONTROL OF THE PROCESS OF HYDRAULIC TREATMENT OF A CATALYTIC REFORMING PLANT IN A FUZZY MEDIUM AND DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ITS SOLUTION

The problems of formulating and solving the problem of making decisions on the control of the hydrotreating process in a fuzzy environment are investigated and an effective method for solving such problems with the involvement of experts, their experience, knowledge and intuition is proposed. The statement of the problem of controlling the hydrotreating process, which takes place in the hydrotreating reactor and is characterized by the indistinctness of the initial information, is obtained in the form of the problem of making decisions on the choice of the optimal operating mode of the hydrotreating reactor. The management criteria were chosen to maximize the volume of production, i.e. hydrogenate, and improving the quality characteristics of the manufactured products. In the mathematical formulation of the decision-making problem for the management of the hydrotreating process in a fuzzy environment and the development of a method for its solution, the ideas of the principle of the main criterion and maximin were used by adapting them to work in a fuzzy environment. A heuristic method has been developed for solving the assigned decision-making tasks for controlling the hydrotreating process in a fuzzy environment. The originality and novelty of the applied approach to the formulation and solution of the decision-making problem in a fuzzy environment consists in increasing the adequacy of the decision made in a fuzzy environment due to the maximum use of the initial fuzzy information.

Keywords: decision making problem, control, hydrotreating process, hydrotreating reactor, hydrogenate, heuristic method, decision maker.

А. О. СУЛЕЙМБЕКОВА*Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,**Нур-Султан, Казахстан**E-mail: suleimbekovaa@mail.ru***О СУЩЕСТВОВАНИИ РЕЗОЛВЕНТЫ И РАЗДЕЛИМОСТИ ОДНОГО КЛАССА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА**

В работе для одного класса дифференциальных операторов третьего порядка изучается вопрос о существовании резольвенты и разделимости оператора.

В данной работе при некоторых ограничениях на коэффициенты доказано существование резольвенты и найдено условие обеспечивающее разделимость оператора.

Ключевые слова: *разделимость, резольвента, дифференциальный оператор третьего порядка*

Уравнения в частных производных третьего порядка лежат в основе математических моделей многих явлений и процессов. Вопросам разрешимости краевых задач для дифференциальных уравнений третьего порядка посвящена значительная литература [1-6].

Как известно, если граничный режим действует достаточно долго, то благодаря трению, присущему всякой реальной физической системе, влияние начальных данных с течением времени ослабевает. Таким образом, мы приходим к задаче без начальных условий [7].

Рассмотрим дифференциальный оператор

$$Lu = \frac{\partial u}{\partial y} + R_2(y) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + R_1(y) \frac{\partial u}{\partial x} + R_0(y)u + \lambda u \quad (1.1)$$

первоначально определенный на $C_0^\infty(R^2)$, $\lambda \geq 0$.

C_0^∞ - множество, состоящее из бесконечно дифференцируемых финитных функций в R^2 .

В дальнейшем предположим, что коэффициенты $R_0(y)$, $R_1(y)$, $R_2(y)$ удовлетворяют условиям:

i) $R_0(y) \geq \delta_0 > 0$, $R_1(y) \geq \delta_1 > 0$, $-R_2(y) \geq \delta_2 > 0$ и непрерывные функции в $R = (-\infty, \infty)$;

ii) $\mu_0 = \sup_{|y-t| \leq 1} \frac{R_0(y)}{R_0(t)} < \infty$; $\mu_1 = \sup_{|y-t| \leq 1} \frac{R_1(y)}{R_1(t)} < \infty$; $\mu_2 = \sup_{|y-t| \leq 1} \frac{R_2(y)}{R_2(t)} < \infty$.

Оператор $L + \lambda I$ допускает замыкание в пространстве $L_2(R^2)$, которое обозначим так же через $L + \lambda I$.

Теорема 1. Пусть выполнено условие i). Тогда оператор $L + \lambda I$ при $\lambda \geq 0$ непрерывно обратим в пространстве $L_2(R^2)$.

Определение 1. Будем говорить – оператор разделим в пространстве $L_2(R^2)$, если для функций $u \in D(L)$ имеет место оценка

$$\left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|_2 + \left\| R_2(y) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right\|_2 + \left\| R_1(y) \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_2 + \|R_0(y)u\|_2 \leq C(\|Lu\|_2 + \|u\|_2),$$

где C – не зависит от $u(x, y)$, $\|\cdot\|_2$ – норма в $L_2(R^2)$, $D(L)$ – область определения оператора L .

Теорема 2. Пусть выполнены условия i) – ii). Тогда оператор L разделим.

Пример. Пусть $R_0(y) = |y| + 1$, $R_1(y) = e^{|y|}$, $R_2(y) = -10 \cdot e^{|y|}$, $-\infty < y < \infty$. Нетрудно убедиться, что выполняются все условия теоремы 2. Следовательно, оператор L разделим, т.е.

$$\left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|_2 + \left\| 10 \cdot e^{|y|} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right\|_2 + \left\| e^{|y|} \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_2 + \|(|y| + 1)u \|_2 \leq C(\|Lu\|_2 + \|u\|_2),$$

C – постоянное число.

2 Вспомогательные леммы и неравенства.

Лемма 2.1. Пусть выполнено условие i) и $\lambda \geq 0$. Тогда для всех $u \in D(L)$ выполняется неравенство

$$\|(L + \lambda)u\|_2 \geq (\delta_0 + \lambda)\|u\|_2, \quad (2.1)$$

где $\delta_0 > 0$.

Доказательство следует из функционала $\langle (L + \lambda)u, u \rangle$, где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – скалярное произведение в $L_2(R^2)$, $u \in D(L)$.

Рассмотрим оператор

$$(l_{t,j} + \lambda)z = z'(y) + (-it^3 R_{2,j}(y) + itR_{1,j}(y) + R_{0,j}(y))z(y),$$

где $R_{2,j}, R_{1,j}, R_{0,j}(y)$ – ограниченные периодические функции одного и того же периода $\Delta_j = (j-1, j+1)$, $j = 0, \pm 1, \pm 2$, $z(y) \in C_0^\infty(R)$, $-\infty < t < \infty$, $z(y) = u(y) + i\vartheta(y)$.

Нетрудно проверить, что оператор $l_{t,j}$ допускает замыкание в пространстве $L_2(R)$ и замыкание также обозначим через $l_{t,j}$.

Лемма 2.2. Пусть выполнено условие i). Тогда для всех $z(y) \in D(l_{t,j} + \lambda)$ справедлива оценка:

$$\|(l_{t,j} + \lambda)z\|_2 \geq (\delta_0 + \lambda)\|z\|_2. \quad (2.2)$$

Доказательство. Лемма 2.2 доказывается точно так же, как лемма 2.1.

Лемма 2.3. Пусть выполнено условие i). Тогда оператор $(l_{t,j} + \lambda)$ имеет непрерывный обратный оператор $(l_{t,j} + \lambda)^{-1}$ определенный на всем $L_2(R)$.

Доказательство. В силу оценки (2.2) достаточно показать, что область значений плотно в $L_2(R)$.

Допустим, что область значений не является плотным в $L_2(R)$. Тогда существует элемент $\vartheta \in L_2(R)$ такой, что $\langle (l_{t,j} + \lambda I)u, \vartheta \rangle = 0$ для всех $u \in D(l_{t,j})$. Это означает

$$(l_{t,j} + \lambda I)^* \vartheta = -\vartheta' + (it^3 R_{2,j}(y) - itR_{1,j}(y) + R_{0,j}(y))\vartheta = 0 \tag{2.3}$$

в смысле теории обобщенных функций. В силу периодичности функций $R_{2,j}, R_{1,j}, R_{0,j}(y)$ имеем, что $(it^3 R_{2,j}(y) - itR_{1,j}(y) + R_{0,j}(y))\vartheta \in L_2(R)$. Отсюда и из (2.3) следует, что $\vartheta \in W_2^1(R)$, где $W_2^1(R)$ – пространство Соболева. Из общей теории теоремы вложения следует

$$\lim_{|d| \rightarrow \infty} \vartheta(y) = 0. \tag{2.4}$$

Теперь, пользуясь равенством (2.4) и выкладками использованных при доказательстве оценки (2.2), получаем

$$\| (l_{t,j} + \lambda I)^* \vartheta \|_2 \geq \delta_0 \| \vartheta \|_2. \tag{2.5}$$

Отсюда и из (2.3) следует, что $\vartheta = 0$. Лемма 2.3 доказана.

Пусть $\{ \varphi_j \}_{j=-\infty}^{\infty} \in C_0^\infty(R)$ набор таких функций, что $\varphi_j(y) \geq 0$, $\text{supp } \varphi_j \subseteq \Delta_j (j \in Z)$, $\sum_{j=-\infty}^{\infty} \varphi_j^2(y) = 1$.

Здесь сразу заметим, что любая точка $C \in R$ может принадлежать не более трем отрезкам из системы отрезков $\{ \text{supp } \varphi_j \}$ [8,10].

Положим

$$K_\lambda f = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \varphi_j(y) (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \varphi_j f,$$

$$B_\lambda f = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \varphi_j'(y) (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \varphi_j f, \quad f \in C_0^\infty(R), \lambda \geq 0.$$

Нетрудно проверить, что

$$(l_t + \lambda I) K_\lambda f = f + \sum_j \varphi_j'(l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \varphi_j f,$$

где

$$(l_t + \lambda I) z = z'(y) + (-it^3 R_2(y) + itR_1(y) + R_0(y)) z, \quad z \in D(l_t).$$

Лемма 2.4. Пусть выполнено условие i). Тогда найдется число $\lambda_0 > 0$ такое, что $\|B_\lambda\|_{L_2 \rightarrow L_2} < 1$ при всех $\lambda \geq \lambda_0$.

Доказательство. Пусть $f \in C_0^\infty(R)$. На промежутке $\bar{\Delta}_j$ ($j \in Z$) отличны от нуля только функции, $\Phi_{j-1}, \Phi_j, \Phi_{j+1}$, следовательно:

$$\|B_\lambda f\|_{L_2(R)}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \sum_{j=-\infty}^{\infty} \varphi'_j(l_{t,j} + \lambda M)^{-1} \varphi_j f \right|^2 dy \leq \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int \left| \sum_{k=j-1}^{j+1} \left[\varphi'_k(l_{t,k} + \lambda M)^{-1} \varphi_k f \right] \right|^2 dy.$$

Отсюда, пользуясь очевидным неравенством $(a + b + c)^2 \leq 3(a^2 + b^2 + c^2)$ и пользуясь оценкой (2.2), имеем:

$$\begin{aligned} \|B_\lambda f\|_{L_2(R)}^2 &\leq \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int \left| \sum_{k=j-1}^{j+1} \left[\varphi'_k(l_{t,k} + \lambda M)^{-1} \varphi_k f \right] \right|^2 dy \leq 9 \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left\| \varphi'_j(l_{t,j} + \lambda M)^{-1} \varphi_j f \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \\ &\leq 9 \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left\| \varphi'_j(l_{t,j} + \lambda M)^{-1} \varphi_j f \right\|_{L_2(R)}^2 \leq 9 \cdot A \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left\| (l_{t,j} + \lambda M)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)}^2 \cdot \left\| \varphi_j \cdot f \right\|_{L_2(R)}^2 \leq \\ &= \frac{9 \cdot c}{(\delta_0 + \lambda)^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_j \varphi_j^2 \right) |f|^2 dy = \frac{9 \cdot c}{(\delta_0 + \lambda)^2} \cdot \|f\|_{L_2(R)}^2. \end{aligned}$$

Отсюда получаем, что

$$\|B_\lambda\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq \frac{9 \cdot c}{(\delta_0 + \lambda)^2}. \tag{2.6}$$

Из (2.6) следует, что нетрудно найти такое число $\lambda_0 > 0$, что при $\lambda \geq \lambda_0$, $\|B_\lambda\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} < 1$. Лемма 2.4 доказана.

Теперь рассмотрим оператор

$$(l_t + \lambda M)z = z'(y) + (-it^3 R_2(y) + itR_1(y) + R_0(y))z(y),$$

где $z(y) = u(y) + i\vartheta(y)$, $z(y) \in C_0^\infty(R)$, $-\infty < t < \infty$, $(R = (-\infty, \infty))$.

Лемма 2.5. Пусть выполнено условие i). Тогда для всех $z \in D(l_t)$ справедлива оценка

$$\|(l_t + \lambda M)z\|_2 \geq (\delta_0 + \lambda)\|z\|_2. \tag{2.7}$$

Доказательство. Повторяя выкладки и рассуждения, которые использованы при доказательстве леммы 2.2, получаем доказательство леммы 2.5.

Лемма 2.6. Пусть выполнено условие i). Тогда оператор $l_t + \lambda M$ при $\lambda \geq \lambda_0$ ограниченно обратим, причем для обратного оператора $(l_t + \lambda M)^{-1}$ выполняется равенство

$$(I_t + \lambda M)^{-1} = K_\lambda (E - B_\lambda)^{-1} . \tag{2.8}$$

Доказательство леммы 2.6 следует из представления (2.6) и лемм 2.4 и 2.5.

3. Существование резольвенты. Доказательство теоремы 1.

В этом пункте докажем теорему 1. Для этого сначала дадим следующее определение:

Определение 2. Решением уравнения $(L + \lambda M)u = f$ в пространстве $L_2(R^2)$ назовем функцию $u \in L_2(R^2)$, для которой существует последовательность $\{u_n\}_{n=1}^\infty \subset C_0^\infty(R^2)$ такая, что

$$\|u_k - u\|_2 \rightarrow 0, \quad \|(L + \lambda M)u_k - f\|_2 \rightarrow 0 \text{ при } k \rightarrow \infty .$$

Рассмотрим уравнение

$$Lu = \frac{\partial u}{\partial y} + R_2(y) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + R_1(y) \frac{\partial u}{\partial x} + R_0(y)u + \lambda u = f \in C_0^\infty(R^2) \tag{3.1}$$

Применяя преобразование Фурье по x к уравнению (3.1), получим следующее уравнение

$$(I_t + \lambda M)\tilde{u} = -\tilde{u}(t, y) + (-it^3 R_2(y) + itR_1(y) + R_0(y))\tilde{u} = \tilde{f}(t, y) \tag{3.2}$$

где $\tilde{u}(t, y)$, $\tilde{f}(t, y)$ – преобразование Фурье по переменной x функции $u(x, y)$, $f(x, y)$. В дальнейшем обозначим через $F_{x \rightarrow t}$ преобразование Фурье, а формулу обращения Фурье – через $F_{t \rightarrow x}^{-1}$.

Теперь нетрудно заметить, что задача о решении уравнения (3.1) перейдет в задачу о решении уравнения (3.2). Далее, согласно лемме 2.6, получим

$$\tilde{u} = (I_t + \lambda M)^{-1} \tilde{f} = K_\lambda (I - B_\lambda)^{-1} \tilde{f}$$

Отсюда, используя обратный оператор $F_{t \rightarrow x}^{-1}$ имеем:

$$u(x, y) = F_{t \rightarrow x}^{-1} \tilde{u} = F_{t \rightarrow x}^{-1} (I_t + \lambda M)^{-1} \tilde{f} \tag{3.3}$$

Как известно, множество $C_0^\infty(R^2)$ плотно в $L_2(R^2)$. Отсюда, переходя к пределу, в силу ограниченности и непрерывности преобразования Фурье, получим доказательство для любого $f(x, y) \in L_2(R^2)$. Единственность следует из леммы 2.1. Теорема 1 доказана.

4. О разделимости оператора. Доказательства теоремы 2.

Сначала приведем лемму, сводящий вопрос разделимости оператора с неограниченными коэффициентами к случаю оператора с периодическими коэффициентами.

Лемма 2.7. Пусть $z(y) \in D(l_{t,j} + \lambda I)$ и $z(y) = u(y) + i\vartheta(y)$, тогда $it^3 R_2(y)z(y) \in L_2(R)$, тогда и только тогда, когда $t^3 R_2(y)u(y) \in L_2(R)$ и $t^3 R_2(y)\vartheta(y) \in L_2(R)$.

Доказательство. Необходимость. Пусть $it^3 R_2(y)z(y) \in L_2(R)$. Тогда

$$\begin{aligned} \|it^3 R_2(y)z(y)\|_2^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |it^3 R_2(y)z(y)|^2 dy = \int_{-\infty}^{\infty} |t^6 R_2^2(y)||z(y)|^2 dy = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |t|^6 R_2^2(y) (|u|^2 + |\vartheta|^2) dy = \|t^3 R_2(y)u\|_2^2 + \|t^3 R_2(y)\vartheta\|_2^2 \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $t^3 R_2(y)u(y) \in L_2(R)$ и $t^3 R_2(y)\vartheta(y) \in L_2(R)$.

Достаточность. Пусть $t^3 R_2(y)u(y) \in L_2(R)$ и $t^3 R_2(y)\vartheta(y) \in L_2(R)$. Тогда

$$\|it^3 R_2(y)z(y)\|_2^2 = \|t^3 R_2(y)u\|_2^2 + \|t^3 R_2(y)\vartheta\|_2^2$$

Отсюда $it^3 R_2(y)z(y) \in L_2(R)$. Лемма доказана.

Замечание. Такая лемма верна и для $itR_{1,j}(y)z(y)$.

В силу этой леммы оператор

$$(l_{t,j} + \lambda I)u = u'(y) + (-it^3 R_{2,j}(y) + itR_{1,j}(y) + R_{0,j}(y) + \lambda)u$$

рассмотрим в $C_0^\infty(R)$ – множестве бесконечно дифференцируемых, финитных и вещественнозначных функций, где $R_{0,j}(y), R_{1,j}(y), R_{2,j}(y)$ – ограниченные периодические функции одного и того же периода $\Delta_j = (j-1, j+1)$, $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Лемма 2.8. Пусть выполнено условие i). Тогда для всех $u(y) \in D(l_{t,j} + \lambda I)$ справедливы оценки:

$$\|(l_{t,j} + \lambda I)u(y)\|_2 \geq R_0(y_j) \|u\|_2, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{4.1}$$

где $R_0(y_j) = \min_{y \in \Delta_j} R_{0,j}(y)$;

$$\|(l_{t,j} + \lambda I)u(y)\|_2 \geq |t| R_1(\overline{y_j}) \|u\|_2, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{4.2}$$

где $R_1(\overline{y_j}) = \min_{y \in \Delta_j} R_{1,j}(y)$;

$$\|(l_{t,j} + \lambda I)u(y)\|_2 \geq |t|^3 |R_2(\overline{\overline{y_j}})| \|u\|_2, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{4.3}$$

где $R_2(\overline{\overline{y_j}}) = \min_{y \in \Delta_j} |R_{2,j}(y)|$.

Доказательство. Пусть $u(y) \in C_0^\infty(R)$. Учитывая, что $\int_{-\infty}^{\infty} u'(y)u(y) dy = 0$ и повторяя выкладки, которые использованы при доказательстве леммы 2.1, имеем:

$$\left| \langle (l_{t,j} + \lambda I)u, u \rangle \right| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} (-it^3 R_{2,j}(y) + itR_{1,j}(y) + R_{0,j}(y) + \lambda) u^2 dy \right|, \quad (4.4)$$

Отсюда получим, что

$$\left| \langle (l_{t,j} + \lambda I)u, u \rangle \right| \geq \left| \int_{-\infty}^{\infty} R_{0,j}(y) |u|^2 dy \right| \geq \min_{y \in \Delta_j} R_0(y) \|u\|_2^2. \quad (4.5)$$

Пользуясь неравенством Коши-Буняковского из (4.5), получаем, что

$$\left\| (l_{t,j} + \lambda I)u \right\|_2 \geq R_0(y_j) \|u\|_2, \quad (4.6)$$

где $R_0(y_j) = \min_{y \in \Delta_j} R_0(y)$.

Из неравенства (4.6) получаем доказательство неравенства (4.1) леммы 2.8. Неравенства (4.2) и (4.3) доказываются так же, как неравенство (4.1). Лемма 2.8 доказана.

Лемма 2.9. Пусть выполнено условие i) и $\lambda \geq \lambda_0$, $\alpha = 0, 1, 2, 3$, $\rho(y)$ – заданная на непрерывная функция. Тогда имеет место оценка

$$\left\| \rho(y) |t|^\alpha (l_t + \lambda E)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)}^2 \leq c(\lambda) \sup_{j \in Z} \left\| \rho(y) |n|^\alpha \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j) \rightarrow L_2(\Delta_j)}^2. \quad (4.7)$$

Доказательство. Пусть $f \in C_0^\infty(R)$. Из представления (4.7) с учетом свойств функций $\varphi_j (j \in Z)$ имеем:

$$\begin{aligned} \left\| \rho(y) |t|^\alpha (l_t + \lambda I)^{-1} f \right\|_{L_2(R)}^2 &= \left\| \rho(y) |t|^\alpha K_\lambda (E - B_\lambda)^{-1} f \right\|_{L_2(R)}^2 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left| \rho(y) |t|^\alpha \sum_{\{j\}} \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \varphi_j (E - B_\lambda)^{-1} f \right|^2 dy \end{aligned}$$

Как известно, на промежутке $\Delta_j (j \in Z)$ отличны от нуля только функции $\varphi_{j-1}, \varphi_j, \varphi_{j+1}$, следовательно

$$\begin{aligned} \left\| \rho(y) |t|^\alpha (l_t + \lambda E)^{-1} f \right\|_{L_2(R)}^2 &\leq \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int \left| \rho(y) |t|^\alpha \sum_{j-1}^{j+1} \varphi_j (l_{t,j} + \lambda E)^{-1} \varphi_j (E - B_\lambda)^{-1} f \right|^2 dy \leq \\ &\leq 9 \sup_{j \in Z} \left\| \rho(y) |t|^\alpha \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_j \varphi_j^2 \right) (E - B_\lambda)^{-1} f dy. \quad (4.8) \end{aligned}$$

Так как $\sum_j \varphi_j^2 = 1$, то из (4.8) имеем:

$$\left\| \rho(y) |t|^\alpha (l_t + \lambda E)^{-1} f \right\|_{L_2(R)}^2 \leq 9 \sup_{j \in Z} \left\| \rho(y) |t|^\alpha \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |(E - B_\lambda)^{-1} f|^2 dy \leq$$

$$\leq 9 \sup_{j \in \mathbb{Z}} \left\| \rho(y) |t|^\alpha \varphi_j (l_{t,j} + \lambda E)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \cdot \|(E - B_\lambda)\|_{2 \rightarrow 2}^2 \cdot \|f\|_2 . \quad (4.9)$$

Из леммы 2.4 следует, что $\|(E - B_\lambda)\|_{2 \rightarrow 2} < c(\lambda)$. Отсюда и из (4.9) получаем, что

$$\left\| \rho(y) |t|^\alpha (l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq 9 \cdot A(\lambda) \sup_{j \in \mathbb{Z}} \left\| \rho(y) |t|^\alpha \varphi_j (l_{t,j} + \lambda E)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 .$$

Лемма 2.9 доказана.

Лемма 2.10. Пусть выполнены условия i)-ii). Тогда справедливы оценки:

$$\left\| R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C_0 < \infty ; \quad (4.10)$$

$$\left\| R_1(y) |t| (l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C_1 < \infty ; \quad (4.11)$$

$$\left\| R_2(y) |t|^3 (l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C_2 < \infty , \quad (4.12)$$

где C_0, C_1, C_2 – не зависят от t ($t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Доказательство. Из (2.8) видно, что оператор $R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1}$ ограничен, если ограничен $\sup_{j \in \mathbb{Z}} \left\| R_0(y) \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}$. Поэтому будем заниматься оценкой последнего выражения

$$\begin{aligned} & \left\| R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C(\lambda) \sup_{j \in \mathbb{Z}} \left\| R_0(y) \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \leq \\ & \leq C(\lambda) \sup_{j \in \mathbb{Z}} \max_{y \in \Delta_j} \left| R_0(y) \varphi_j \right|^2 \left\| (l_{t,j} + \lambda E)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \leq C(\lambda) \sup_{j \in \mathbb{Z}} \max_{y \in \Delta_j} R_0^2(y) \left\| (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j)}^2 \end{aligned}$$

Отсюда и учитывая неравенство (4.1) и из условия ii) находим, что

$$\left\| R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C(\lambda) \sup_{|y-t| \leq 1} \frac{R_0^2(y)}{R_0^2(t)} < C(\lambda) \cdot \mu_0^2 \leq C_0 < \infty .$$

Последняя оценка доказывает неравенство (4.10) леммы 2.10.

Докажем неравенство (4.11). Пользуясь леммой 2.9, имеем:

$$\begin{aligned} & \left\| R_1(y) |t| (l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C(\lambda) \sup_{j \in \mathbb{Z}} \left\| R_1(y) |t| \varphi_j (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j) \rightarrow L_2(\Delta_j)}^2 \leq \\ & \leq C(\lambda) \sup_{j \in \mathbb{Z}} \max_{y \in \Delta_j} R_1^2(y) |t|^2 \left\| (l_{t,j} + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(\Delta_j) \rightarrow L_2(\Delta_j)}^2 . \end{aligned}$$

Отсюда, пользуясь леммой 2.8, а также учитывая условие ii), находим, что

$$\left\| R_1(y) |t| \cdot (l_t + \lambda I)^{-1} \right\|_{L_2(R) \rightarrow L_2(R)} \leq C(\lambda) \mu_1^2 \leq C_1 < \infty .$$

Неравенство (4.11) доказано.

Неравенство (4.12) доказывается точно так же, как неравенство (4.11). Лемма 2.10 доказана полностью.

Доказательство теоремы 2

Согласно теореме 1 и равенству (3.3) находим, что

$$\begin{aligned} R_0(y)u(x, y) &= R_0(y)F_{t \rightarrow x}^{-1}(l_t + \lambda I)^{-1} \tilde{f}(t, y) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \tilde{f}(t, y) \cdot e^{ixt} dt = F_{t \rightarrow x}^{-1} R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \tilde{f}(t, y) . \end{aligned}$$

Отсюда, пользуясь свойством унитарности оператора $F_{t \rightarrow x}^{-1}$, находим:

$$\begin{aligned} \|R_0(y)u(x, y)\|_2^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \tilde{f}(t, y)^2 dy \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \|R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1} \tilde{f}(t, y)\|_2^2 dt \leq \\ &\leq \int_{-\infty}^{\infty} \|R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1}\|_{2 \rightarrow 2}^2 \cdot \|\tilde{f}(t, y)\|_2^2 dt . \end{aligned}$$

Из последнего неравенства, пользуясь равенством Парсеваля в пространстве $L_2(R)$, получаем, что

$$\begin{aligned} \|R_0(y)u(x, y)\|_2^2 &\leq \sup_{t \in R} \|R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1}\|_{2 \rightarrow 2}^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \|\tilde{f}(t, y)\|_2^2 dt \leq \\ &\leq \sup_{t \in R} \|R_0(y)(l_t + \lambda I)^{-1}\|_{2 \rightarrow 2}^2 \cdot \|f(x, y)\|_2^2 . \end{aligned}$$

Из последнего неравенства и оценки (4.10) следует, что

$$\|R_0(y)u(x, y)\|_2^2 \leq C_0^\infty \|f(x, y)\|_2^2 ,$$

т.е.

$$\|R_0(y)u(x, y)\|_2 \leq C_0 \|(L + \lambda I)u\|_2 , \tag{4.13}$$

где $(L + \lambda I)u = f(x, y)$.

Далее, пользуясь оценкой (4.11) и повторяя выкладки и рассуждения, которые использованы при доказательстве (4.13), имеем, что

$$\left\| R_1(y) \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_2 \leq C_1 \|(L + \lambda I)u\|_2 . \tag{4.14}$$

Точно так же имеем:

$$\left\| R_2(y) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right\|_2 \leq C_2 \|(L + \lambda I)u\|_2 . \tag{4.15}$$

Теперь из неравенств (4.13)-(4.15) имеем:

$$\begin{aligned} \left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|_2 &= \left\| (L + \lambda I)u - R_2(y) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - R_1(y) \frac{\partial u}{\partial x} - R_0(y)u(x, y) - \lambda u \right\|_2 \leq \\ &\leq \|(L + \lambda I)u\|_2 + C_2 \|(L + \lambda I)u\|_2 + C_1 \|(L + \lambda I)u\|_2 + C_0 \|(L + \lambda I)u\|_2 + \\ &\quad + \lambda \|(L + \lambda I)u\|_2 \leq \|(L + \lambda I)u\|_2 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Из (4.13)-(4.16) следует, что

$$\left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_2 + C \left\| R_2(y) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right\|_2 + \left\| R_1(y) \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_2 + \left\| R_0(y)u \right\|_2 \leq C (\|Lu\|_2 + \|u\|_2),$$

где $C > 0$ постоянное число, не зависящее от $u(x, y)$. Теорема 2 доказана.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Temam R. Sur un probleme non lineaire J. Math.Pures. Apple,–1969. 48(2). –P. 159-172.
- 2 Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач . –М., Мир, 1972. –586 с.
- 3 Дубинский Ю.А. Об одной абстрактной теореме и ее приложения к краевым задачам для неклассических уравнений // Математический сборник. –1969. –Т. 79 (121), №1. –С. 91-117.
- 4 Юрчук Н.И. О граничных задачах для уравнений содержащих в главной части оператора вида $\frac{d^{2m+1}}{dt^{2m+1}}$ // Дифференциальные уравнения. –1974. –Т. 10, №4. –С. 759-762.
- 5 Пятков С.Г. Об одном линейном уравнений неклассического типа высокого порядка // Препринт им. СО АН СССР. –1981, –24 с.
- 6 Bona J.Y., Shu Ming Sun, Bing –Yu Zhang. // A nonhomogeneous boundary– value problem for the Korteweg-de Vries equation posed on a finite domain: Comm. Partial Differential Equations. 28: 7-8(2003). –P. 1391-1436;
- 7 Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. –М.: Наука, –1972. –735с.
- 8 Muratbekov M., Otelbaev M. On the existence of a resolvent and separability for a class of singular hyperbolic type differential operators on an unbounded domain // EURASIAN MATHEMATICAL JOURNAL. V. 7, NUMBER I (2016). –P. 50-67.
- 9 Муратбеков М.Б., Рахимова Г.К., Шыракбаев А.Б. О существовании и аппроксимативных свойствах решений полупериодической задачи Дирихле для одного класса нелинейных вырождающихся уравнений неклассического типа // Математический журнал. –2011. –Т. 13, №2 (48), –С. 95-109.
- 10 Отелбаев М. Коэцитивные оценки и теоремы разделимости для эллиптических уравнений в R^n // Труды математического института АН СССР, –1983. –Т. 161, –С. 195-217.

REFERENCES

- 1 Temam R. Sur un probleme non lineaire J. Math.Pures. Apple,–1969. 48(2). –P. 159-172.
- 2 Lions ZH.L. Nekotorye metody resheniya nelinejnyh kraevyh zadach . –М., Mir, 1972. –586 с.

3 Dubinskij YU.A. Ob odnoj abstraktnoj teoreme i ee prilozheniya k kraevym zadacham dlya neklassicheskikh uravnenij // Matematicheskij sbornik. –1969. –Т. 79 (121), №1. –С. 91-117.

4 YUrchuk N.I. O granichnyh zadachah dlya uravnenij sodержashchih v glavnoj chasti operatora vida $\frac{d^{2m+1}}{dt^{2m+1}}$ // Differencial'nye uravneniya. –1974. –Т. 10, №4. –С. 759-762.

5 Pyatkov S.G. Ob odnom linejnom uravnenij neklassicheskogo tipa vysokogo poryadka // Preprint im. SO AN SSSR. –1981, –24 s.

6 Bona J.Y., Shu Ming Sun, Bing –Yu Zhang. // A nonhomogeneous boundary– value problem for the Korteweg–de Vries equation posed on a finite domain: Comm. Partial Differential Equations. 28: 7-8(2003). –P. 1391-1436;

7 Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. –M.: Nauka, –1972. –735s.

8 Muratbekov M., Otelbaev M. On the existence of a resolvent and separability for a class of singular hyperbolic type differential operators on an unbounded domain // EURASIAN MATHEMATICAL JOURNAL. V. 7, NUMBER I (2016). –P. 50-67.

9 Muratbekov M.B., Rahimova G.K., SHyrakbaev A.B. O sushchestvovanii i approksimativnyh svojstvah reshenij poluperiodicheskoy zadachi Dirihle dlya odnogo klassa nelinejnyh vyrozhdayushchihya uravnenij neklassicheskogo tipa // Matematicheskij zhurnal. –2011. –Т. 13, №2 (48), –С. 95-109.

10 Otelbaev M. Koercitivnye ocenki i teoremy razdelimosti dlya ellipticheskikh uravnenij v R^n // Trudy matematicheskogo instituta AN SSSR, –1983. –Т. 161, –С. 195-217.

A. O. СУЛЕЙМБЕКОВА

*Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан
E-mail: suleimbekovaa@mail.ru*

ҮШІНШІ РЕТТІ ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ОПЕРАТОРЛАРДЫҢ БІР КЛАСЫНЫҢ РЕЗОЛЬВЕНТАСЫНЫҢ БАР БОЛУЫ МЕН БӨЛІКТЕНУІ ТУРАЛЫ

Жұмыста үшінші ретті дифференциалдық оператордың бір класының резольвентасының бар болуы мен оператордың бөліктенуі зерттелген.

Бұл жұмыста коэффициенттерге кейбір шектеу қойылғанда резольвентаның бар болуы және оператордың бөліктенуін қамтамасыз ететін шарт табылған.

Түйін сөздер: бөліктену, резольвента, үшінші ретті дифференциалдық оператор.

A. O. SULEIMBEKOVA

*L.N. Gumilyev Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan
E-mail: suleimbekovaa@mail.ru*

ON THE EXISTENCE OF THE RESOLVENT AND SEPARABILITY OF A CLASS OF THE THIRD-ORDER DIFFERENTIAL OPERATORS

In this paper, for a class of third-order differential operators, we study the existence of the resolvent and the separability of the operator.

In this paper, under certain restrictions on the coefficients, the existence of a resolvent is proved and a condition is found that ensures the separability of the operator.

Keywords: separability, resolvent, third-order differential operator

A. S. TLEBALDINOVA, YE. V. PONKINA, M. YE. MANSUROVA, S. SH. IXANOV*

S.Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Altay State University, Barnaul, Russia

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

a_tlebaldinova@mail.ru, ponkinaelena77@mail.ru, mansurova.madina@gmail.com,

Iks74@mail.ru

USING SATELLITE IMAGES TO ASSESS THE STATE OF ARABLE FIELDS ON THE EXAMPLE OF THE EAST KAZAKHSTAN REGION

This article proposes a methodology for assessing the state of arable fields based on the use of Sentinel 2 satellite data. The essence of this methodology is cluster analysis of NDVI vegetation index profiles for a number of years, as well as expert analysis of the obtained results. The proposed method for assessing the state of arable fields has been tested on the example of arable lands of East Kazakhstan Agricultural Experimental Station LLP. This method can be used to optimize crop placement.

Keywords: *cluster analysis, precision agriculture, normalize differentiative vegetation index, Satellite data.*

Introduction. Increasing crop yields is one of the main factors for food security. The sustainable development of this factor depends on the timely provision of comprehensive data on the current state of arable fields, contributing to the adoption of more effective decisions that affect the growth of agricultural production. The study and assessment of the current state of arable fields can no longer be carried out only by traditional methods, since at a single point in time, a detailed coverage of the terrestrial study of huge areas is not possible. For this purpose, over the past years, comprehensive studies of Earth remote sensing (ERS) data [1-3] and images obtained using unmanned aerial vehicles (UAVs) [4-6] have been carried out.

In recent years, data from the European Space Agency's Sentinel 2 satellite [7-8], which was launched in 2015, have been actively used in solving such problems. The Sentinel 2 satellite is equipped with an optoelectronic multispectral sensor for surveying with a resolution of 10 to 60 m in the visible, near infrared and short-wave infrared regions of the spectrum, including 13 spectral channels, which guarantees the display of differences in the vegetation cover [9]. The new spectral capabilities of the satellite provide more acceptable possibilities for studying monitoring of the state of vegetation cover and arable fields.

Most of the sown areas in East Kazakhstan are grain crops, mainly spring wheat, and a large area of mountainous and foothill zones is occupied by barley [10]. These crops are of great economic importance and are used for food, technical and feed purposes. Accordingly, the assessment of the state of the arable fields of these crops is of great practical interest not only for producers, but also for potential consumers.

The purpose of this study is to develop a methodology for assessing arable fields within the boundaries of a separate field for small agricultural enterprises. The proposed method

* E-mail корреспондирующего автора: iks74@mail.ru

includes the following stages: preliminary processing of satellite images, calculation of the values of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and implementation of the k-means clustering algorithm.

Research objects. As an object of research, the arable lands of the East Kazakhstan Agricultural Experimental Station LLP (EKAES), organized in 2008, were analyzed. The land use of EKAES consists of 12 land plots (Fig. 1), the area of which is 4 115 3 hectares. Figure 1 shows a map of EKAES fields as of 2021. Test fields are marked on the map.

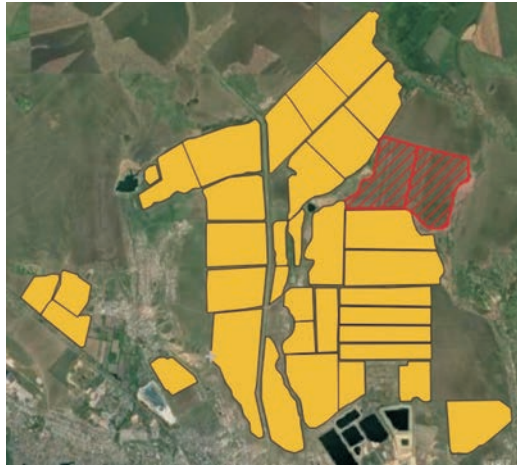


Figure 1 – Map of EKAES fields

EKAES is located on the right bank of the Irtysh River, 3 km north of Ust-Kamenogorsk. The main site of the farm is located within the foothill-steppe black soil zone. The most widespread on the territory of the farm are ordinary medium-thick black soil, in some places in combination with washed-out analogs. These soils are mainly formed on loess-like sediments. The main agricultural crops of the farm are spring wheat, barley, soybeans, sunflowers and potatoes. In this paper, fields of spring wheat are investigated.

The methodology proposed by the authors for the assessment of arable fields is based on the analysis of the results of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) using Sentinel 2 data.

The results of the analysis of scientific publications show that the vegetation index NDVI can be used as a tool for measuring crop productivity [11], determining the phenological stages of plant development [12], predicting yield [13] and a number of other tasks [14]. NDVI - Normalized Difference Vegetation Index - is a simple quantitative measure of the amount of photosynthetically active biomass (commonly referred to as the Vegetation Index). The choice of this particular index can be explained by the fact that it can be calculated for multichannel images of any resolution and provides sufficient information for analyzing the state of vegetation cover, as well as arable fields in the study area [15].

The NDVI is calculated as follows:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (1)$$

where *NIR* – reflection in the near infrared region of the spectrum; *RED* – reflection in the red region of the spectrum. According to this formula, the density of vegetation (NDVI) at a certain point in the image is equal to the difference between the intensities of reflected light in the red and infrared ranges, divided by the sum of their intensities [16].

Initial data and their pre-processing. The Sentinel-2 data were downloaded from the official website of the Copernicus Earth Satellite Monitoring System (<http://scihub.copernicus.eu/>). The pictures were taken from May 2 to August 2 for the last two years in accordance with the cycle of the growing season of grain crops.

The processing of multispectral data and the creation of vector layers of arable fields was carried out in the free open source system Quantum Gis (qgis.org), which supports a variety of vector and raster formats. The selection of the studied area of the field boundaries was carried out manually. To correct and improve satellite images, the following types of preprocessing were carried out in the QGis environment:

- geometric correction;
- radiometric calibration of images;
- radiometric correction of atmospheric influence;
- restoration of missing pixels;
- contrasting;
- filtration.

Research methods. The main purpose of cluster analysis is to divide the set of objects and features under study into homogeneous groups, or clusters, in a certain sense [17]. In this study, cluster analysis of soil conditions within the boundaries of a separate field is based on the application of k-means clustering and hierarchical clustering methods and comparing the results obtained.

The k-means method is one of the popular iterative data clustering methods. It is fast and effective in application [18]. The principle of operation of this algorithm is described using the example of a raster image. The pixels of the image are used as objects, and their color is used as a characteristic.

Algorithm description:

1. The number of clusters is chosen – the number *k*.
2. Next, *k* of points is randomly selected from a given image. In the first step, these points will be considered the «centroids» of the clusters. Each cluster has one center.
3. All points of the image are distributed in clusters. The distance from a point to each center of the cluster is calculated, and the point is referred to the cluster, the distance to the center of which will be the smallest.
4. When all the points of the image are distributed across clusters, the clusters are recalculated. The arithmetic mean of all points belonging to the cluster is taken as the new center of the cluster [18-19].

The k-means method aims to minimize the total intraclass variance:

$$V = \sum_{i=0}^k \sum_{X_j \in C_i} (X_j - \mu_i)^2, \quad (2)$$

where X_j are vectors of characteristics, k is the number of clusters, C_i are clusters, μ_i are cluster centers. To reduce the dependence on unsuccessful choice of centers, the algorithm





is often run several times with different centers, and then the solution with the least variance V is chosen [20].

Results and discussion. NDVI values are calculated for each image according to the data of the corresponding channels and formula (1). The general clustering algorithm can be represented as performing the following steps:

Stage 1. The stage performs clustering of the NDVI values for each date separately using the k-means method. The number of clusters is predetermined: $k = 4$. The results of this clustering with the belonging of the NDVI values to a certain class form the initial data for their subsequent clustering.

Stage 2. Clustering of data generated in accordance with stage 1 is carried out for all images of the entire growing season. As a result, cluster solutions are formed for each tested field for the studied years, the results of which are shown in Table 1.

Table 1 – Clustering results

K-means	
Field 1 – 2020 year	Field 2 – год 2020 year
	
Field 1 – год 2021 year	Field 2 – год 2021 year
	

Based on the visual presentation of the results, it can be assumed that the arable fields form four natural clusters, where points outside the field are marked in black. In accordance with the results obtained for each cluster, the main descriptive statistics were calculated, the results of which are presented in Table 2. Green clusters are clusters with higher indices, red clusters with lower indices. Color visualization of clusters and analysis of statistics show that NDVI indicators have a positive trend: in 2021 compared to 2020, the share of the green cluster increased compared to the share of the red cluster. As for the values of the indicators themselves, their comparison over the years is incorrect, since different crops were sown: sunflower in 2020, wheat in 2021. However, the maps received allow assessing the most depleted areas of the field, for which additional agro-technological operations associated with spot fertilization are required.

Table 2 – Descriptive statistics of NDVI by clusters

Cluster	Mean	Count	Min	Max	Sd
Field 1 - 2020 year					
1. green	0,3016	7950	0,0616	0,7905	0,2083
2. blue	0,5603	3128	0,1133	0,8010	0,1257
3. red	0,2766	28448	0,0701	0,7365	0,1732
Field 1 - 2021 year					
1. green	0,4980	97702	0,0804	0,8312	0,2818
2. blue	0,6451	5599	0,0986	0,8256	0,1387
3. red	0,4245	27555	0,0791	0,8301	0,2727
Field 2 - 2020 year					
1. green	0,2925	58944	-0,1183	0,7361	0,1881
2. blue	0,5953	2832	0,1847	0,8255	0,1203
3. red	0,2194	47920	0,0877	0,8312	0,3361
Field 2 2021 year					
1. green	0,5297	93280	0,1019	0,8265	0,1833
2. blue	0,5258	9944	0,1031	0,8279	0,2199
3. red	0,4654	47608	0,0893	0,7846	0,1607

Acknowledgement. This paper has been supported by Grant of the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan AR 09259379.

Conclusion. In this work, a cluster analysis was carried out, revealing the zones of heterogeneity of two fields of the experimental agricultural farm, based on the NDVI indicators. The main concept of precision farming is based on the concept of the existence of heterogeneities within the same field. To assess and identify these heterogeneities, the latest technologies are used, such as global positioning systems (GPS, GLONASS), special sensors, aerial and satellite imagery, as well as special programs developed for agricultural management. In this work, we used satellite images and developed our own software module in Python that calculates and clusters indicators NDVI. The results obtained can be used to

plan sowing, calculate the rates of application of fertilizers and plant protection products, more accurately predict yields and financial planning for 2022.

REFERENCES

1 Stepanov A.S. Prognozirovaniye urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (na primere soi) // Vychislitel'nyye tekhnologii. 2019. T. 24, № 6. С. 125–133. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.015.

2 Liu Chang-an, Chen Zhong-xin, Shao Yun, Chen Jin-song, Tuya Hasi, Pan Hai-zhu Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review. *Journal of Integrative Agriculture* 2019, 18(3): 506–525.

3 Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. doi:10.3390/rs12193136.

4 Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). A Compilation of UAV Applications for Precision Agriculture. *Computer Networks*, 107148. doi:10.1016/j.comnet.2020.107148

5 Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*, 10(11), 349. doi:10.3390/info10110349

6 Adão, T., Нгулька, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. (2017). Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sensing*, 9(11), 1110. doi:10.3390/rs9111110

7 Wu, M., Yang, C., Song, X. et al. Monitoring cotton root rot by synthetic Sentinel-2 NDVI time series using improved spatial and temporal data fusion. *Sci Rep* 8, 2016 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20156-z>

8 Wong, M.M.F., Fung, J.C.H. & Yeung, P.P.S. High-resolution calculation of the urban vegetation fraction in the Pearl River Delta from the Sentinel-2 NDVI for urban climate model parameterization. *Geosci. Lett.* 6, 2 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0132-4>

9 E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'yev, S.A. Men'shikov, L.N. Smirnova Raspoznavaniye lesnykh nasazhdeniy i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoy oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 / Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. T. 15. №5. С. 154–166.

10 G.Taskyn, R.Beysembayeva, G.Tarina Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya sel'skogo khozyaystva Vostochnogo Kazakhstana// Materialy III-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchonnoy 25-letiyu TuvIKOPR SO RAN i 45-letiyu akademicheskoy nauki v Tuve «Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura», 2019, 266-271.

11 P.Mazur, J.Chojnacki Remote grasslands crop productivity measurements with usage of multispectral camera and small unmanned aerial vehicle. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 63, nr 2. PP.151-154.

12 Seo, B., Lee, J., Lee, K.-D., Hong, S., Kang, S. Improving remotely-sensed crop monitoring by NDVI-based crop phenology estimators for corn and soybeans in Iowa and Illinois, USA. *Field Crops Research*, 238. 2019. PP.113–128. doi:10.1016/j.fcr.2019.03.015

13 Bukhovets A.G., Somin Ye.A., Kostenko Ye.I., Yablonovskaya S.I. Modelirovaniye dinamiki vegetatsionnogo indeksa NDVI ozimoy pshenitsy v usloviyakh TSFO. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018. № 2 (57). С. 186–199.

14 Pena-Barragan, J.M.; Ngugi, M.K.; Plant, R.E.; Six, J. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sens. Environ.* 2011, 115, 1301–1316.

15 Brodt L. V. Otsenka antropogennoy transformatsii yestestvennykh landshaftov lesotundrovoy zony (Urengoyskogo NGKM) s ispol'zovaniyem indeksa NDVI // Problemy geologii i osvoyeniya nedr: trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina. Tom I. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2017. C. 712-713.

16 Rubleva Ye.A., Sayteyev M.V. Ispol'zovaniye geoinformatsionnykh tekhnologiy dlya vychisleniya vegetatsionnogo indeksa NDVI po dannym distantsionnogo zondirovaniya// Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Geoinformatsionnoye kartografirovaniye v regionakh Rossii. FGBOU VO «Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet», Voronezhskoye otdeleniye Russkogo geograficheskogo obshchestva. Izdatel'stvo: OOO «Izdatel'stvo «Nauchnaya kniga» (Voronezh), 2016, SS. 109-112.

17 Toropchina G. N., Dvoeryadkina N. N., Vokhmintseva G. P. Elementy klasterного analiza. Uchebnoye posobiye. Blagoveshchensk: Amurskiy gos. un-t, 2006.

18 Kotelina N.O., Matviychuk B.R. Klasterizatsiya izobrazheniya metodom k-srednikh // Vestnik Syktyvkarskogo universitetaZH Matematika. Mekhanika. Informatika. Vypusk 3(32), 2019. C.101-112.

19 Tyurin G.A., Zuyev I.O. Klasterный анализ, metody i algoritmy klasterizatsii // Vestnik MGTU MIREA №12, M.:Izd-vo MGTU, 2014, 12p.

20 Solem YA.E. Programirovaniye komp'yuternogo zreniya na yazyke Python / per. s angl. A. A. Slinkin M.: DMK Press, 2016. 312 c.

**A. С. ТЛЕБАЛДИНОВА, Е. В. ПОНЬКИНА,
Е. М. МАНСУРОВА, С. Ш. ИКСАНОВ**

*С.Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан
Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫ МЫСАЛЫНДА ЕГІСТІК АЛҚАПТАРЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН БАҒАЛАУ ҮШІН СПУТНИКТІК СУРЕТТЕРДІ ПАЙДАЛАНУ

Бұл мақалада Sentinel 2 спутниктік деректерін пайдалануға негізделген егістік алқаптарының жағдайын бағалау әдістемесі ұсынылған. Бұл әдістеменің мәні бірнеше жыл бойындағы NDVI вегетациялық индексінің профилдерінің мәндерін кластерлік талдауда және алынған нәтижелерге сараптамалық талдауда жатыр. Егістік алқаптарының жай-күйін бағалаудың ұсынылған әдістемесі «Шығыс Қазақстан ауыл шаруашылығы тәжірибе станциясы» ЖШС егістік алқаптары мысалында сыналды. Бұл әдістемені дақылдарды орналастыруды оңтайландыру үшін қолдануға болады.

Түйін сөздер: кластерлік талдау, нақты егіншілік, NDVI, спутниктік деректер.

A. С. ТЛЕБАЛДИНОВА, Е. В. ПОНЬКИНА, Е. М. МАНСУРОВА, С. Ш. ИКСАНОВ

*Восточно-Казахстанский университет имени С.Аманжолова,
Усть-Каменогорск, Казахстан
Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПАХОТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

В данной статье предлагается методика оценки состояния пахотных полей, основанная на использовании спутниковых данных Sentinel 2. Суть данной методики заключается в кластерном анализе профилей вегетационного индекса NDVI за ряд лет, а также в экспертном анализе полученных результатов. Предложенная методика оценки состояния пахотных полей апробирована на примере пахотных угодий ТОО «Восточно-Казахстанская сельскохозяйственная опытная станция». Данную методику можно использовать при оптимизации размещения посевов.

Ключевые слова: кластерный анализ, точное земледелие, NDVI, спутниковые данные.

Н. И. ТОМИЛОВА¹, Ю. М. РЫБАЧУК², В. Н. ГОЛОВАЧЕВА^{1*}

¹Карагандинский технический университет, Казахстан,

²Харьковский национальный университет городского хозяйства
им. А.Н. Бекетова, Украина

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ИНВЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Представлены методы и алгоритмы цифровых моделей для описания и решения расчета установившихся гидравлических режимов теплоснабжающих систем, модифицированная узловая модель расчета потокораспределения, методом нового подхода формирования системы уравнений узловых напоров, при котором используются не прямые, а инверсные характеристики пассивных и активных элементов трубопроводной сети. Приведен результат анализа числовой эффективности контурной и узловой моделей на базе разработанной информационно-графической системы.

Ключевые слова: теплоснабжающая система, гидравлический режим, потокораспределение, узловая модель, контурная модель инверсная характеристика, расчет, информационно-графическая система.

Введение. Наряду с алгебраическим подходом моделирования процессов потокораспределения в произвольных гидравлических цепях с сосредоточенными и регулируемыми параметрами широко исследуются теоретические и вычислительные аспекты экстремального подхода, опирающегося на физическую и математическую сущность задачи о потокораспределении [1]. Экстремальные методы описания потокораспределения имеют несомненное теоретическое значение, однако их практическая реализация через необходимые условия экстремума приводит к системам уравнений Кирхгофа, а поэтому не даёт ничего нового с точки зрения организации вычислительных процессов по сравнению с алгебраическим подходом. Именно поэтому в практике расчета установившихся режимов течения жидкостей и газов по трубопроводным сетям любой сложности получили распространение и развитие цифровые модели алгебраического подхода: контурные и узловые модели, которые восходят к своим аналогам из электрических цепей и сетей [2].

Контурная модель установившегося гидравлического режима. Приведем алгоритм построения общей математической модели установившегося гидравлического режима задачи анализа систем централизованного теплоснабжения (СЦТ):

– расчетную схему СЦТ фиксированной технологической структуры представляем связным ориентированным графом $G(M,N)$, который содержит m узлов, n ветвей и p компонент связности,

– выделяем остовное дерево, например, минимального гидравлического сопротивления, зафиксировав, таким образом, K хорд и, соответственно, K линейно независимых контуров,

– формируем матрицы соединений A_C и контуров B ,

* E-mail корреспондирующего автора: golovacheva_vn@mail.ru

– определяем алгебраическую структуру конечного множества объектов с помощью конечномерного векторного пространства V_g .

С размерностями матриц A_c, A, B связаны числовые параметры ориентированного графа $G(M,N)$: число узлов m , число ветвей n , число независимых контуров $k = n - m + p$, число компонент связности p .

В теории электрических и гидравлических цепей [3] разработан формальный подход представления всех подграфов линейного графа $G(M,N)$ в элементы векторного пространства V_g размерности n . Система координат в этом пространстве определяется элементами, каждый из которых представляет собой одну ветвь графа G , а строки матриц A_c и B становятся векторами в этом пространстве.

В пространстве V_g вектора $(q, h, \Delta h, P, Q)$ формально представляют моделируемое состояние СЦТ:

– $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ – n -мерный вектор объёмных расходов в ветвях графа;

– $h = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T$ – m -мерный вектор полных напоров в узлах графа G ;

– $\Delta h = (\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_m)^T$ – m -мерный вектор разностей полных напоров в начальных и конечных узлах ветвей графа G ;

– $P = (P_1, P_2, \dots, P_m)^T$ – m -мерный вектор пьезометрических напоров в узлах графа G ;

– $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_m)^T$ – m -мерный вектор объёмных узловых расходов.

Контурная модель анализа режима предполагает обязательное использование уравнений второго закона Кирхгофа о равновесии удельной энергии потоков теплоносителя на ветвях, замкнутых линейно-независимых контуров. При этом задача анализа полного установившегося гидравлического состояния СЦТ, предполагающая определение неизвестных значений векторов $(q, h, \Delta h, P, Q)$, расчленяется на две последовательно решаемые задачи:

– **задачу потокораспределения**, в которой определяются неизвестные значения расходов на ветвях гидравлической цепи СЦТ (компоненты вектора q) и значения узловых расходов в линейно-зависимых узлах (компоненты вектора Q);

– **задачу определения напоров в узлах**, в которой на основе рассчитанного потокораспределения (q^*, Q^*) определяются полные и пьезометрические напоры и перепады напоров в линейно независимых узлах и на ветвях цепи (компоненты векторов $(P, h, \Delta h)$).

Сформулируем математическую постановку задачи потокораспределения на основе наиболее общей и сложной модели установившегося гидравлического режима СЦТ: *Найти такие значения компонентов вектора $q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_n^*)$, которые бы обращали в тождество следующие системы линейных и нелинейных уравнений:*

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} \cdot q_i - Q_j = 0, \quad j = \overline{1, m-1}$$

$$\varphi_j(q_j) + \sum_{i=k+1}^n b_{ji} \cdot \varphi_i(q_i) = 0, \quad j = \overline{1, k},$$

при

$$\varphi_i(q_i) = \begin{cases} \text{sign}(q_i) r_i \cdot |q_i|^{\alpha_i}, & \forall i = \overline{n_1 + 1, n} \\ (r_{0i} + r_{1i} \cdot q_i + r_{2i} \cdot q_i^2), & \forall i = \overline{1, n_1}, \sum_{j=1}^m Q_j = 0, \end{cases}$$

и полных наборах исходных данных в режимных ситуациях СЦТ.

Тогда математическая формулировка задачи определения напоров в линейно независимых узлах гидравлической цепи принимает вид:

По найденным компонентам q^* определить компоненты векторов Δh^* , h^* , P^* , удовлетворяющие отношениям:

$$\begin{aligned} \Delta h_i^* - \sum_{j=1}^m a_{ij}^T \cdot h_j^* &= 0, \quad \forall i = \overline{1, n} \\ P_j^* &= h_j^* - Z_j, \quad \forall j = \overline{1, m} \end{aligned}$$

при

$$\Delta h_i^* = \begin{cases} \text{sign}(q_i^*) r_i \cdot |q_i^*|^{\alpha_i}, & \forall i = \overline{n_1 + 1, n} \\ r_{0i} + r_{1i} \cdot q_i^* + r_{2i} \cdot (q_i^*)^2, & \forall i = \overline{1, n_1} \end{cases}$$

$$h_m = \text{const}$$

Таким образом задача анализа установившихся гидравлических режимов СЦТ преобразована во взаимосвязанную последовательность математических задач отыскания корней большеразмерных систем нелинейных и линейных алгебраических уравнений.

Современная вычислительная алгебра дает широкий спектр численных методов решения систем уравнений, отличающихся вычислительной эффективностью [4-6]. Все эффективные в заданном смысле численные методы для систем нелинейных уравнений всегда ориентированы на достаточно узкий класс задач с изученными специфическими свойствами. Специфическими свойствами обладает и сформулированная задача потокораспределения в гидравлических цепях переменной структуры СЦТ.

Исторически сложилось так, что с момента зарождения концепции теории гидравлических цепей наибольшее внимание уделялось разработке и совершенствованию численных методов решения задач потокораспределения на основе контурных моделей для трубопроводных систем всех известных классов: тепловые, водопроводные, вентиляционные, газовые. Каноническим стал метод контурных расходов (МКР), который по сути является графовой интерпретацией метода Ньютона-Рафсона для большеразмерных систем нелинейных уравнений, структура которых предопределена графом гидравлической цепи, моделирующей технологическую структуру заданной трубопроводной сети.

Первый вариант нового итерационного процесса потокораспределения, отвечающего сформулированным требованиям и разработанный в рамках создания первой версии *Решателя задач потокораспределения* информационно-графической системы ТГИД-07 по проведению наладочных и перспективных мероприятий в теплоснабжающих системах [7-8], основывался на покоординатной релаксации, текущем исполь-

зовании улучшенных расходов еще до завершения полного итерационного цикла по множеству ветвей, более точного определения контурной поправки на основе разложения Тейлора второго порядка неявных функций от контурных уравнений.

Узловая модель установившегося гидравлического режима на базе инверсных характеристик. Узловая модель опирается на систему уравнений первого закона Кирхгофа о материальном балансе в линейно независимых узлах и не требует обращения к контурам [9]. При этом задача анализа полного установившегося гидравлического состояния СЦТ, предполагающая определение неизвестных значений векторов $(q, h, \Delta h, P, Q)$, расчленяется на две последовательно решаемые задачи:

– **задачу определения напоров в узлах**, в которой определяются неизвестные значения полных и пьезометрических напоров в линейно-независимых узлах и потеря напора на ветвях гидравлической цепи СЦТ (компоненты векторов $h, \Delta h, P$);

– **задачу потокораспределения**, в которой на основе рассчитанных значений векторов $(h^*, \Delta h^*)$ определяются неизвестные значения расходов на ветвях гидравлической цепи СЦТ (компоненты вектора q) и значения узловых расходов в линейно-независимых узлах (компоненты вектора Q).

Узловая модель установившегося гидравлического режима СЦТ может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_{ji} \cdot q_i = Q_j, \quad j = \overline{1, m-1} \\ \sum_{j=1}^m Q_j = 0 \end{aligned}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_i = \mu_i \cdot \sum_{j=1}^m a_{ij}^T \cdot h_j, \quad i = \overline{1, n} \\ \Delta h_i = \begin{cases} r_{0i} + r_i \cdot q_i + r_{2i} \cdot q_i^2, & \forall i = \overline{1, n_1} \\ \text{sign}(q_i) r_i \cdot |q_i|^{\alpha_i}, & \forall i = \overline{n_1 + 1, n} \end{cases} \\ \mu_i = \begin{cases} -1, & \forall i = \overline{1, n_1} \\ +1, & \forall i = \overline{n_1 + 1, n} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Метод узловых давлений (МД), развитый в теории гидравлических цепей, обобщает метод узловых напряжений в теории электрических цепей, сочетая преобразования Максвелла к узловым напорам с методом Ньютона, и базируется на процедуре линеаризации системы (1) с замыкающими соотношениями (2). Проведенные вычислительные эксперименты на примере одних и тех же цепей позволили сделать вывод о большем быстродействии и лучшей сходимости метода контурных расходов (МКР) по сравнению с МД, что на многие годы исключило попытки привлечения МД для конструирования автоматизированных решателей задач потокораспределения в СЦТ.

Однако, возможен другой подход к формированию системы уравнений узловых напоров, который опирается на инверсные (обратные) характеристики пассивных и активных элементов трубопроводной сети. Вычислительная эффективность этого

подхода, как показали последующие исследования его программной реализации на реальных гидравлических цепях большой размерности, намного превосходит показатели эффективности метода МД, описанного в трудах И. Влаха [10]. Если замыкающие соотношения (2) заменить на инверсные и подставить их в систему (1), то получим нелинейную систему уравнений узловых напоров новой структуры:

$$f_j(h_1, h_2, \dots, h_{m-1}) = \sum_{i=1}^n a_{ji} \cdot q_i(\mu_i \cdot \sum_{k=1}^m a_{ik}^T \cdot h_k) - Q_j = 0, \forall j = \overline{1, m-1}$$

$$\sum_{j=1}^m Q_j = 0,$$

где

$$q_i(\mu_i \cdot \sum_{k=1}^m a_{ik}^T h_k) = \begin{cases} R_{0i} + R_{1i} \cdot (\mu_i \cdot \sum_{k=1}^m a_{ik}^T \cdot h_k) + R_{2i} \cdot (\mu_i \cdot \sum_{k=1}^m a_{ik}^T \cdot h_k)^2 \\ \forall i = \overline{1, n_1} \\ \text{sign}(\mu_i \cdot \sum_{k=1}^m a_{ik}^T \cdot h_k) \left[\left| \mu_i \cdot \sum_{k=1}^m a_{ik}^T \cdot h_k \right| / r_i \right]^{1/\alpha_i} \\ \forall i = \overline{n_1 + 1, n} \end{cases}$$

Если предположить существование решения $h^* = (h_1^*, h_2^*, \dots, h_{m-1}^*)$ векторного уравнения узловых напоров $f(h) = 0$ и заменить в нём $h^* = h^0 + \delta h$, где $h^0 = (h_1^0, h_2^0, \dots, h_{m-1}^0)$ – некоторое начальное приближение к решению h^* , то после разложения векторного уравнения $f(h^0 + \delta h) = 0$ в двучленный ряд Тейлора по степеням малых приращений напоров в узлах δh получим векторное уравнение:

$$f(h^0 + \delta h) = f(h^0) + f'(h^0) \cdot \delta h + O(\delta h^2),$$

покоординатная запись которого приводит к следующей системе линейных алгебраических уравнений относительно малых приращений напоров в линейно-независимых узлах:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1(h^0)}{\partial h_1} \cdot \delta h_1 + \frac{\partial f_1(h^0)}{\partial h_2} \cdot \delta h_2 + \dots + \frac{\partial f_1(h^0)}{\partial h_{m-1}} \cdot \delta h_{m-1} = -f_1(h^0) \\ \frac{\partial f_2(h^0)}{\partial h_1} \cdot \delta h_1 + \frac{\partial f_2(h^0)}{\partial h_2} \cdot \delta h_2 + \dots + \frac{\partial f_2(h^0)}{\partial h_{m-1}} \cdot \delta h_{m-1} = -f_2(h^0) \\ \dots \\ \frac{\partial f_{m-1}(h^0)}{\partial h_1} \cdot \delta h_1 + \frac{\partial f_{m-1}(h^0)}{\partial h_2} \cdot \delta h_2 + \dots + \frac{\partial f_{m-1}(h^0)}{\partial h_{m-1}} \cdot \delta h_{m-1} = -f_{m-1}(h^0) \end{cases}, \quad (3)$$

где коэффициенты $\frac{\partial f_i(h^0)}{\partial h_j}$ ($i, j = \overline{1, m-1}$) при δh_j есть элементы матрицы Якобиана

для нелинейной вектор-функции $f(h)$, вычисляемые в точке h^0 .

Решая линейную систему (3) относительно приращений или поправок δh_j , $\forall j = \overline{1, m-1}$ получим лишь их приближённые значения δh_j^0 , с помощью которых можно улучшить исходные значения напоров в узлах $h_j^1 = h_j^0 + \delta h_j^0$. Аналогичными вычислениями значения h_j^1 можно улучшить и довести до более точного состояния h_j^2 и т.д. Таким образом, получается итерационная последовательность приближений $\{h^l\}$, такая, что каждое следующее приближение $\{h^{l+1}\}$ будет определяться посредством поправок, вычисляемых из линейной системы (3.10) по предыдущему приближению $\{h^l\}$.

Приведенные рассуждения привели к известному итерационному методу Ньютона в данном случае для системы нелинейных уравнений узловых напоров, полученной из системы уравнений материальных узловых балансов с привлечением обратных характеристик пассивных и активных элементов технологической структуры, моделируемой СЦТ.

Итерационный процесс Ньютона можно реализовать, привлекая либо методы обращения Якобиана, либо методы многократного решения линейной системы уравнений относительно поправок к узловым напорам. С точки зрения вычислений всегда более эффективно решать систему линейных уравнений, чем обращать соответствующую матрицу [11]. Последнее утверждение подтверждено также опытом вычислительного тестирования известных методов и алгоритмов в узловых моделях больших электронных схем.

Ввиду этого, вторым итерационным методом расчета задачи потокораспределения был разработан и реализован метод узловых напоров на базе обратных (инверсных) характеристик активных и пассивных элементов СЦТ, которому было присвоено имя «метод МУНО».

Анализ числовой эффективности контурной и узловой моделей. Представленные выше цифровые модели и методы потокораспределения в гидравлических цепях СЦТ позволяют ставить и решать задачи анализа эксплуатационных и послеаварийных режимов работы больших теплоснабжающих систем переменной технологической структуры с любой степенью детализации расчётной схемы [12]. Однако, для ответа на вопрос о предпочтении одному из них по критерию вычислительной эффективности, что весьма важно на этапе программной реализации *автоматизированного решателя задач потокораспределения* в гидравлических цепях переменной технологической структуры, возникает необходимость экспериментального изучения показателей вычислительной эффективности на реальных гидравлических цепях больших теплоснабжающих систем.

Метод МКК прошёл многостороннюю практическую проверку эффективности вычислений на модельных и реальных гидравлических цепях больших теплоснабжающих систем. Последнее поколение *Решателя задач потокораспределения* информационно-графической системы ТГИД-07 реализовано на основе метода МУНО.

Исследования эффективности вычислительных процессов выполнялись на фрагментах реальных гидравлических цепей теплоснабжающих систем Алматы, Кустаная и Шымкента, основные структурные характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Количественные характеристики исследуемых цепей

Номер гидравлической цепи	Фрагмент энерго-системы города	Ветви графа гидравлической цепи				Узлы графа гидравлической цепи	Контур графа гидравлической цепи
		Участков трубопроводов	Потребителей	Насосных станций	Всего ветвей		
1	Шымкент	1138	412	10	1560	1107	454
2	Кустанай	1168	300	7	1475	1155	321
3	Алматы	1903	530	16	2449	1776	673

Во всех исследуемых гидравлических цепях регуляторы давления были отключены, а регулирующие клапаны регуляторов были представлены как ветви с фиксированным гидравлическим сопротивлением. Такое переключение режима работы регуляторов позволило исключить внешние итерации по увязке их режима и измерить чистое время работы *Решателя задач потокораспределения*.

Исследования эффективности вычислительных процессов выполнялись с решателями задач потокораспределения, реализованными на базе методов МКК и МУНО. При этом использовались два характерных режима работы системы:

– эксплуатационный режим – режим с фиксированными реальными тепловыми нагрузками потребителей в текущем отопительном сезоне и реальной пропускной способностью трубопроводных сетей;

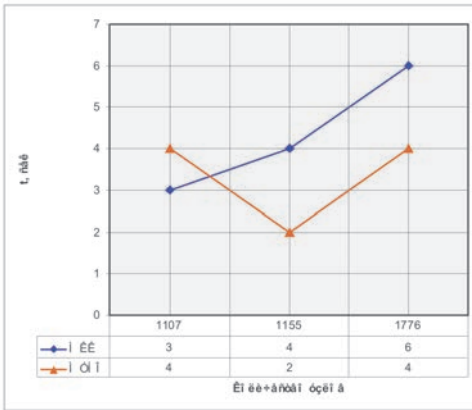
– аварийный режим – режим с фиксированными гидравлическими сопротивлениями потребителей и реальной пропускной способностью трубопроводных сетей;

В процессе вычисления фиксировались следующие характеристики: t_k – время выполнения всех операций, контролирующих целостность базы данных, включая связность графа расчётной схемы, с; t_p – время расчета параметров режима для всех объектов расчётной схемы исследуемой гидравлической цепи, с.

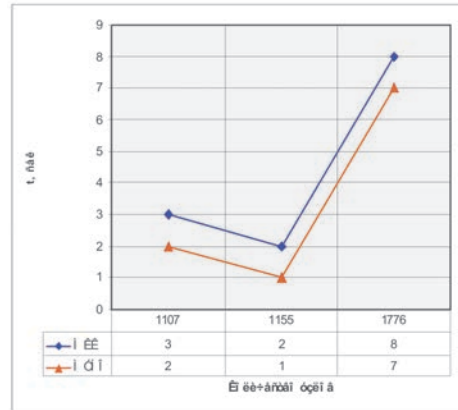
Результаты измерений временных характеристик вычислительных процессов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики эффективности вычислительных процессов

Номер гидравлической цепи	Метод МКК				Метод МУНО			
	Эксплуатационный режим		Аварийный режим		Эксплуатационный режим		Аварийный режим	
	t_k , сек	t_p , сек	t_k , сек	t_p , сек	t_k , сек	t_p , сек	t_k , сек	t_p , сек
1	3	3	4	8	4	2	5	6
2	4	2	6	10	2	1	3	8
3	6	8	8	12	4	7	5	9



а)



б)

- а) продолжительность выполнения операций, контролирующих целостность базы данных, включая связность графа расчётной схемы;
- б) продолжительность расчета параметров режима

Рисунок 1 – Продолжительность вычислительных процессов с использованием методов МКК и МУНО

Сравнительный анализ временных характеристик процессов потокораспределения в реальных гидравлических цепях подтверждает практическое совпадение характеристик быстрогодействия методов МКК и МУНО (рисунок 1).

Выводы. Анализ показывает, что при реализации аварийных режимов быстрогодействие метода МУНО незначительно возрастает из-за отсутствия трудоемких процессов выделения и обработки линейно-независимых контуров. В этой связи метод МУНО более целесообразен при моделировании сверхсложных трубопроводных систем с числом узлов более 5000, а метод МКК весьма эффективен для сетей средней и большой размерности с числом узлов до 5000.

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке статьи сотрудникам кафедры информационно-вычислительных систем Карагандинского технического университета и ПКФ «Сириус».

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09562666).

ЛИТЕРАТУРА

1 Вантеева О.В. Вероятностное моделирование установившегося потокораспределения в гидравлических цепях для произвольного состава граничных условий // Системные исследования молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. – Вып. 35. – С. 40-48. [Vanteeva O.V. Veroyatnostnoye modelirovaniye ustanovivshegosya potokoraspredeleniya v gidravlicheskih tselyah dlya proizvol'nogo sostava granichnykh usloviy // Sistemnyye issledovaniya molodykh uchenykh ISEM SO RAN. – Irkutsk: ISEM SO RAN, 2005. – Вып. 35. – С. 40-48.]

2 Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: Наука, 1966. –Т.1. – 632 с. [Berezin I.S., Zhidkov N.P. Metody vychislenij. – М.: Nauka, 1966. –Т.1. – 632 с.]

3 Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. и др. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей. – М.: Энергия, 1978. – 176 с. [Hasilev V.YA., Merenkov A.P., Kaganovich B.M. i dr. Metody i algoritmy rascheta teplovyh setej. – М.: Energiya, 1978. – 176 с.]

4 Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с. [Idel'chik V.I. Raschety i optimizaciya rezhimov elektricheskikh setej i sistem. М.: Energoatomizdat, 1988. 288 с.]

5 Деннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. – М.: Мир, 1988. – 440 с. [Dennis Dzh., Shnabel' R. Chislennyye metody bezuslovnoj optimizacii i resheniya nelinejnykh uravnenij. – М.: Mir, 1988. – 440 с.]

6 Новицкий Н.Н. Трубопроводные системы энергетики. Развитие теории и методов математического моделирования и оптимизации. – Новосибирск: Наука, 2008. – 311 с. [Novickij N.N. Truboprovodnyye sistemy energetiki. Razvitie teorii i metodov matematicheskogo modelirovaniya i optimizacii. – Novosibirsk: Nauka, 2008. – 311 с.]

7 Карасев Н.И., Крицкий А.Б., Томилова Н.И., Цок Г.Н. «Информатизация систем централизованного теплоснабжения в инфраструктуре жизнеобеспечения мегаполисов РК» // Труды международной научной конференции «Состояние, проблемы и задачи информатизации в Казахстане». – Караганда, 2005. – С.157-158. [Karasev N.I., Krickij A.B., Tomilova N.I., Cok G.N. «Informatizaciya sistem centralizovannogo teplosnabzheniya v infrastrukture zhizneobespecheniya megapolisov RK» // Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sostoyanie, problemy i zadachi informatizacii v Kazahstane». – Karaganda, 2005. – С.157-158.]

8 Шафеев Д.Е., Томилова Н.И. Объект интеллектуальной собственности. Программы для ЭВМ. ТГИД. «Структуры данных и алгоритмы их обработки». / Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объект, охраняемые авторским правом (№167 от 15.10.2018, РК). [Shafeev D.E., Tomilova N.I. Ob'ekt intellektual'noj sobstvennosti. Programmy dlya EVM. TGID. «Struktury dannyh i algoritmy ih obrabotki». / Svidetel'stvo o vnesenii svedenij v gosudarstvennyj reestr prav na ob'ekt, ohranyaemye avtorskim pravom (№167 ot 15.10.2018, RK)]

9 Томилова Н.И. Математические модели стационарных гидравлических режимов систем централизованного теплоснабжения. // Материалы 6-ой международной научно-технической конференции «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» // Вестник Алматинского института энергетики и связи. – 2008. – С.19-24. [Tomilova N.I. Matematicheskie modeli stacionarnykh gidravlicheskih rezhimov sistem centralizovannogo teplosnabzheniya. // Materialy 6-oy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Energetika, telekommunikacii i vysshee obrazovanie v sovremennykh usloviyah» // Vestnik Almatinskogo instituta energetiki i svyazi. – 2008. – С.19-24.]

10 Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с. [Vlah I., Singhal K. Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem: per. s angl. – М.: Radio i svyaz', 1988. – 560 с.]

11 Вазов В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. – М.:Наука, 1963. – 487 с. [Vazov V., Forsajt Dzh. Raznostnye metody resheniya differencial'nyh uravnenij v chastnyh proizvodnyh. – М.:Наука, 1963. – 487 s.]

12 Яковлев Б.В. Повышение эффективности теплофикации и теплоснабжения. – М.: Новости теплоснабжения, 2008. – 446 с. [Yakovlev B.V. Povyshenie effektivnosti teplofikacii i teplosnabzheniya. – М.: Novosti teplosnabzheniya, 2008. – 446 s.]

Н. И. ТОМИЛОВА¹, Ю. М. РЫБАЧУК², В. Н. ГОЛОВАЧЕВА¹

¹Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан,

²Харьков ұлттық университеті, Украина

КЕРІ СИПАТТАМАЛАРҒА НЕГІЗДЕЛГЕН ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ БЕЛГІЛЕНГЕН РЕЖИМДЕРІНІҢ САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ

Жылумен жабдықтау жүйелерінің белгіленген гидравликалық режимдерін есептеуді сипаттау және шешу үшін сандық модельдердің әдістері мен алгоритмдері, ағынды бөлуді есептеудің өзгертілген тораптық моделі, тораптық қысым теңдеулері жүйесін қалыптастырудың жаңа тәсілі әдісі ұсынылған, онда тікелей емес, пассивті және белсенді элементтердің кері сипаттамалары қолданылады. құбырлар желісі. Әзірленген ақпараттық-графикалық жүйеге негізделген контурлық және түйіндік модельдердің сандық тиімділігін талдау нәтижесі келтірілген.

Түйін сөздер: жылумен жабдықтау жүйесі, гидравликалық режим, ағын тарату, түйін моделі, контурлық модель кері сипаттама, есептеу, ақпараттық-графикалық жүйе.

N. I. TOMILOVA¹, YU. M. RYBACHUK², V. N. GOLOVACHYOVA¹

¹Karaganda Technical University, Kazakhstan,

²Kharkov National University, Ukraine

DIGITAL MODELS OF STEADY MODES OF HEAT SUPPLY SYSTEMS BASED ON INVERSE CHARACTERISTICS

Methods and algorithms of digital models for describing and solving the calculation of steady-state hydraulic regimes of heat supply systems, a modified nodal model for calculating the flow distribution, using the method of a new approach to forming a system of equations of nodal heads, in which not direct, but inverse characteristics of passive and active elements of the pipeline network are used. The result of the analysis of the numerical efficiency of the contour and nodal models based on the developed information-graphic system is presented.

Keywords: heat supply system, hydraulic mode, flow distribution, nodal model, contour model, inverse characteristic, calculation, information-graphic system.

G. N. SHAIKHOVA^{1*}, B. K. RAKHIMZHANOV²

¹*L.N. Gumilyov Eurasian national university, Nur-Sultan, Kazakhstan*

²*JSC “National Company “Kazakhstan Gharysh Sapary”, Nur-Sultan, Kazakhstan,*

E-mail: g.shaikhova@gmail.com, rahimzhanovberik@gmail.com

TRAVELING WAVE SOLUTIONS FOR THE EXTENDED MODIFIED KORTEWEG-DE VRIES EQUATION

In this paper, we study an extended modified Korteweg-de Vries equation, which contains the relevant higher-order nonlinear terms and fifth-order dispersion. This equation is the extension of the modified Korteweg-de Vries equation and described by the Ablowitz-Kaup-Newell-Segur hierarchy. The standard Korteweg-de Vries equation is the pioneer integrable model in solitary waves theory, which gives rise to multiple soliton solutions. The Korteweg-de Vries equation arises naturally from shallow water, plasma physics, and other fields of science.

To obtain exact solutions the sine-cosine method is applied. It is shown that the sine-cosine method provides a powerful mathematical tool for solving a great many nonlinear partial differential equations in mathematical physics. Traveling wave solutions are determined for extended modified Korteweg-de Vries equation. The study shows that the sine-cosine method is quite efficient and practically well suited for use in calculating traveling wave solutions for extended modified Korteweg-de Vries equation.

Keywords: *extended modified Korteweg-de Vries equation, sine-cosine method, ordinary differential equation, partial differential equation, nonlinearity.*

Introduction. Nonlinear evolution equations are of enormous significance and form the core of mathematical physics and engineering areas [1-5]. The studies of the nonlinear evolution equations, their solutions, and the interaction of these solutions are flourishing rapidly. Various powerful methods [6–15] have been used to find solutions to the nonlinear evolution equations.

In this paper, we study an extended modified Korteweg-de Vries (emKdV) equation in defocusing form [16,19], which is

$$u_t + u_x + \alpha(-6u^2u_x + u_{xxx}) + \alpha^2(6u^5 - 10uu_x^2 - 10u^2u_{xx} + u_{xxxx})_x = 0, \quad (1)$$

where $u(x, t)$ is a real function of the spatial coordinate x and the time t , $\alpha \ll 1$ is a nondimensional measure of the small wave amplitude relative to depth. The emKdV includes four nonlinear terms, and two linear dispersive terms, namely u_{xxx} and u_{xxxx} differently from the standard family of the fifth-order modified KdV equations. The equation (1) is modification of extended Korteweg-de Vries equation [17, 18]

$$u_t + u_x + \alpha(6u^2u_x + u_{xxx}) + \alpha^2(c_1u^2u_x + c_2u_xu_{xx} + c_3uu_{xxx} + c_4u_{xxxx}) = 0, \quad (2)$$

where the parameters c_1, c_2, c_3, c_4 , are the coefficients of the higher-order terms, and its values depend on the physical context. Equation (2) describes the evolution of steeper waves with shorter wave lengths than in the KdV equation [17, 18].

* E-mail корреспондирующего автора: g.shaikhova@gmail.com

The emKdV equation (1) is integrable, rational and periodic solutions have been also obtained by means of the N-fold Darboux transformation, meanwhile, the infinitely many conservation laws have been constructed based on the Lax pair in [16]. Multi-soliton solutions by Hirota’s direct method and the Painleve test for equation (1) have been studied in [19]. Long-time asymptotic behavior has been studied in [20]. However, it is noted that the sine-cosine method [1, 13-15] for the emKdV equation (1) was not applied. So, in this research we find new kind of solutions for equation (1) by applying the sine-cosine method.

2. Description of the sine-cosine method. In this section, we describe the sine-cosine method [1, 13-15]. According to the sine-cosine method by using a wave transformation

$$u(x, t) = u(\xi), \quad \xi = (x - ct), \tag{3}$$

the partial differential equation (PDE)

$$E_1(u, u_x, u_{xx}, u_{xxx}, \dots) = 0 \tag{4}$$

can be converted to ordinary differential equation (ODE)

$$E_2(u, u', u'', u''', \dots) = 0 \tag{5}$$

Then the equation (5) is integrated as long as all terms contain derivatives where integration constants are considered zeros. The solutions of ODE (5) can be expressed in the form [1, 13-15]

$$u(x, t) = \begin{cases} \lambda \cos^\beta(\mu\xi), & |\xi| \leq \frac{\pi}{2\mu}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{6}$$

or

$$u(x, t) = \begin{cases} \lambda \cos^\beta(\mu\xi), & |\xi| \leq \frac{\pi}{\mu}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{7}$$

where $\xi = x - ct$ the parameters μ , λ and β will be determined, and μ is wave number and c is wave speed respectively [1]. The derivatives of (6) become

$$(u(\mu\xi))' = -\beta\mu\lambda \cos^{\beta-1}(\mu\xi) \sin(\mu\xi), \tag{8}$$

$$(u(\mu\xi))'' = -\mu^2\beta^2\lambda \cos^\beta(\mu\xi) + \mu^2\lambda\beta(\beta - 1) \cos^{\beta-2}(\mu\xi), \tag{9}$$

$$(u(\mu\xi))^{(iv)} = \mu^4\beta^4\lambda \cos(\mu\xi)^\beta - 2\mu^2\lambda\beta(\beta - 1)(\beta^2 - 2\beta + 2) \cos^{\beta-2} + \mu^4\beta\lambda(\beta - 1)(\beta - 2)(\beta - 3) \cos^{\beta-4}, \tag{10}$$

and the derivatives of (7) have next forms

$$(u(\mu\xi))' = \beta\mu\lambda \sin^{\beta-1}(\mu\xi) \cos(\mu\xi), \tag{11}$$

$$(u(\mu\xi))'' = -\mu^2\beta^2\lambda \sin^\beta(\mu\xi) + \mu^2\lambda\beta(\beta - 1) \sin^{\beta-2}(\mu\xi), \tag{12}$$

$$(u(\mu\xi))^{(iv)} = \mu^4\beta^4\lambda \sin(\mu\xi)^\beta - 2\mu^2\lambda\beta(\beta - 1)(\beta^2 - 2\beta + 2) \sin^{\beta-2} + \tag{13}$$

$$+\mu^4\beta\lambda(\beta-1)(\beta-2)(\beta-3)\sin^{\beta-4},$$

and so on for the other derivatives. Applying (6)-(13) into the reduced ordinary differential equation (5) we obtain a trigonometric equation of $\cos^r(\mu\xi)$ or $\sin^r(\mu\xi)$ terms. Then, we determine the parameters by first balancing the exponents of each pair of cosine or sine to determine β . Next, we collect all coefficients of the same power in $\cos^r(\mu\xi)$ or $\sin^r(\mu\xi)$, where these coefficients have to vanish. The system of algebraic equations among the unknown λ and μ will be given and from that, we can determine coefficients.

3. Application of the sine-cosine method. Substituting the wave transformation

$$u(x,t) = u(\xi) = u(x - ct), \tag{14}$$

into equation (1) we get the following ordinary differential equation:

$$u'(1-c) - 2\alpha(u^3)' + \alpha u'''' + \alpha^2(6u^5 - 10u(u')^2 - 10u^2u'' + u^{(iv)})' = 0. \tag{15}$$

Integrate equation (15) once, with respect to ξ , yields

$$u(1-c) - 2\alpha u^3 + \alpha u'' + \alpha^2(6u^5 - 10u(u')^2 - 10u^2u'' + u^{(iv)}) = L, \tag{16}$$

where L is constant of integration. By taking constant of integration $L = 0$ we have

$$u(1-c) - 2\alpha u^3 + \alpha u'' + \alpha^2(6u^5 - 10u(u')^2 - 10u^2u'' + u^{(iv)}) = 0, \tag{17}$$

In next subsection, we solve the equation (17) by the sine-cosine method.

3.1 The sine solution. According to method the solution of the (17) can be found by transformation

$$u(\mu\xi) = \lambda \sin^\beta(\mu\xi). \tag{18}$$

To find sine solution we use (18) and its derivatives (11)-(13). Substitute (18) and (11)-(13) into (17) we get

$$\begin{aligned} &(1-c)\lambda \sin^\beta(\mu\xi) - 2\alpha\lambda^3 \sin^{3\beta}(\mu\xi) - \alpha\mu^2\beta^2\lambda \sin^\beta(\mu\xi) + \alpha\mu^2\lambda\beta(\beta-1)\sin^{\beta-2}(\mu\xi) + \\ &+ 6\alpha^2\lambda^5 \sin^{5\beta}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \sin^{3\beta-2}(\mu\xi) + 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \sin^{3\beta}(\mu\xi) + \\ &+ 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \sin^{3\beta}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\lambda^3\beta(\beta-1)\sin^{3\beta-2}(\mu\xi) + \\ &+ \alpha^2\mu^4\beta^4\lambda \sin^\beta(\mu\xi) - 2\alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta-1)(\beta^2 - 2\beta + 2)\sin^{\beta-2}(\mu\xi) + \\ &+ \alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta-1)(\beta-2)(\beta-3)\sin^{\beta-4}(\mu\xi) = 0 \end{aligned} \tag{19}$$

Using the balance method, by equating the exponents of \sin^i , from (19) we determine β :

$$\begin{aligned} &\beta - 1 \neq 0, \quad (\beta - 1)(\beta - 2)(\beta - 3) \neq 0, \\ &\beta - 4 = 5\beta \quad \Rightarrow \quad \beta = -1. \end{aligned} \tag{20}$$

Substitute (20) in (19) we obtain next equation

$$\begin{aligned} &(1-c)\lambda \sin^{-1}(\mu\xi) - 2\alpha\lambda^3 \sin^{-3}(\mu\xi) - \alpha\mu^2\beta^2\lambda \sin^{-1}(\mu\xi) + \alpha\mu^2\lambda\beta(\beta-1)\sin^{-3}(\mu\xi) + \\ &+ 6\alpha^2\lambda^5 \sin^{-5}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \sin^{-5}(\mu\xi) + 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \sin^{-3}(\mu\xi) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \sin^{-3}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\lambda^3\beta(\beta - 1)\sin^{-5}(\mu\xi) + \\
 &+\alpha^2\mu^4\beta^4\lambda \sin^{-1}(\mu\xi) - 2\alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta - 1)(\beta^2 - 2\beta + 2)\sin^{-3}(\mu\xi) + \\
 &+\alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta - 1)(\beta - 2)(\beta - 3)\sin^{-5}(\mu\xi) = 0
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Equating the coefficients of each pair of the sine functions, we find the following system of algebraic equations:

$$\sin^{-1}(\mu\xi): \quad 1 - c - \alpha\mu^2 + \alpha^2\mu^4 = 0, \tag{22}$$

$$\sin^{-3}(\mu\xi): \quad -\lambda^2 + \mu^2 - 10\alpha\mu^4 + 10\alpha\mu^2\lambda^2 = 0, \tag{23}$$

$$\sin^{-5}(\mu\xi): \quad \lambda^2 - 5\mu^2\lambda^2 + 4\mu^4 = 0. \tag{24}$$

From (22)-(24) we have

$$\mu = \pm\sqrt{\frac{1}{10\alpha}}, \quad \lambda = \pm\sqrt{\frac{1}{10\alpha}}, \quad c = 1 - \alpha\mu^2 + \alpha^2\mu^4, \tag{25}$$

where α real number.

Substituting (25) into (18) we have the sine solution of the extended modified KdV equation (1)

$$u_1(x, t) = \pm\sqrt{\frac{1}{10\alpha}} \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{1}{10\alpha}}(x - ct)\right), \tag{26}$$

where $c = 1 - \alpha\mu^2 + \alpha^2\mu^4$.

3.2 The cosine solution. To find cosine solution we use

$$u(\mu\xi) = \lambda \cos^\beta(\mu\xi), \tag{27}$$

and its derivatives (8)-(10). Substitute (27) and (8)-(10) into (17) we get

$$\begin{aligned}
 &(1 - c)\lambda \cos^\beta(\mu\xi) - 2\alpha\lambda^3 \cos^{3\beta}(\mu\xi) - \alpha\mu^2\beta^2\lambda \cos^\beta(\mu\xi) + \alpha\mu^2\lambda\beta(\beta - 1)\cos^{\beta-2}(\mu\xi) + \\
 &+6\alpha^2\lambda^5 \cos^{5\beta}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \cos^{3\beta-2}(\mu\xi) + 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \cos^{3\beta}(\mu\xi) + \\
 &+10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \cos^{3\beta}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\lambda^3\beta(\beta - 1)\cos^{3\beta-2}(\mu\xi) + \\
 &+\alpha^2\mu^4\beta^4\lambda \cos^\beta(\mu\xi) - 2\alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta - 1)(\beta^2 - 2\beta + 2)\cos^{\beta-2}(\mu\xi) + \\
 &+\alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta - 1)(\beta - 2)(\beta - 3)\cos^{\beta-4}(\mu\xi) = 0
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Using the balance method, by equating the exponents of \cos^j , from (28) we find β :

$$\begin{aligned}
 &\beta - 1 \neq 0, \quad (\beta - 1)(\beta - 2)(\beta - 3) \neq 0, \\
 &\beta - 4 = 5\beta \Rightarrow \beta = -1.
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Substituting (29) in (28) we obtain next equation

$$(1 - c)\lambda \cos^{-1}(\mu\xi) - 2\alpha\lambda^3 \cos^{-3}(\mu\xi) - \alpha\mu^2\beta^2\lambda \cos^{-1}(\mu\xi) + \alpha\mu^2\lambda\beta(\beta - 1)\cos^{-3}(\mu\xi) +$$

$$\begin{aligned}
 &+6\alpha^2\lambda^5 \cos^{-5}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \cos^{-5}(\mu\xi) + 10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \cos^{-3}(\mu\xi) + \\
 &+10\alpha^2\mu^2\beta^2\lambda^3 \cos^{-3}(\mu\xi) - 10\alpha^2\mu^2\lambda^3\beta(\beta - 1) \cos^{-5}(\mu\xi) + \\
 &+ \alpha^2\mu^4\beta^4\lambda \cos^{-1}(\mu\xi) - 2\alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta - 1)(\beta^2 - 2\beta + 2) \cos^{-3}(\mu\xi) + \\
 &+ \alpha^2\mu^4\lambda\beta(\beta - 1)(\beta - 2)(\beta - 3) \cos^{-5}(\mu\xi) = 0
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

From (30) equating the coefficients of each pair of the cosine functions, we find the following system of algebraic equations:

$$\cos^{-1}(\mu\xi): \quad 1 - c - \alpha\mu^2 + \alpha^2\mu^4 = 0, \tag{31}$$

$$\cos^{-3}(\mu\xi): \quad -\lambda^2 + \mu^2 - 10\alpha\mu^4 + 10\alpha\mu^2\lambda^2 = 0, \tag{32}$$

$$\cos^{-5}(\mu\xi): \quad \lambda^2 - 5\mu^2\lambda^2 + 4\mu^4 = 0. \tag{33}$$

Solving system (31)-(33) leads to the results,

$$\mu = \pm\sqrt{\frac{1}{10\alpha}}, \quad \lambda = \pm\sqrt{\frac{1}{10\alpha}}, \quad c = 1 - \alpha\mu^2 + \alpha^2\mu^4, \tag{34}$$

where α real number.

Substituting (34) into (27) we have the cosine solution

$$u_2(x, t) = \pm\sqrt{\frac{1}{10\alpha}} \cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{1}{10\alpha}}(x - ct)\right), \tag{35}$$

where $c = 1 - \alpha\mu^2 + \alpha^2\mu^4$.

4. Conclusion. The sine-cosine method was effectively used for the analytic treatment of the extended modified KdV equation. This equation is the generalization of the standard KdV equation and described by Ablowitz-Kaup-Newell-Segur (AKNS) hierarchy. Traveling wave solutions were derived. The obtained solutions can have an application to some practical physical problems. The applied method can be used in further works to establish more entirely new solutions for other kinds of nonlinear evolution equations.

The research work was prepared with the financial support of the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, IRN project AP09057947.

REFERENCES

- 1 Wazwaz A. Partial differential equations and solitary waves theory. //Springer. -2009.
- 2 Ablowitz M.J., Clarkson P.A., Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering. // Cambridge University Press, New York.-1991.
- 3 Matveev V.B., Salle M.A., Darboux transformations and solitons. //Springer, Berlin.-1991.
- 4 Wadati M. The modified Korteweg-de Vries equation// Journal of the Physical Society of Japan.-1973.-Vol.34. -P.128.
- 5 Akhmediev N., Ankiewicz A., Taki M. Waves that appear from nowhere and disappear without a trace// Physics Letters A.-2009.-Vol.373.-P. 675.

6 Hereman W., Nuseir A. Symbolic methods to construct exact solutions of nonlinear partial differential equations // *Mathematics and Computers in Simulation*. -1997.-Vol. 43. -P.13–27.

7 Hirota T. *The Direct Method in Soliton Theory*. // Cambridge University Press, Cambridge. -2004.

8 Yesmakhanova K., Nugmanova G., Shaikhova G., Bekova G., Myrzakulov R. Coupled dispersionless and generalized Heisenberg ferromagnet equations with self-consistent sources: Geometry and equivalence // *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*- 2020. -Vol.17, -No 7. -P. 2050104 (19 pages).

9 Kutum B.B., Shaikhova G.N. q-soliton solution for two-dimensional q-Toda lattice. // *Bulletin of the Karaganda University. Physics series*. -2019. -No. 2 (95). -P. 22-26.

10 Shaikhova G.N., Kutum B.B., Altaybaeva A.B., Rakhimzhanov B.K. Exact solutions for the (3+1)-dimensional Kudryashov-Sinelshchikov equation // *Journal of Physics: Conference Series*. -2019. -Vol. 1416. -P. 012030(1-6).

11 Biswas A., Yildirim Y., Yasar E., Zhou O., Moshokoa S., Belic M. Optical solitons for Lakshmanan-Porsezian-Daniel model by modified simple equation method // *Optik*. -2018, -Vol. 160. -P. 24-32.

12 Malfliet W. The tanh method: I. Exact solutions of nonlinear evolution and wave equations. *Physica Scripta*. -1996. -Vol. 54. P. 563-568.

13 Wazwaz A.M. The sine-cosine method for obtaining solutions with compact and noncompact structures. *Applied Mathematics and Computation*. -2004. -Vol. 159(2). P. 559-576.

14 Yusufoglu E., Bekir A. Solitons and periodic solutions of coupled nonlinear evolution equations by using Sine-Cosine method // *International Journal of Computer Mathematics*. -2006. -Vol. 83(12). -P. 915-924.

15 Wazwaz A.M. A sine-cosine method for handling nonlinear wave equations. // *Mathematical and Computer Modeling*. -2004. -No 40(5).-P. 499-508.

16 Wang X., Zhang J., Wang L., Conservation laws, periodic and rational solutions for an extended modified Korteweg-de Vries equation. // *Nonlinear Dynamics*. -2018.-Vol.92.-P. 1507–1516.

17 Marchant T.R., Smyth N.F. Soliton interaction for the extended Korteweg-de Vries equation. *IMA Journal of Applied Mathematics*. -1996.-Vol.56.-P. 157–176.

18 Marchant T.R., Smyth N.F. The extended Korteweg-de Vries equation and the resonant flow of a fluid over topography. *Journal of Fluid Mechanics*.-1990.-Vol.221.-P.263-288.

19 Wazwaz A.M., Xu G., An extended modified KdV equation and its Painlevé integrability, *Nonlinear Dynamics*. -2016.-Vol 86, -P. 1455–1460.

20 Liua N., Guo B., Wang D., Wang Y. Long-time asymptotic behavior for an extended modified Korteweg-de Vries equation // *Communications in Mathematical Sciences*. -2019.-Vol. 17. -P. 1877 – 1913.

Г. Н. ШАЙХОВА¹, Б. К. РАХИМЖАНОВ²

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан,

²АО «Национальная компания «Казахстан Фарм Сапары», Нур-Султан, Казахстан,

e-mail: g.shaikhova@gmail.com, rahimzhanovberik@gmail.com

РЕШЕНИЯ ТИПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ РАСШИРЕННОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА-ДЕ ФРИЗА

В работе исследовано расширенное модифицированное уравнение Кортевега-де Фриза, которое содержит соответствующие нелинейные члены более высокого порядка и дисперсию пятого

порядка. Это уравнение является расширением модифицированного уравнения Кортевега-де Фриза и описывается иерархией Абловица-Каупа-Ньюэлла-Сегура. Стандартное уравнение Кортевега-де Фриза является первой интегрируемой моделью в теории уединенных волн, которая приводит к многосолитонным решениям. Уравнение Кортевега-де Фриза возникает из мелкой воды, физики плазмы и других областей науки.

Для получения точных решений применен метод синус-косинусов. Показано, что метод синус-косинусов представляет собой мощный математический инструмент для решения очень многих нелинейных уравнений в частных производных математической физики. Определены решения типа бегущей волны для расширенного модифицированного уравнения Кортевега-де Фриза. Исследование показывает, что метод синус-косинусов достаточно эффективен и практически хорошо подходит для использования при вычислении решений типа бегущей волны для расширенного модифицированного уравнения Кортевега-де Фриза.

Ключевые слова: расширенное модифицированное уравнение Кортевега-де Фриза, метод синус-косинус, обыкновенное дифференциальное уравнение, дифференциальное уравнение в частных производных, нелинейность.

Г. Н. ШАЙХОВА ¹, Б. К. РАХИМЖАНОВ²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан,
²«Қазақстан Ғарыш Сапары» ұлттық компаниясы» АҚ, Нұр-Сұлтан, Қазақстан,
 e-mail: g.shaikhova@gmail.com, rahimzhanovberik@gmail.com

КЕҢЕЙТІЛГЕН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН КОРТЕВЕГ-ДЕ ФРИЗ ТЕНДЕУІНІҢ ҚОЗҒАЛМАЛЫ ТОЛҚЫНДЫҚ ШЕШІМДЕРІ

Бұл жұмыста жоғары деңгейлі сызықтық емес мүшелер мен бесінші ретті дисперсияны қамтитын кеңейтілген модификацияланған Кортевег-де Фриз теңдеуі зерттеледі. Бұл теңдеу модификацияланған Кортевег-де Фриз теңдеуінің кеңейтілген түрі болып табылады және ол Абловиц-Кауп-Ньюэлл-Сегур иерархиясымен сипатталады. Стандартты Кортевег-де Фриз теңдеуі - жекеленген толқындар теориясындағы көпсолитондық шешімдерге әкелетін алғашқы интегралданатын модель. Кортевег-де Фриз теңдеуі таяз суларда, плазма физикасынан және басқа ғылым салаларынан туындайды.

Нақты шешімдер алу үшін синус-косинус әдісі қолданылады. Синус-косинус әдісі - математикалық физиканың көптеген сызықтық емес дербес туынды дифференциалдық теңдеулерін шешудің тиімді математикалық құралы екендігі көрсетілген. Кеңейтілген модификацияланған Кортевег-де Фриз теңдеуі үшін қозғалмалы толқын түріндегі шешімдер анықталды. Зерттеу көрсеткендей, синус-косинус әдісі айтарлықтай тиімді және кеңейтілген модификацияланған Кортевег-де Фриз теңдеуі үшін қозғалмалы толқындық шешімдерді есептеу үшін қолдануға өте ыңғайлы.

Түйін сөздер: кеңейтілген модификацияланған Кортевег-де Фриз теңдеуі, синус-косинус әдісі, қарапайым дифференциалдық теңдеу, дербес туынды дифференциалдық теңдеу, сызықтық емес.

N. M. SHAYAKHMETOV^{2}, K. A. ALIBAYEVA^{2,1}, D. Y. AIZHULOV¹,*

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

IDENTIFICATION AND RESEARCH OF FACTORS AFFECTING THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF WELL FLOW RATES IN SPACE

The paper discusses and research the factors affecting the filtration rate to reduce stagnant zones in the domain and spreading outside the block under consideration. The main hydrodynamic factors in production by In-Situ Leaching are the distribution of permeability in the reservoir and well flow rates. The study of the factors was carried out on the basis of mathematical models using Darcy Law and Law of Conservation of Mass. Calculation was accomplished on a two-dimensional area with an isotropic and non-uniform permeability distribution to determine the effect of permeability on the leached area. The permeability coefficient was distributed respectively over three zones, in the southern part the permeability was low, in the central transition from low to high, respectively, in the northern part there was a highly permeable zone. Three wells were located in the domain, with the production well in the center of the domain. Injection wells are located symmetrically with respect to a horizontal line passing through the center of the area under consideration. The calculation was carried out for three modes of well flow rates with the ratio of the flow rates of the injection wells 0.5 / 0.5, 0.2 / 0.8, 0.8 / 0.2 relative to the flow rate of the production well.

On the basis of comparative analyzes of the obtained results, it is concluded that: at the same flow rates, regardless of the permeability of the zones, the results obtained show that the leaching area in the low-permeability zone is larger in comparison with the high-permeability zone; with an increase in permeability, the shape of the leaching zone tends from round to drop-shaped; with an increase in the flow rate of wells in the radius of the leaching zone, it increases if the flow rate of solutions is much higher than the filtration rate.

Keywords: *In-situ leaching, mathematical modeling, hydrodynamics, well flow rate, flow in porous media*

Introduction. Using of modern mathematical methods is a forced step in the field of mineral extraction by in-situ leaching (ISL). Reducing the volume of uranium deposits that are easy to mine, mining of other metals and minerals that are located in complex geological structures or production of minerals that requires additional technological solutions implies the creation of new mathematical and geophysical approaches for the design and forecasting of the field development process [1]. For example, when mining copper using the ISL method, specialists are faced with the problem of achieving contact between the leaching agent and the extracting metal [2]. Applying of methods for increasing the permeability of the formation that used in the field of oil production is impossible due to the high cost of the methods. Extraction of rare earth minerals, gold and other minerals is also accompanied by such problems as: environmental pollution due to spreading of the leaching solution outside the mined area, clogging of pores due to the high carbonate content of the rock or the choice of the incorrect chemical composition of the leaching agent, low reaction rate

* E-mail корреспондирующего автора: shayakhmetovn@gmail.com

due to features of the mining mineral, etc. [3]. Most of the problems presented can be solved by using the capabilities of modern computer technologies and methods of mathematical modeling, and for the rest of the problems, these methods can be used as tools for choosing certain technological solutions. For example, successful results using of mathematical modeling in ISL processes are represented: for the design of the field in [4-7], for the choice of optimal production methods in [3, 7-9].

One of the most important issues at mineral extraction by the ISL is to determine the optimal flow rates of injection wells in order to achieve minimal spreading beyond the boundaries of the developed area and to reduce dilution by formation waters. The issue requires an integrated approach, consisting of several stages: research and identification of factors that affecting the optimal distribution of well flow rates in space; development of an algorithm for optimizing well flow rates. This paper considers and investigates the factors that affecting the flow rate to reduce stagnation and spreading zones. The main hydrodynamic factors in ISL production are the distribution of permeability in the reservoir and well flow rates.

Problem statement and research methods. The study of the factors was carried out on the basis of mathematical models presented in [10] and using Darcy Law and Mass Conservation Law. By using these laws, the distribution of hydrodynamic head and velocity in the reservoir are calculated:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\bar{u}\varphi) &= q_{inj_i} \delta(x - x_i, y - y_i) - q_{prod_p} \delta(x - x_p, y - y_p) \\ \bar{u}\varphi &= -k_f \operatorname{grad} h \end{aligned} \quad (1)$$

For the concentration of the leaching agent, an equation of state for a tracer with advection, hydrodynamic dispersion, injection and production wells is chosen:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi \partial c}{\partial t} &= -\bar{u} \operatorname{grad} c + \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) + c^0 q_{inj_i} \delta(x - x_i, y - y_i) - c q_{prod_p} \delta(x - x_p, y - y_p) \\ \bar{u}\varphi &= -k_f \operatorname{grad} h \end{aligned} \quad (2)$$

where, \bar{u} – velocity field; φ – porosity; q_{inj_i} , q_{prod_p} – flow rates of the i-th injection and p-th production wells, respectively; c – reagent concentration in leaching solution; c^0 – reagent concentration in leaching solution at injection wells; k_f – hydraulic conductivity of layer; h – hydraulic head;

Relation between hydraulic head and pressure is defined as:

$$h = \frac{P}{\rho_w \bar{g}} \quad (3)$$

where P – pressure, ρ_w – density of water in standard conditions; \bar{g} – gravitational acceleration.

A rectangular 2D area with a dimension of 200x200 meters with two injection wells and one production well is considered. However, the total computational domain was taken in such a way that the distance from the wells to the boundaries is equal to 10 distances between

the wells. Such a choice of the boundaries of the computational domain is conditioned by the minimization of the effect of the boundaries on the flow in the interwell space. Wells are located along the vertical axis in the center of the area (Figure 1). Diameter of the wells equals to 0.2 m and distance between them is 45 meters.

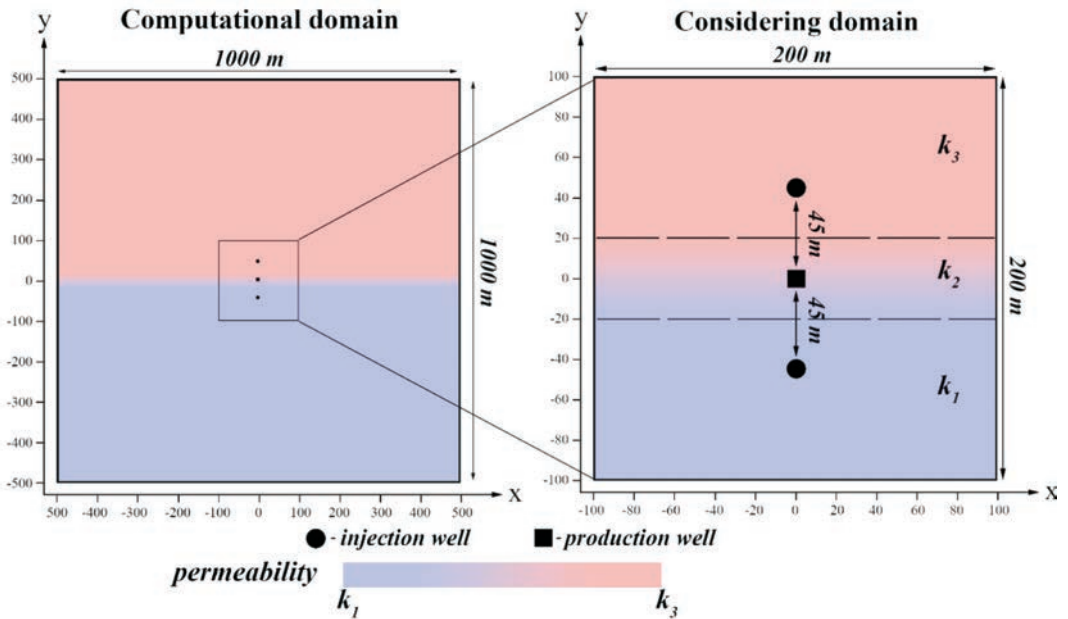


Figure 1 – Schematic illustration of the computational domain (Drawing not to scale)

Since this paper studies the effect of layer permeability on the efficiency of field development, the area was divided into three regions with different permeabilities, with the upper y_t and y_b lower boundaries of the block marked with a dashed line (in considering domain) in Figure 1. The first segment is characterized by high permeability k_1 , the second segment is transient and the distribution of permeability k_2 is determined by linear interpolation of the other two segments, the third segment is presented as a region with low permeability k_3 :

$$k_1 = 1,574 \cdot 10^{-12} [m^2]$$

$$k_2 = k_1 + \frac{k_3 - k_1}{y_t - y_b} (y - y_b) \tag{4}$$

$$k_3 = 15,74 \cdot 10^{-12} [m^2]$$

On the basis of the following equation, a transformation from the formation permeability to the hydraulic conductivity (k_f) is performed:

$$k_f = \frac{k_i \rho_l g}{\mu_l} [m/d], \quad i = 1...3 \tag{5}$$

where, k_i – permeability of the i -th segment according to the data specified in (7), ρ_l – density of formation water, g – acceleration of gravity, μ_l – viscosity of formation water.

As the formation water does not differ significantly from water under standard conditions in terms of density and viscosity, the corresponding values for water were taken as characteristics of the formation fluid.

At the initial moment of time, there is no leaching agent in the formation, since it appears in the formation as a result of injection. To track spreading outside the considering domain following boundary conditions was set:

$$\begin{aligned} h(x_w, y, t) = h_0, h(x_e, y, t) = h_0 \\ h(x, y_n, t) = h_0, h(x, y_s, t) = h_0 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c(x_w, y, 0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial c(x_e, y, 0)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial c(x, y_n, 0)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial c(x, y_s, 0)}{\partial y} = 0 \end{aligned} \tag{7}$$

$$c(x, y, t_0) = 0$$

where, x_e, x_w – east (right hand side) and west (left hand side) boundaries of calculation domain, respectively, y_s, y_n – south (bottom) and north (top) boundaries of calculation domain, respectively. The value of depends on the depth of the ore body.

Since the equation for the hydrodynamic head is elliptic, the following initial guess is:

$$h(x, y, 0) = 0 \tag{8}$$

The solution of the system of equations (1) is conducted on the basis of the upper relaxation method, where the hydrodynamic head h is known in the first iteration according to the initial approximation (11). Equation (2) with the initial and boundary conditions (9, 10), as well as the distribution of the permeability (7) is solved using an explicit Euler scheme.

Results and analysis. In the result of the study, different flow rates of injection wells are considered while monitoring the effectiveness of these rates in the context of large leaching zones in the target area and smaller spreading zones outside it. By leaching zone means the area of distribution of a solution with a non-zero concentration.

Revealing the influence of the formation permeability on the production area is carried out by changing the ratio of the flow rates of the injection wells to the production wells, while a prerequisite is that the sum of the flow rates of the injection wells is equal to the flow rates of the production well:

$$q_{inj_1} + q_{inj_2} = q_{prod} \tag{9}$$

where, q_{inj_1} – flow rate of a well located in area with low permeability p_1 , relatively q_{inj_2} – flow rate of an injection well located in a highly permeable area.

The study was carried out in three modes with the following ratios of flow rates to injectivity of a production well:

Case 1:
$$q_{inj_1} = q_{inj_2} = 0,5 q_{prod} \tag{13}$$

Case 2: $q_{inj_1} = 0,8 q_{prod}, \quad q_{inj_2} = 0,2 q_{prod}$ (14)

Case 3: $q_{inj_1} = 0,2 q_{prod}, \quad q_{inj_2} = 0,8 q_{prod}$ (15)

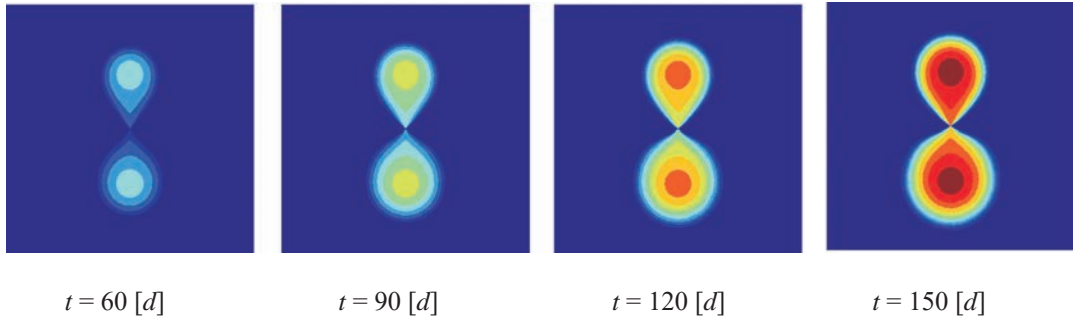


Figure 2 – Leaching front movement in Case 1 (0.5, 0.5)

As shown in Figure 3, the leaching zone area is larger in the low permeability region. However, the rate of reaching of the reagent to the production well is faster in the high permeable zone. In addition, the shape of the leaching zone tends to a drop-like in the zone with permeability p_3 , respectively, in the zone with permeability p_1 , the shape tends to a circle. This behavior of the forms is explained by the pressure distribution at which the influence of the production well is achieved faster in the zone with high permeability, which in turn increases the flow rate between the injection and production wells in the highly permeable area. According to the Dupuit formula, the pressure distribution in the well depends not only on the well flow rate, but also on the formation permeability, as well as on the pressure on the outline. The outline pressure can also vary due to the presence of wells or other factors such as formation water, etc.

$$q = \frac{2\pi k h_f}{\mu} \frac{P_c - P_w}{\ln \frac{r_c}{r_w}} \tag{10}$$

where h_f – length of well filter, P_c, P_w – outline and well pressure respectively, r_c, r_w – outline and well radius respectively.

In Figure 3 shown the movement of the leaching fronts at the corresponding time t (in days).

The distribution of the y component of the Darcy velocity along the horizontal lines at the coordinates $x = 22.5$ and $x = -22.5$ is shown in Figure 4.

The corresponding results of the movement of the leaching fronts for Cases 2 and 3 are shown in Figures 5-6.

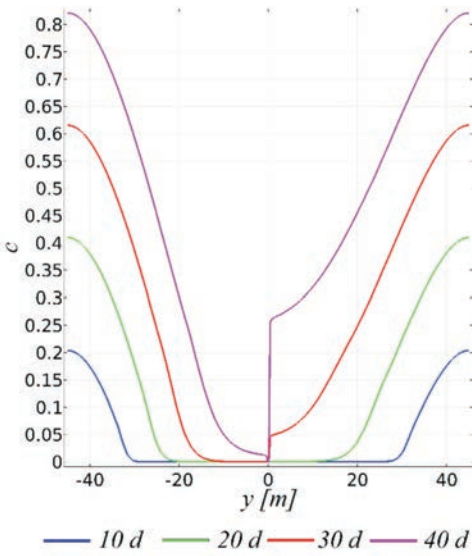


Figure 3 – Movement of the leaching front in case 1 along the vertical line between injection – production – injection wells

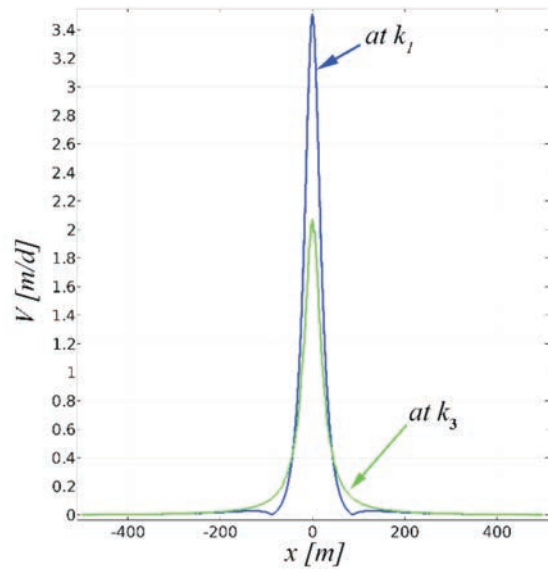


Figure 4 – Graph of the variation of the y component of the Darcy velocity in the k_1 and k_3 zones with low and high permeability, respectively.

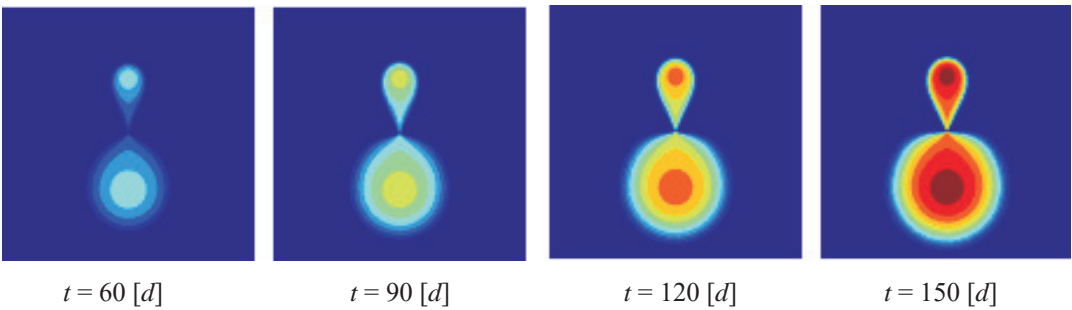


Figure 5 – Leaching front movement in Case 2 (0.8, 0.2)

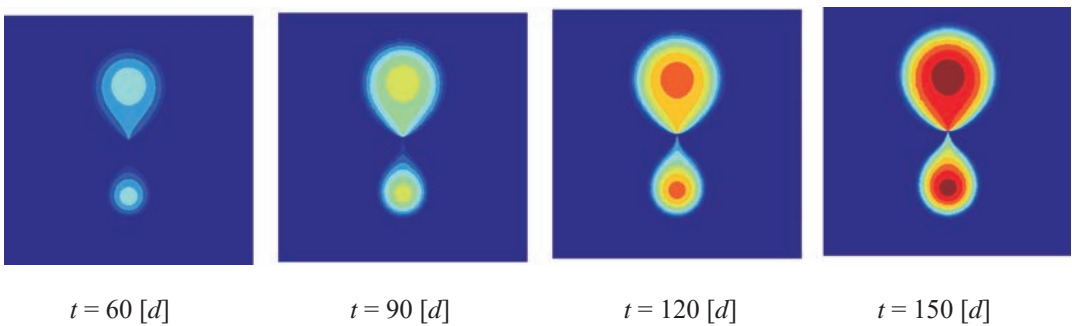


Figure 6 – Leaching front movement in Case 3 (0.2, 0.8)

The main indicator of production efficiency in the considering problem is the leaching area. It should be noted that the target zones for production are zones in the interwell space Ω_a (as shown in Figure 7).

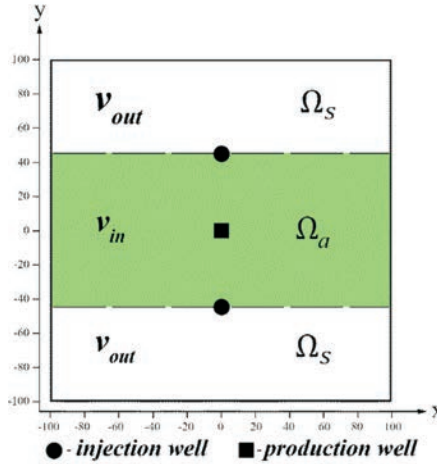


Figure 7 – The scheme of zone arrangement

Therefore, all solutions flowing beyond the boundaries of the region Ω_a , that is, into the region Ω_s , are considered redundant. From the above, it is concluded that the scheme is effective in which a smaller volume of spreading solution is achieved beyond the boundaries of the target region Ω_a , with a larger leaching area in the region Ω_a :

$$\begin{aligned}
 v_{in} &= \iint_{\Omega_a} c \, dx dy \rightarrow \max, \text{ where } c > 0 \\
 v_{out} &= \iint_{\Omega_s} c \, dx dy \rightarrow \min, \text{ where } c > 0
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

The results of the distribution of leaching areas and their percentage to the entire calculation domain are presented in Table 1.

Table 1 – Distribution of leaching zones for the Cases 1-3 (all values are shown in m^2)

	Case 1 (0.5, 0.5)		Case 2 (0.8, 0.2)		Case 3 (0.2, 0.8)	
Computational domain area, [m^2]	40 000					
Target zone area (Ω_a), [m^2]	16 000					
Spreading zone area (Ω_s), [m^2]	24 000					
Total leaching area ($v_{in} + v_{out}$)	24751	62%	25435	64%	24357	61%
Leaching area inside the target zone (v_{in})	10411	26%	10551	26%	10269	26%
Leaching area outside the target zone (v_{out})	14340	36%	14882	37%	14089	35%

As can be seen from Table 1, the leaching area inside the target zone in all three cases are, on average, similar in percentage. However, the spreading zones vary significantly. Consequently, according to condition (17), the effective area is an area in which the spreading zone is smaller, since the leaching zone is practically identical. Such a condition among the considered cases is achieved in Case 3 with the corresponding flow rates of the injection wells.

In addition, the changes in the leaching area were considered depending on the flow rate of the well located in the zones with the corresponding permeability. The results are shown in Table 2.

Table 2 – Area and its change depending on the flow rate of injection wells

Well flow rate	$0,8 q_{prod}$	$0,5 q_{prod}$	$0,2 q_{prod}$
Change of well flow rate in percentage	100% (changing - 0)	62,5% (changing - 37.5%)	25% (changing - 0.75%)
Injection well located in a low permeable area			
Leaching area	14673	13043	11382
Change of area in percentage of the larger one	100% (changing - 0)	88.9% (changing - 11.1%)	77.6% (changing - 22.4%)
Injection well located in a high permeable area			
Leaching area	12852	11707	10759
Change of area in percentage of the larger one	100% (changing - 0)	91.1% (changing - 8.9%)	83.7% (changing - 16.3%)

Conclusion. Based on comparative analyzes of the obtained results, it is concluded that:

- at the same flow rates, regardless of the permeability of the zones, the results obtained show that in the low-permeability zone, the leaching area is larger in comparison with the high-permeability zone (Figure 3). This is physically explained by the fact that the flow velocity in this zone is much lower than the velocity of solutions in the well, which is calculated from the flow rates of the wells;

- with an increase in permeability, the shape of the leaching zone tends from circle-shaped to drop-shaped. This is explained by the fact that in a low permeable zone the influence of the production well on the injection well is negligible, therefore, the pressure field is distributed according to the Dupuit law, which in turn leads to a uniform distribution of the solution along the radius. The impact of this well will only become noticeable when the area of the circle approaches the production well;

- with an increase in the flow rate of wells, the radius of the leaching zone also increases if the flow rate of solutions is much higher than the flow velocity in porous media. The shape of the leaching zone depends not only on the flow rates of the wells, but also on the permeability in the interwell space. Therefore, when choosing the flow rates of injection wells, it is necessary to take into account the ratio between the well flow rates and permeability;

- based on the above mentioned conclusions, it should be noted that the spreading of solutions outside the technological block increases with decreasing permeability.

Acknowledgments. The study was carried out within the framework of a grant financing project “Digital technology for the efficient positioning and management of technological wells for uranium extraction with In-Situ Leaching method” (AP08052470).

REFERENCES

1 Мендығалиев А.А., Вершков А.Ф., Джартыбаев Н.Б. Развитие и восполнение минерально-сырьевой базы урана Казахстана для обеспечения долгосрочных потребностей урановой отрасли Республики Казахстан // Сборник трудов международной научно-практической конференции актуальные проблемы урановой промышленности. – Алматы, 2019. – т. 1. – С. 31-34. [Mendygaliyev A.A., Vershkov A.F., Dzhartybaev N.B. Razvitie i vospolnenie mineral'no-syr'evoy bazy urana Kazahstana dlya obespecheniya dolgosrochnyh potrebnostej uranovoj otrasli Respubliki Kazahstan // Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii aktual'nye problemy uranovoj promyshlennosti. – Almaty, 2019. – t. 1. – P. 31-34.]

2 Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydro-metallurgy. – 2015. – № 157. – С. 306-324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>

3 Kuljabekov A. Analytical and numerical models of chemical leaching with gypsum precipitation in porous media. PhD thesis. – 2014. – 98 с. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02075294>

4 Шаяхметов Н.М., Құрмансейіт М.Б., Айжулов Д.Е. Исследование оптимальности режимов гексагональной схемы вскрытия при добыче минерала методом подземного скважинного выщелачивания // Комплексное использование минерального сырья. – 2019. – №2. – С. 76-82. <http://kims-imio.kz/wp-content/uploads/2019/06/2019-2-9-1.pdf> [Shayahmetov N.M., Kurmanseiit M.B., Aizhulov D.Y. Issledovanie optimal'nosti rezhimov geksagonal'noj skhemy vskrytiya pri dobyche minerala metodom podzemnogo skvazhinnogo vyshchelachivaniya // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya. – 2019. – №2. – P. 76-82.]

5 Никитина Ю.Г., Поезжаев И.П., Мырзабек Г.А., Разуваева Т.В., Алибаева К.А. Совершенствование схем вскрытия геотехнологических полигонов для оптимизации затрат на добычу урана // Вестник КазНУ. – 2017. – № 6 (124). – С. 54-61. <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/issue/view/37/36> [Nikitina Yu.G., Poezzhaev I.P., Myrzabek G.A., Razuvaeva T.V., Alibaeva K.A. Sovershenstvovanie skhem vskrytiya geotekhnologicheskikh poligonov dlya optimizacii zatrat na dobychu urana // Vestnik KazNITU. – 2017. – № 6 (124). – P. 54-61.]

6 Shayakhmetov N.M., Aizhulov D.Y., Alibayeva K.A., Serovajsky S., Panfilov I. Application of hydrochemical simulation model to determination of optimal well pattern for mineral production with In-Situ Leaching // Procedia Computer Science. – 2020. – № 178. – С. 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.11.010>

7 Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носкова С.Н., Гутцул М.В. Применение математического моделирования для решения геотехнологических и экологических задач при добыче урана способом подземного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – С. 361-365. <https://cyberleninka.ru/journal/n/gornyy-informatsionno-analiticheskij-byulleten-nauchno-tehnicheskij-zhurnal?i=1077610> [Noskov M.D., Istomin A.D., Kesler A.G., Noskova S.N., Gutcul M.V. Primenenie matematicheskogo modelirovaniya dlya resheniya geotekhnologicheskikh i ekologicheskikh zadach pri dobyche urana sposobom podzemnogo vyshchelachivaniya // Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'. – 2012. – P. 361-365.]

8 Алибаева К.А. Численное исследование путей повышения выработки месторождения при добыче минералов методом подземного скважинного выщелачивания. Диссертация

PhD. – 2013. – 92 с. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-chislennoe-issledovanie-putey-povysheniya-vyrabotki.pdf> [Alibaeva K.A. Chislennoe issledovanie putej povysheniya vyrabotki mestorozhdeniya pri dobyche mineralov metodom podzemnogo skvazhinnogo vyshchelachivaniya. Dissertaciya PhD. – 2013. – 92 p.]

9 Kurmanseiti M.B., Shayakhmetov N.M., Tungatarova M.S. GPU Accelerated Modeling of In-Situ Leaching Process and Streamline Based Reactive Transport Simulation // Procedia Computer Science. – 2020. – № 178. – С. 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.11.016>

10 Данаев Н.Т., Корсакова Н.К., Пеньковский В.И. Массоперенос в приквважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов. – Алматы: Қазақ университеті, 2005. – 180 с. [Danaev N.T., Korsakova N.K., Pen'kovskij V.I. Massoperenos v priskvazhinnoj zone i elektromagnitnyj karotazh plastov. – Almaty: Qazaq universiteti, 2005. – 180 p.]

Н. М. ШАЯХМЕТОВ², К. А. АЛИБАЕВА^{2,1}, Д. Е. АЙЖУЛОВ¹

¹Сатпаев университеті, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

КЕҢІСТІКТЕГІ ҰҢҒЫМАЛАРДЫҢ ШЫҒЫНЫНЫҢ ТАРАЛУЫНЫҢ ОҢТАЙЛЫЛЫҒЫНА ӘСЕР ЕТЕТІН ФАКТОРЛАРДЫ АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста өлі зоналар мен технологиялық блоктың сыртына ағу зоналарын азайту үшін фильтрация жылдамдығына әсер ететін факторлар қарастырылады және зерттеледі. Жерасты ұңғымалы шаймалау әдісімен өндіру барысында негізгі гидродинамикалық факторлар ретінде өткізгіштіктің қабаттағы таралуы мен ұңғымалардың шығыны қарастырылады. Зерттеу Дарси заңы мен массаның сақталу заңына негізделген математикалық модель арқылы жүргізілді. Өткізгіштіктің сілтісіздендіру ауданына әсерін анықтау үшін есептеу өткізгіштік коэффициентінің изотропты және гетерогенді үлестірімді екі өлшемді аймақта жүргізілді. Өткізгіштік коэффициенті үш зонаға үлестірілді, оңтүстік бөлігінде өткізгіштік төмен, центрде төменнен жоғарыға өзгертін өтпелі, сәйкесінше солтүстік бөлікте жоғары өткізгіштік зона орналасады. Зерттелетін аймақта үш ұңғыма орналастырылды, өндіретін ұңғыма аймақтың центрінде қойылды. Айдау ұңғымалары аймақтың центрі арқылы өтетін горизонталь сызығына симметриялы түрде орналастырылды. Есептеу, ұңғымалардың шығындарының үш режимінде, өндіру ұңғымасының қабылдағыштығына қатысты айдау ұңғымаларының дебиттерінің келесі қатынастарымен: 0.5/0.5, 0.2/0.8, 0.8/0.2 жүргізілді.

Алынған нәтижелердің салыстырмалы талдау негізінде келесі тұжырымдамалар қортылды: зоналардың өткізгіштігіне тәуелсіз ұңғымалардың шығындары бірдей болған жағдайда, нәтижелер, жоғары өткізгіштікті зонамен салыстырғанда, өткізгіштігі төмен зонада шаймалау аймағының ауданы үлкен екені көрсетілді; өткізгіштіктің өсуімен шамалау зонасының формасы дөңселектен тамшы формалы түрге ұмтылады; ертінділерді енгізу жылдамдығы фильтрация жылдамдығынан әлде қайда үлкен болған жағдайда, ұңғыманың дебиты өскен сайын шаймалау зонасының радиусы өседі.

Түйін сөздер: жерасты ұңғымалы шаймалау, математикалық модельдеу, гидродинамика, ұңғыма шығыны, фильтрация

Н. М. ШАЯХМЕТОВ², К. А. АЛИБАЕВА^{2,1}, Д. Е. АЙЖУЛОВ¹

¹Сатпаев университет, Алматы Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОПТИМАЛЬНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ СКВАЖИН В ПРОСТРАНСТВЕ

В данной работе рассматриваются и исследуются факторы, влияющие на скорость фильтрации для уменьшения застойных зон и растекания за пределы технологического блока. Основными гидродинамическими факторами при добыче методом подземного скважинного выщелачивания являются распределение проницаемости в пласте и расходов на скважинах. Исследование факторов проводилось на основе математических моделей, использующих законы Дарси и сохранения массы. Вычисление проводилось на двумерной области с изотропным и неоднородным распределением проницаемости для определения влияния проницаемости на площадь выщелачивания. Коэффициент проницаемости был распределен по трем зонам, в южной части проницаемость была низкой, в центральной переходной – от низкой к высокой соответственно, на северной части была расположена высокопроницаемая зона. В исследуемой области были расположены три скважины, при этом добывающая скважина находилась в центре области. Закачивающие скважины расположены симметрично относительно горизонтальной линии, проходящей через центр рассматриваемой области. Вычисление проводилось для трех режимов расходов скважин с соотношением дебитов закачивающих скважин 0.5/0.5, 0.2/0.8, 0.8/0.2 относительно от приемистости добывающей скважины.

На основе сравнительных анализов полученных результатов можно сделать вывод: при одинаковых расходах, вне зависимости от проницаемости зон, полученные результаты показывают, что в низкопроницаемой зоне площадь выщелачивания больше в сравнении с высокопроницаемой областью; с увеличением проницаемости форма зоны выщелачивания стремится от круглой к каплевидной; при увеличении дебита скважин в радиус зоны выщелачивания увеличивается, если скорость подачи растворов значительно больше скорости фильтрации.

Ключевые слова: подземное скважинное выщелачивание, математическое моделирование, гидродинамика, расход скважин, теория фильтрации.

УДК 636. 085. 549.67

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.131>

С. Т. ЖИЕНБАЕВА^{1*}, Ж. С. АЛИМКУЛОВ², Т. ЖОЛАШЕВА³

^{1,3}*«Алматы технологиялық университеті» АҚ*

²*Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты ЖШС*

ҚОНАҚЖҮГЕРІНІ ҚОЛДАНЫП ҚҰСҚА АРНАЛҒАН ҚҰРАМА ЖЕМНІҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖАСАУ

Мақалада қонақжүгеріні жұмыртқалайтын тауықтарға арналған құрама жем өндірісінде қолдану нәтижелері берілген. Қонақжүгері құрамындағы сіңімділігі нашар заттары туралы әдебиет деректеріне сараптама жасалған. Қонақжүгеріні құсқа арналған ақуызды-дәруменді қосымша өндірісінде қолдану үшін оның физикалық-технологиялық қасиеттері мен химиялық құрамы зерттелінді. Өнген жүгері мен мақсары шроты енгізілген жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымшаның рецепі жасалынды.

***Түйін сөздер:** қонақжүгері, химиялық құрам, жұмыртқалайтын тауықтарға арналған құрама жем.*

Кіріспе. Астық себу алаңын жоспарлау Қазақстан Республикасы ауыл шаруашылығының дамуында стратегиялық маңызы бар мәселе.

ҚР АШМ ауылшаруашылығы басқармасының мәліметі бойынша 2012 жылы бидай өсіру аймағын 300 мың гектарға азайту жоспарланған. Бидайды өсіру алаңының қысқаруына байланысты жемдік, көкөністік, майлы, жармалы және тағы басқа дақылдарды өсіру қарастырылған [1].

Құрама жем өндірісіндегі преспективті құрауышқа дәндік қонақжүгері жатады. Ол құрама жем өндірісіндегі энергетикалық құндылығы жоғары дәнді дақылға жатады және бұл көрсеткіші бойынша жүгеріден кем түспейді. Қонақжүгеріні еттік балапанға арналған құрама жемге 40% дейін, жұмыртқалайтын тауыққа – 30%, күйісті ірі қараға –16%-ға дейін бидай мен жүгерінің орнына енгізуге болатындығы дәлелденген. Сонымен қатар қонақжүгері енгізілген құрама жем өнімнің жоғары сапасын қамтамасыз етеді.

Дәндік қонақжүгерінің басқа дәнді дақылдарға қарағанда ерекшелігі – оның құрғақшылыққа төзімділігі.

Оренбургте (Ресей Федерациясы) дәндік қонақжүгерінің Орион гибридін негізінен оңтүстік аудандарда себеді. Солтүстік-Шығыс аудандарында Камышенское

* E-mail корреспондирующего автора: sauleturgan@mail.ru

75 сұрыпын егеді. Алайда қонақжүгерінің бұл сұрыпы қоректілігі нашар заттар – таниндерді – 1,0-3,0% және цианогенді гликозидтерді – 0,11- 0,14% сақтайды [2].

Кениялық ғалымдар танинді жоғары сақтайтын 2,5% қонақжүгеріні сода ерітіндісімен өңдейді. Содамен өңделген қонақжүгеріні еттік балапандарға азықтандырып азықтың қоректік заттарының қолданылуы мен сіңімділігін анықтаған. Бұндай өңдеудің тәжірибе тобындағы еттік балапандардың азот пен алмасу қуатын қолдануын жоғарылатқаны белгілі болды [3,8,9].

Ресей ғалымдарының еңбегінде монодәндік қонақжүгеріні рационандағы (50–60%) таниннің кері әсерін лизин аминқышқылын (80 %) және метионинді 1 тоннасына 0,8 кг, 1 тонна құрама жемге 1-2 кг холин мен ферменттік препараттарды қосу арқылы сынады[4].

Зерттеудің нысаны мен әдістері. Зерттеу нысаны – Қазақ топырақтану институтынан алынған қонақжүгерінің «КизИнд» сұрыбы, «Шымкентмай» АҚ алынған мақсары шроты, жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымша.

Зерттеу әдістері: ылғалдылықты анықтау МемСТ 13496.3-92; шикі протеин мөлшері МемСТ 13496.4-93; шикі май мөлшері МемСТ 13496.15-97; шикі клетчатка мөлшері МемСТ 13496.2-91 бойынша анықталды.

Нәтижелер және оны талдау. 1-кестеде қонақжүгері дәніндегі сіңімділігі нашар заттардың мөлшері берілген[5].

Кесте 1 – Дақылдардағы сіңімділігі нашар заттардың мөлшері

№№	Дақылдар	Сіңімділігі нашар заттардың түрлері	Сіңімділігі нашар заттардың мөлшері
1	Қонақжүгері	Таниндер	2,94
2	Қытайбұршақ	Трипсин ингибиторы	6,0
3	Сыржоңышқа	Синиль қышқылы	6,50

1-кесте нәтижесі қонақжүгері құрамындағы сіңімділігі нашар заттардың сақталуы қытайбұршақ пен сыржоңышқаға қарағанда сіңімділігі нашар заттарды 2 есе аз сақтайтынын көрсетті, алайда қонақжүгеріні құрама жем өндірісінде тиімді қолданудың жаңа технологиялық әдістерін қолдану қажет.

Жүргізілген зерттеулер жемдік қонақжүгеріні еттік балапандарға арналған толықрационды құрама жемге – 40% дейін, жұмыртқалайтын тауықтарға – 30% дейін жүгері мен бидаймен алмастыруға болатынын көрсетеді [6].

Қонақжүгеріні құстарға арналған құрама жемге қосу сапасы жоғары құс өнімін алуға ықпал етеді.

Қонақжүгеріні құсқа арналған ақуызды-дәруменді қосымша өндірісінде қолдану үшін оның физикалық-технологиялық қасиеттері мен химиялық құрамы зерттелінді.

АДМҚ дәстүрлі емес құрауыштарының физикалық-технологиялық қасиеттері анықталды (2-кесте).

Кесте 2 – АДМҚ құрауыштарының физикалық-технологиялық қасиеттері

Ылғалдылығы, %	Қонақжүгері	Мақсары шроты
Ылғалдылығы, %	10,8	7,7
Көлемдік салмағы, г/л	745	642,5
Табиғи құлама бұрышы, град.	33	43
Ірілігі, мм	2,12	1,88

АДМҚ құрауыштарының физикалық-технологиялық қасиеттерін сараптау нәтижесі мақсары шроты, қонақжүгерінің көлемдік салмағы, ылғалдылығы көрсеткіштерінің құрама жем құрауыштарына қойылатын талаптарға сай келетінін, ал мақсары шротының табиғи құлама бұрышы қонақжүгеріге қарағанда жоғары, бұл мақсары шротының сусымалдығы нашар құрауышқа жататынын көрсетеді.

Қонақжүгерінің сіңімділігін жақсарту үшін оны өсіру қарастырылды.

Жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымша рецебиндегі жүгеріні өнген қонақжүгерімен алмастыру үшін өнген қонақжүгері мен жүгерінің, күнбағыс шроты мен мақсары шротының химиялық құрамы салыстырылды (3-кесте).

Күнбағыс шроты мен асбұршақтың химиялық құрамы анықтама кітабынан алынды [7].

Кесте 3 – Асбұршақ пен өнген қонақжүгерінің салыстырмалы химиялық құрамы

Химиялық көрсеткіштер	Шикізаттар			
	Асбұршақ	Өнген қонақжүгері	Күнбағыс шроты	Мақсары шроты
Ылғалдылығы, %	13,0	10,8	11,0	11,7
Протеин, %	21,30	17,85	32,0	30,6
Май, %	1,5	2,68	1,8	2,2
Клетчатка, %	5,8	1,04	19,0	19,4
Күл, %	3,10	1,79	7,5	6,7
АЭЗ, %	55,30	65,84	29,7	33,4
Алмасу қуаты, ккал	247,0	297,5	306,67	311,7
Са, %	0,13	0,29	0,36	0,4
Р, %	0,38	1,43	0,65	0,7
Лизин, %	1,53	0,30	1,07	0,5
Метионин + Цистин, %	0,47	0,28	1,30	0,6

3-кесте нәтижесі өнген қонақжүгерінің құрамындағы протеин мөлшері асбұршақтан 16,2% төмен болса да, май мөлшері 3,73 есе жоғары, клетчатка мөлшері 5,57 есе төмен, кальций мөлшері 2,23 есе, фосфор 3,7 есе көп сақтайтыны көрінеді. Мақсары шротының құрамында протеин мөлшері аз сақталғанмен, алмасу қуатының

мөлшері жоғары, сондай-ақ минералды заттар: кальций, фосфор мөлшері бірдей болғанымен, ауыстырылмайтын аминқышқылдарының мөлшері төмен екендігін көрсетті.

Шикізаттардың химиялық құрамын басшылыққа ала отырып өнген жүгері мен мақсары шроты енгізілген жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымшаның рецепі есептелді (4-кесте).

Кесте 4 – Дәстүрлі емес шикізаттар енгізілген жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымшаның рецепі

Көрсеткіштер	Ақуызды-дәруменді қосымшаның рецепі бақылау	Ақуызды-дәруменді қосымшаның тәжірибе рецептері	
		50% алмастырылған	100% алмастырылған
Асбұршақ	10,7	5,35	-
Өнген қонақжүгері	-	5,35	10,7
Кебек	10,0	10,0	10,0
Күнбағыс күнжарасы	24,0	12,0	-
Мақсары шроты	-	12,0	24,0
Еттісүйек ұны	12,0	12,0	12,0
Жемдік ашытқы	12,0	12,0	12,0
Балық ұны	10,0	10,0	10,0
Бор	6,0	6,0	6,0
Тұз	1,3	1,3	1,3
Сүйек ұны	6,0	6,0	6,0
Шөп ұны	8,0	8,0	8,0
Барлығы, %	100,0	100,0	100,0
100г АВҚ-дағы алмасу қуаты, ккал	204,28	215,82	227,36
Шикі протеин, %	32,65	32,19	31,94

4-кесте нәтижелері өнген қонақжүгеріні 100% асбұршақпен алмастырғанда, ал мақсары шротын 100% күнбағыс күнжарасымен алмастырғанда алмасу қуатының мөлшері бақылау рецепімен салыстырғанда жоғарылады, ал шикі протеин мөлшері де бақылау рецепімен салыстырғанда 1,4%-ға төмендеді, алайда стандарт талабына сай келді, ал ақуызды-дәруменді концентраттың сапасына қойылатын талаптарға сәйкес шикі протеин мөлшері ақуызды-дәруменді қосымшада 30% төмен болмауы керек[8,9].

Зерттеу нәтижелері бойынша жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымша рецепінде өнген қонақжүгеріні 100 % асбұршақпен, ал күнбағыс күнжарасын 100 % мақсары шротымен алмастыруға болатынын көрсетті. Бұл деректер дәстүрлі емес құрауыштар – өнген қонақжүгері, мақсары шротын ақуызды-дәруменді қосымша өндірісінде кең қолданып, бір жағынан ақуызды құрауыштардың

тапшылығын жойып, екінші жағынан құрама жемнің шикізат қорын молайтуға ықпал етеді.

Қорытынды. Құрама жемнің шикізат қорын кеңейту мақсатында жергілікті дәстүрлі емес шикізаттар – қонақжүгері, мақсары шротының химиялық құрамы мен физикалық-технологиялық қасиеттері анықталды. Өнген қонақжүгері, мақсары шротын енгізілген жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді – минералды қосымшаның рецептері жасалынды. Зерттеу нәтижелері жұмыртқалайтын тауықтарға арналған ақуызды-дәруменді қосымша рецебінде өнген қонақжүгеріні 100 % асбұршақпен, ал күнбағыс күнжарасын 100% мақсары шротымен алмастыруға болатынын көрсетті.

ЛИТЕРАТУРА

1 Каскарбаев Ж.А. Масличные культуры и нулевая технология возделывания в Северном Казахстане// Международная научно-практическая конференция « Диверсификация культур и нулевые технологии в засушливых регионах», Астана, 2013- С.109-117.

2 Кононенко С.И. Замена кукурузы зерном сорго в комбикормах для цыплятбройлеров / С.И. Кононенко, И.С. Кононенко // Известия Горского государственного аграрного университета. – 2011. – Т. 48. – Ч. 2. – С. 71–73.

3 Асташов А.Н. Сорго как компонент комбикорма для цыплят-бройлеров /А.Н.Асташов, С.И. Кононенко, И.С. Кононенко // Кукуруза и сорго. – 2009. – № 5. – С. 13–14.

4 Фицев А.И. Нетрадиционные зерновые культуры в кормлении цыплят-бройлеров / А.И. Фицев, А.П. Гаганов // Хранение и переработка зерна.–2008.–№12.–с. 66-67.

5 Афанасьев, В. Специальная обработка зерна и комбикормов [Текст] / В. Афанасьев, А. Орлов // Комбикорма. – 1999. – № 7. – С.

6 М.П. Кирилов, Е.А. Махаев, Н.Г. Первов, В.В. Пузанова, А.С. Аникин. Методика расчета обменной энергии в кормах на основе содержания сырых питательных веществ (для крупного рогатого скота, овец и свиней). Дубровицы , 2008. – 37с.

REFERENCES

1 Kaskarbaev ZH.A. Maslichnye kul'tury i nulevaya tekhnologiya vozdeleyvaniya v Severnom Kazahstane// Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya « Diversifikaciya kul'tur i nulevye tekhnologii v zasushlivykh regionah», Astana, 2013- S.109-117.

2 Kononenko S.I. Zamena kukuruzy zernom sorgo v kombikormah dlya cyplyatbrojlerov / S.I. Kononenko, I.S. Kononenko // Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – Т. 48. – Ч. 2. – С. 71–73.

3 Astashov A.N. Sorgo kak komponent kombikorma dlya cyplyat-brojlerov /A.N.Astashov, S.I. Kononenko, I.S. Kononenko // Kukuруза i sorgo. – 2009. – № 5. – С. 13–14.

4 Ficev A.I. Netradicionnye zernovye kul'tury v kormlenii cyplyat-brojlerov / A.I. Ficev, A.P. Gaganov // Hranenie i pererabotka zerna.–2008.–№12.–с. 66-67.

5 Afanas'ev, V. Special'naya obrabotka zerna i kombikormov [Tekst] / V. Afanas'ev, A. Orlov // Kombikorma. – 1999. – № 7. – С.

6 М.Р. Kirilov, E.A. Mahaev, N.G. Pervov, V.V. Puzanova, A.S. Anikin. Metodika rascheta obmennoj energii v kormah na osnove sodержaniya syryh pitatel'nyh veshchestv (dlya krupnogo rogotogo skota, ovec i svinej. Dubrovicy , 2008. – 37s.

С. Т. ЖИЕНБАЕВА¹, Ж. С. АЛИМКУЛОВ², Т. ЖОЛАШЕВА³

^{1,3} АО Алматинский технологический университет

²ТОО Казахской научно-исследовательский институт перерабатывающей
и пищевой промышленности

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОМБИКОРМОВ ДЛЯ ПТИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОРГО

В статье приведены результаты исследований по использованию зерна сорго для кур-несушек. Проведена экспертиза литературных данных о веществах с плохой усвояемостью в составе сорго. Изучены физико-технологические свойства и химический состав нетрадиционных компонентов-зернового сорго и сафлорового шрота. Разработаны рецепты белково-витаминных добавок для кур-несушек с использованием пророщенного сорго и сафлорового шрота.

Ключевые слова: сорго, химический состав, рецепт, комбикорм для кур-несушек.

C. T. ZHIENBAYEVA¹, ZH. S. ALIMKULOV², T. ZHOLASHEVA³

^{1,3} JSC Almaty Technological University

² LLP of the Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry

DEVELOPMENT OF MIXED FEED TECHNOLOGY FOR POULTRY USING SORGHUM

The article presents the results of research on the use of sorghum grain for laying hens. An examination of the literature data on substances with poor digestibility in the composition of sorghum has been carried out. The physical and technological properties and chemical composition of unconventional components - grain sorghum and safflower meal - have been studied. Recipes of protein and vitamin supplements for laying hens using sprouted sorghum and safflower meal have been developed.

Keywords: sorghum, chemical composition, compound feed for laying hens

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Абылаева А. М. – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Фундаментальной математики Евразийского национального университета им.Л.Н.Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан
2. Айжулов Д. Е. – научный сотрудник, Казахский национальный университет им.аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
3. Алибаева К. А. – PhD доктор, ст.преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан
4. Алимкулов Ж. С. – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией зернопродуктов и комбикормов ТОО Казахского научно-исследовательского Института перерабатывающей и пищевой промышленности, г.Алматы, Казахстан
5. Амиргалиев Б. Е. – кандидат технических наук, профессор, Astana IT University, г.Нур-Султан
6. Амиргалиева Ж. – Институт информационных и вычислительных технологий, г.Алматы, Казахстан
7. Апаев К. С. – ведущий разработчик, Восточно-Казахстанский университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан
8. Ахмед-Заки Д. Ж. – профессор, ректор Astana IT University, г. Нур-Султан, Казахстан
9. Ахметов С. М. – доктор технических наук, профессор ВАК, академик Национальной инженерной академии РК, профессор Казахского агротехнического университета имени С. Сейфуллина, руководитель Казахстанского отделения по г. Нур-Султан Международной научной школы устойчивого развития им. акад. П.Г. Кузнецова
10. Ахметова Б. И. – PhD докторант, менеджер отдела ПИОНТИ, Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, г.Алматы, Казахстан

11. Байарыстанов А. О. – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Высшей математики, Евразийского национального университета им.Л.Н.Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан
12. Байбурин Е. М. – научный сотрудник, Восточно-Казахстанский университет имени С.Аманжолова, г.Усть-Каменогорск, Казахстан
13. Болатова А. Б. – кандидат технических наук, старший преподаватель Казахского агротехнического университета имени С. Сейфуллина, г.Нур-Султан, Казахстан
14. Бурибаев Ж. А. – Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан
15. Гойхман В. Ю. – кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникационных систем федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Генеральный директор ООО «НТЦ СОТСБИ», г. Санкт-Петербург, Россия
16. Головачева В. Н. – д.п.н., доцент кафедры информационно-вычислительных систем, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан
17. Дарибаев Б. С. – и.о. заведующего кафедры Информатики, PhD доктор, и.о. доцента, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет информационных технологий, г.Алматы, Казахстан
18. Даулетия Д. – Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
19. Дждолдасбаев С. К. – Институт информационных и вычислительных технологий, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
20. Дитмар Б. – доктор естественных наук, профессор, Университет прикладных наук, г.Шмалькальден, Германия

21. Долженко А. А. – кандидат политических наук, доцент, преподаватель теоретической подготовки, пилот, Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан
22. Егембердиева Г. Қ. – магистр, сеньор-лектор, Astana IT University, г.Нур-Султан
23. Есмагамбетов Б.-Б. С. – д.т.н., профессор Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
24. Жасұзақ М. С. – Институт информационных и вычислительных технологий, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
25. Жиенбаева С. Т. – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств» АО Алматинского технологического университета, г. Алматы, Казахстан
26. Жолашева Т. Ж. – магистрант 2 курса АО Алматинского технологического университета, г. Алматы, Казахстан
27. Жумагулов Б. Т. – Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г.Алматы, Казахстан
28. Жакебаев Д. Б. – профессор, PhD доктор, Национальная инженерная академия Республики Казахстан, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
29. Жумали А. С. – Национальная инженерная академия Республики Казахстан, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан
30. Сатенова Б. А. – Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан
31. Жумадилаева А. К. – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, замдекана по науке факультета Информационных технологий Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан
32. Жұманова М. И. – магистрант, механико-математический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
33. Журсинбек Е. Ш. – бакалавр информационных технологий, магистрант по специальности «Информационная безопасность» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, дедуший специалист Департамента ИИС ЦОН, АО «НИТ», г.Нур-Султан, Казахстан

34. Икласова Ж. У. – д.т.н., доцент нефтегазового факультета Атырауского университета нефти и газа им. С. Утебаева, г. Атырау, Казахстан
35. Иксанов С. Ш. – докторант, кафедра искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
36. Искаков М. – к.т.н., доцент кафедры информационно-вычислительных систем, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан
37. Казиева А. Б. – магистр техники, старший преподаватель факультета Информационных технологий Атырауского университета нефти и газа им. С. Утебаева, г. Атырау, Казахстан
38. Картбаев Т. С. – PhD, ассоциированный профессор, Академия логистики и транспорта, г. Алматы, Казахстан
39. Курмансеит М. Б. – научный сотрудник, Сатпаев университет, г. Алматы, Казахстан
40. Лаврова А. Р. – магистр кафедры инфокоммуникационных систем федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», инженер внедрения и сопровождения платформ DPI/PCRF ООО «НТЦ Протей», г. Санкт-Петербург, Россия
41. Лахно В. А. – д.т.н., профессор, Национальный университет биоресурсов и природопользования, г. Киев, Украина
42. Майлянова Е. – инженер-метеоролог, преподаватель теоретической подготовки, Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан
43. Малюков В. П. – д.т.н., профессор, Национальный университет биоресурсов и природопользования, г. Киев, Украина
44. Мансурова М. Е. – профессор, заведующая кафедрой искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

-
45. Муханбет А. А. – магистр, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, кафедра Информатики, г. Алматы, Казахстан
46. Нугуманова А. Б. – ведущий научный сотрудник, Восточно-Казахстанский университет имени С.Аманжолова, г.Усть-Каменогорск, Казахстан
47. Нурахов Е. С. – докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, кафедра Информатики, г. Алматы, Казахстан
48. Оразбаев Б. Б. – д.т.н., профессор, академик НИА РК, профессор кафедры Системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан
49. Оразбаев К. Н. – д.т.н., профессор кафедры Менеджмента Казахского университета экономики, финансов и международной торговли, г. Нур-Султан, Казахстан
50. Пановко Г. Я. – зав. лабораторией, доктор технических наук, профессор, руководитель филиала кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э.Баумана в ИМАШ РАН, г. Москва, Россия
51. Понькина Е. В. – доцент, зав. кафедрой теоретической кибернетики и прикладной математики, Алтайский государственный университет, г.Барнаул, Россия
52. Рыбачук Ю. М. – к.т.н., ст. преподаватель должность кафедры водоснабжения и водоотведения Харьковского национального университета городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, г. Харьков, Украина
53. Сеилов Ш. Ж. – к.т.н., декан факультета информационных технологий, профессор кафедры «Информационная безопасность» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан
54. Сейлбеков Б. Н. – докторант, Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан
55. Сулеймбекова А.О. – докторант, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан

56. Тунгатарова М. С. – PhD доктор, старший преподаватель, механико-математический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
57. Тлебалдинова А. С. – ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский университет имени С.Аманжолова, г.Усть-Каменогорск, Казахстан
58. Танирбергенова А. А. – докторант кафедры Системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан
59. Тогжанова К. О. – старший преподаватель, Академия логистики и транспорта, г. Алматы, Казахстан
60. Томилов А. Н. – PhD доктор, старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан
61. Томилова Н. И. – к.т.н., доцент кафедры информационно-вычислительных систем, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан
62. Тулешов А. К. – д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН РК, академик НИА РК и МИА, генеральный директор Институт механики и машиноведения им. академика У. А. Джолдасбекова Комитета науки МОН РК, г. Алматы, Казахстан
63. Тунгатарова М. С. – PhD, Dr. Eng., Сатпаев университет, г. Алматы, Казахстан
64. Турегали А. С. – Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
65. Усербаев М. Т. – к.т.н., заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование» Казахского агротехнического университета имени С. Сейфуллина, г.Нур-Султан, Казахстан
66. Ускенбаева Р. К. – доктор технических наук, профессор, Satbayev University, г. Алматы, Казахстан
67. Шайхова Г. Н. – PhD доктор, ассоциированный профессор кафедры «Общая и теоретическая физика», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан
68. Шаяхметов Н.М. – научный сотрудник, Казахский национальный университет им.аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Жумагулов Б.</i> 30 лет Независимости Казахстана и роль НИА РК в формировании и реализации научно-технологической политики страны	5
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕХАНИКА

<i>Ахметов С. М., Усербаев М.Т., Болатова А.Б., Икласова Ж.У.</i> Математическая модель напряженно – деформированного состояния стержня с неоднородной слоистой структурой	14
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Искаков М., Томилов А. Н.</i> Формализация задачи анализа стационарных режимов сложных теплоснабжающих систем	23
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Тулешов А. К., Пановко Г. Я., Ахметова Б. И.</i> Влияние исходного размера на выстой штампа кривошипного пресса	32
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Амиргалиев Б. Е., Егембердиева Г. Қ.</i> Исследование и анализ сервиса каршеринга	40
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Бурибаев Ж. А., Амиргалиева Ж., Джолдасбаев С. К., Жасұзақ М. С., Турегал А. С., Даулетия Д.</i> Распознавание зрелости плодов томата с использованием машинного обучения YOLO 5	49
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Есмагамбетов Б.-Б. С.</i> Формирование служебной информации в телеметрических системах со сжатием данных	61
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Долженко Н., Майлянова Е.</i> Программное обеспечение авиационных тренажеров, типовые функции и перспективы его развития	72
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Лахно В. А., Малюков В. П., Ускенбаева Р. К., Картбаев Т. С., Тогжанова К. О., Дитмар Байер.</i> Оценка рисков потери инвестиций, направленных на развитие систем SMART CITY	77
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Муханбет А. А., Нурахов Е. С., Дарибаев Б. С.</i> Реализация алгоритма распознавания чисел, построенного с помощью нейронной сети, на панели BASYS3 FPGA	86
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Нугуманова А. Б., Ахмед-Заки Д. Ж., Байбурун Е. М., Анаев К. С.</i> Сентимент-анализ отзывов пользователей в фейсбуке: сравнение библиотек TEXTBLOB и DOSTOEVSKY	97
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Шингисов Д. С., Гойхман В. Ю., Лаврова А. Р., Сеилов Ш. Ж., Журсинбек Е.Ш.</i> Об устойчивости распределений характеристик трафика WhatsApp	105
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

<i>Абылаева А. М., Сейлбеков Б. Н., Байарыстанов А. О.</i> Компактность одного класса оператора дробного интегрирования с переменным верхним пределом	117
<i>Жумагулов Б. Т., Жакебаев Д. Б., Жумали А. С., Сатенова Б. А.</i> LBM-моделирование динамики твердой частицы в вязкой среде	128
<i>Жуманова М. И.</i> , Исследование миграции радиоактивных элементов в глинистых слоях при захоронении радиоактивных отходов ..	138
<i>Құрмансейіт М. Б., Тунгатарова М. С.</i> Влияние гравитационных эффектов на извлечение урана при добыче методом подземного выщелачивания	148
<i>Оразбаев Б. Б., Жумадилаева А. К., Танирбергенова А. А., Оразбаева К. Н., Казиева А. Б.</i> Задача принятия решений по управлению процессом гидроочистки установки каталитического риформинга в нечеткой среде и разработка метода ее решения	158
<i>Сулеймбекова А. О.</i> О существовании резольвенты и разделимости одного класса дифференциальных операторов третьего порядка	168
<i>Глебалдинова А. С., Понькина Е. В., Мансурова Е. М., Иксанов С. Ш.</i> Использование спутниковых снимков для оценки состояния пахотных полей на примере Восточно-Казахстанской области	179
<i>Томилова Н. И., Рыбачук Ю. М., Головачева В. Н.</i> Цифровое моделирование стационарных режимов систем теплоснабжения на базе инверсных характеристик	187
<i>Шайхова Г. Н., Рахимжанов Б. К.</i> Решения типа бегущей волны для расширенного модифицированного уравнения КОРТЕВЕГА-ДЕ ФРИЗА	197
<i>Шаяхметов Н. М., Алибаева К. А., Айжулов Д. Е.</i> Исследование факторов, влияющих на оптимальность распределения расходов скважин в пространстве	204

АГРОПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Жиенбаева С. Т., Алимкулов Ж. С., Жолашева Т.</i> Разработка технологии комбикормов для птицы с применением сорго	215
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	221
----------------------------------	-----

CONTENTS

<i>Zhumagulov B.</i> 30 years of Independence of Kazakhstan and the role of NEA RK in the formation and implementation of science and technology policy of the country	5
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

ENGINEERING MECHANICS

<i>Akhmetov S. M., Userbayev M. T., Iklasova Zh. U., Bolatova A. B.</i> Mathematical model of the stress-strain state of a rod with an inhomogeneous layered structure.....	14
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Iskakov M., Tomilov A. N.</i> Formalization of the problem of analysis of stationary modes of complex heat supply systems	23
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Tuleshov A. K., Panovko G. Ya., Akhmetova B. I.</i> The effect of the initial size on the dwell of the crank press die	32
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

INFORMATION TECHNOLOGY

<i>Amirgaliyev B. Ye., Yegemberdiyeva G. K.</i> Research and analysis of carsharing service	40
---------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Buribayev Zh. A., Amirgaliyeva Zh., Joldasbayev S. K., Zhassuzak M. S., Turegali A. S., Dauletiya D. D.</i> Tomato maturity recognition using yolov5 machine learning.....	49
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Yesmagambetov B.-B. S.</i> Formation of service information in telemetry systems with data compression	61
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Dolzhenko N., Mailyanova E.</i> Aviation simulator software, typical functions and its development prospects	72
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Lakhno V. A., Malyukov V. P., Uskenbayeva R. K., Kartbayev T. S., Togzhanova K. O., Dietmar Bayer.</i> Assessment of the risks of losing investments aimed at the development of smart city systems.....	77
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Mukhanbet A. A., Nurakhov E. S., Daribayev B. S.</i> Implementation of a number recognition algorithm built using a neural network on the BASYS3 FPGA panel	86
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Nugumanova A. B., Akhmed-Zaki D. Zh., Bayburin E. M., Apaev K. S.</i> Sentiment analysis of users reviews in facebook: COMPARISON OF TEXTBLOB and DOSTOEVSKY libraries	97
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Shingissov D., Goikhman V., Lavrova A., Seilov Sh., Zhursinbek Ye.</i> On Stability of Distributions of WhatsApp Traffic Characteristics	105
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

APPLIED MATHEMATICS

<i>Abylayeva A. M., Seilbekov B. N., Baiarystanov A. O.</i> Compactness of one class of fractional integrating operator with variable upper limit	117
<i>Zhumagulov B. T., Zhakebayev D. B., Zhumali A. S., Satenova B. A.</i> LBM modeling of solid particle dynamics in a viscous medium	128
<i>Zhumanova M. I.</i> , Study of migration of radioactive elements in clay layers during the burial of radioactive waste	138
<i>Kurmanseit M. B., Tungatarova M. S.</i> Influence of gravity effect to the recovery rate at uranium in-situ leaching	148
<i>Orazbayev B., Zhumadillayeva A., Tanirbergenova A., Orazbayeva K., Kazieva A.</i> Problem of decision-making on control of the process of hydraulic treatment of a catalytic reforming plant in a fuzzy medium and development of a method for its solution	158
<i>Suleimbekova A. O.</i> On the existence of the resolvent and separability of a class of the third-order differential operators	168
<i>Tlebaldinova A. S., Ponkina Ye. V., Mansurova M. Ye., Ixanov S. Sh.</i> Using satellite images to assess the state of arable fields on the example of the East Kazakhstan region	179
<i>Tomilova N. I., Rybachuk Yu. M., Golovachyova. V. N.</i> Digital models of steady modes of heat supply systems based on inverse characteristics	187
<i>Shaikhova G. N., Rakhimzhanov B. K.</i> Traveling wave solutions for the extended modified KORTEWEG-DE VRIES equation	197
<i>Shayakhmetov N. M., Alibayeva K. A., Aizhulov D. Y.</i> Identification and research of factors affecting the optimal distribution of well flow rates in space.	204

AGROINDUSTRY

<i>Zhienbayeva C. T., Alimkulov ZH. S., Zholasheva T.</i> Development of technology for poultry compound feed using sorghum	215
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

THE INFORMATION ABOUT AUTHORS	221
--------------------------------------------	-----

Редактор *М. Ахметова*
Верстка на компьютере *Е.В. Огурцовой*

Адрес редакции:
Национальная инженерная академия РК
050010, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 80
Тел. 8(727)-2915290

Подписано в печать 12.11.2021 г.
Гарнитура Таймс. Формат 70x100 $\frac{1}{16}$.
Уч.-изд. л. 10,8. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии ТОО «Luxe Media Publishing»