

ISSN-1682-0533

Научно-Техническое Общество «КАХАК»

ИЗВЕСТИЯ

Научно-Технического Общества «КАХАК»

2025, № 1-2(83)

Алматы, 2025

ИЗВЕСТИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА «КАХАК»

Алматы, 2025 г., № 1-2 (83)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Мун Г.А. – доктор химических наук, профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бияшев Р.Г. – доктор технических наук, профессор; **Календарь Р.Н.** – кандидат биологических наук, профессор; **Калтаев А. Ж.** – доктор физико-математических наук, профессор; **Мукашев Б.Н.** – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК; **Огай В.Б.** – кандидат биологических наук; **Пак И.Т.** – заслуженный деятель науки и техники РК, доктор технических наук, профессор; **Цой О.Г.** – доктор медицинских наук, профессор; **KimByung-Soo** – PhD, профессор (Сеул, Республика Корея); **ParkKinam** – PhD, профессор (Уэст Лафайетт, США); **Ю В.К.** – доктор химических наук, профессор, *заместитель главного редактора*; **Югай О.К.** – кандидат химических наук, ассоциированный профессор, *ответственный секретарь*

EDITOR-IN-CHIEF

Mun G.A. – Doctor of Chemical Sciences, professor

THE EDITORIAL BOARD:

Biyashev R.G. – Doctor of Technical Sciences, professor; **Kalendar R.N.** – Candidate of Biological Sciences, professor; **Kaltayev A.** – Doctor of Physico-mathematical Sciences, professor; **Mukashev B.N.** – Doctor of Physico-mathematical Sciences, professor, NAS RK academician; **Ogay V.B.** – Candidate of Biological Sciences; **Pak I.T.** – Honored Worker of Science and Technology of Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, professor; **Tsoy O.G.** – Doctor of Medical Sciences, professor; **Kim Byung-Soo** – PhD (Seoul, Republic of Korea); **Park Kinam** – PhD, professor (West Lafayette, USA); **Yu V.K.** – Doctor of Chemical Sciences, professor, *Deputy Chief Editor*; **Yugay O.K.** – Candidate of Chemical Sciences, associate professor, *Managing Editor*

Учредитель: Научно-техническое общество «КАХАК»

Издается с 1998 г.

Выходит 4 раза в год.

Свидетельство о регистрации издания № 1561-ж от 3 ноября 2000 г.

Выдано Министерством культуры, информатики и общественного согласия
Республики Казахстан

Подписной индекс: 74838

Подписку можно оформить в отделениях связи АО «Казпочта».

Подписка продолжается в течение года.

Адрес редколлегии и редакции:

050010, г. Алматы, ул. Курмангазы, 40 (Дом Дружбы), офис 34
телефон 8(727)-272-79-02, 8(727)-291-60-69

e-mail: izv.ntokaxak@mail.ru

Сайт: www.ntokaxak.kz

ISSN-1682-0533

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

МРНТИ 49.01.85; 76.13.21
УДК 541.64; 615.453; 615.262

МУКОАДГЕЗИВНЫЕ ПЛЁНОЧНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТИОЛСОДЕРЖАЩЕГО ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА ДЛЯ ВАГИНАЛЬНОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ

Таукен А.М., Махаева Д.Н., Ирмухаметова Г.С.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан
e-mail: danelya.1993@gmail.com, galiya.irm@gmail.com

В статье рассмотрено получение тиолсодержащей полимерной системы на основе поливинилового спирта с использованием L-цистеина с целью повышения мукоадгезивных свойств. Описаны методы синтеза, получения плёночных композиций и исследования их физико-химических характеристик. Установлено влияние времени реакции взаимодействия на содержание тиольных групп, которое возрастает при увеличении продолжительности процесса. Показано, что взаимодействие приводит к изменению структуры полимерной системы, что подтверждается данными ИК-спектроскопии. Полученные плёночные композиции характеризуются хорошими технологическими свойствами, включая однородность, прозрачность и эластичность. Исследование времени растворения плёнок показало, что модифицированные образцы характеризуются более длительным временем растворения по сравнению с немодифицированным ПВС. Мукоадгезивные свойства плёнок оценены методом вращающегося цилиндра, при этом время удержания на слизистой оболочке значительно увеличивается. Установлена прямая зависимость между содержанием тиольных групп и мукоадгезивной способностью системы. Полученные результаты подтверждают перспективность использования тиолсодержащего поливинилового спирта для разработки мукоадгезивных лекарственных форм.

Ключевые слова: поливиниловый спирт, L-цистеин, тиолсодержащие полимеры, мукоадгезия, плёночные композиции, вагинальная доставка, физико-химические свойства, набухание.

The article presents the development of a thiol-containing polymer system based on polyvinyl alcohol using L-cysteine to enhance mucoadhesive properties. Methods of synthesis, preparation of film compositions, and investigation of their physicochemical characteristics are described. The influence of reaction time on thiol group content was established, showing an increase in their concentration with prolonged processing time. Structural changes in the polymer system were confirmed by FTIR analysis. The obtained films exhibited favourable technological properties, including homogeneity, transparency, and elasticity. Dissolution studies demonstrated that the modified samples exhibit longer dissolution times compared to unmodified PVA. Mucoadhesive properties were evaluated using the rotating cylinder method, revealing a significant increase in residence time on the mucosal surface. A direct relationship between thiol group content and mucoadhesive performance was established. The results indicate the potential of thiol-containing polyvinyl alcohol systems for developing mucoadhesive drug-delivery formulations.

Keywords: polyvinyl alcohol, L-cysteine, thiolated polymers, mucoadhesion, film compositions, vaginal drug delivery, physicochemical properties, swelling.

Мақалада мукоадгезивтік қасиеттерін арттыру мақсатында L-цистеинді қолдану арқылы поливинил спирті негізінде тиол құрамды полимерлік жүйе алу қарастырылған. Синтез әдістері, үлдірлі композицияларды алу және олардың физика-химиялық қасиеттерін зерттеу сипатталған. Реакция уақытының тиол топтарының мөлшеріне әсері анықталып, процесс ұзақтығы артқан сайын олардың концентрациясының өсетіні көрсетілді. Полимерлік жүйе құрылымының өзгеруі ИҚ-спектроскопия деректерімен расталды. Алынған үлдірлі композициялар біртектілігімен, мөлдірлігімен және икемділігімен сипатталады. Үлдірлердің еру уақытының зерттеуі модификацияланған үлгілердің бастапқы ПВС-пен салыстырғанда ұзақ еритінін көрсетті. Мукоадгезивтік қасиеттер айналмалы цилиндр әдісімен бағаланып, үлдірлердің шырышты қабатта ұсталу уақытының едәуір артатыны анықталды. Тиол топтарының мөлшері мен мукоадгезивтік қабілеті арасында тікелей байланыс бар екені дәлелденді. Алынған нәтижелер тиол құрамды поливинил спирті негізіндегі жүйелердің мукоадгезивті дәрілік формаларды әзірлеуде перспективалы екенін көрсетеді.

Түйінді сөздер: поливинил спирті, L-цистеин, тиол топтары, мукоадгезия, үлдірлі композициялар, вагинальды жеткізу, физика-химиялық қасиеттер, ісіну.

Введение

В последние годы значительное внимание уделяется разработке эффективных систем доставки лекарственных веществ через слизистые оболочки, в частности, вагинальный путь введения рассматривается как перспективное направление современной фармацевтической технологии [1, 2]. Это обусловлено рядом преимуществ, включая развитую систему кровоснабжения, отсутствие эффекта «первого прохождения» через печень, относительно высокую проницаемость слизистой оболочки и возможность самостоятельного применения лекарственных форм [3].

Несмотря на указанные преимущества, широкое применение вагинальных лекарственных форм ограничено рядом физиологических факторов, таких как вариабельность рН среды, изменения, связанные с возрастом и фазами менструального цикла, а также наличие вагинальных выделений [4]. Кроме того, традиционные лекарственные формы (кремы, гели, суппозитории, таблетки и растворы для ирригации) характеризуются недостаточной продолжительностью удержания на слизистой оболочке вследствие процессов самоочищения, что требует многократного введения препарата и снижает терапевтическую эффективность [5].

В связи с этим актуальным направлением является разработка мукоадгезивных систем доставки, способных обеспечивать пролонгированное удержание лекарственного средства на слизистой оболочке [6]. Особый интерес представляют полимерные плёнки, обладающие улучшенными адгезионными свойствами и контролируемым высвобождением активных веществ [7].

Одним из перспективных подходов к повышению мукоадгезии является введение тиольных групп в структуру полимеров. Тиолированные полимеры (тиомеры) способны образовывать дисульфидные связи с гликопротеинами слизи, что приводит к увеличению времени удержания и улучшению биодоступности лекарственных средств [8, 9]. Поливиниловый спирт (ПВС), обладающий высокой биосовместимостью, нетоксичностью и хорошими плёнообразующими свойствами, является подходящей матрицей для химической модификации [10].

Экспериментальная часть

В работе использовались следующие вещества: поливиниловый спирт (ПВС), молекулярная масса 145 кДа, Sigma-Aldrich (США), CAS 9002-89-5; L-цистеин, Sigma-Aldrich (Индия), чистота $\geq 97\%$, CAS 52-90-4; 5,5'-дитиобис(2-нитробензойная кислота) (реагент Элмана), Sigma-Aldrich (США), чистота $\geq 98\%$, CAS 69-78-3; глицерин, чистота 84–88%, РеактивСнаб (Казахстан); целлюлозная мембрана с MWCO 12–14 кДа; дигидрофосфат калия (KH_2PO_4), Лаборфарма (Казахстан); гидрофосфат натрия (Na_2HPO_4), Лаборфарма (Казахстан); хлорид натрия, гидроксид калия, гидроксид кальция, глюкоза – РеактивСнаб (Казахстан); бычий сывороточный альбумин, молочная кислота, мочеви́на – Sigma-Aldrich (США). Все реагенты использовались без дополнительной очистки.

Для приготовления фосфатного буфера с pH 5,5 и 8,0 готовили два исходных раствора:

- раствор А: KH_2PO_4 (6,8 г) растворяли в 500 мл воды;
- раствор Б: Na_2HPO_4 (15,6 г) растворяли в 500 мл воды.

Необходимые значения pH достигались смешением растворов в соответствующих объемных соотношениях с последующей корректировкой 1 М HCl или 1 М NaOH с использованием иономера Metrohm 781 pH/Ion Meter.

Искусственную вагинальную жидкость готовили согласно литературным данным [11]: NaCl (3,51 г), KOH (1,40 г), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0,222 г), бычий сывороточный альбумин (0,018 г), молочная кислота (2,0 г), уксусная кислота (1,0 г), глицерин (0,160 г), мочеви́на (0,4 г), глюкоза (5,0 г). Все компоненты растворяли в дистиллированной воде (до 1 л), после чего pH доводили до 4,2 с использованием 1 М HCl.

Для получения тиолсодержащего поливинилового спирта (ТПВС) по методике [12] поливиниловый спирт (1,25 г) растворяли в 100 мл дистиллированной воды при 80 °C в течение 10 минут до получения однородного раствора.

Затем в раствор вводили раствор L-цистеина (1,81 г) в соляной кислоте (1,81 мл) при мольном соотношении [цистеин]:[HCl] = 1:1. Реакционную смесь перемешивали при комнатной температуре в течение 5 и 7 часов, обеспечивая взаимодействие функциональных групп полимера и цистеина. После завершения процесса растворы охлаждали до комнатной температуры.

Очистку полученных образцов проводили методом диализа через целлюлозную мембрану (MWCO 12–14 кДа) в 2000 мл деминерализованной воды в течение 4 суток с восьмикратной заменой воды с целью удаления низкомолекулярных примесей и непрореагировавшего цистеина. После очистки образцы высушивали методом лиофилизации с использованием сушилки Labconco FreeZone 6 Plus.

Получение плёночных композиций. Для получения плёнок готовили 1%-ные водные растворы ПВС и ТПВС. В качестве пластификатора добавляли 1,5 мл глицерина. Растворы перемешивали при 80 °C до полной гомогенизации, затем разливали на пластиковые подложки и сушили при комнатной температуре до образования плёнок.

Физико-химические методы исследования

ИК-спектры плёночных образцов регистрировали на спектрометре Bruker VERTEX 70V в диапазоне 4500–500 cm^{-1} при температуре 22 °C.

Определение тиольных групп (метод Элмана). Образцы ТПВС (2 мг/мл) растворяли в фосфатном буфере (pH = 8) в течение 1 часа. Затем добавляли раствор реагента Элмана и инкубировали 90 минут в темноте. Оптическую плотность измеряли при 407 нм на

спектрофотометре Shimadzu UV-2401. Концентрацию тиольных групп определяли по калибровочной кривой с использованием L-цистеина.

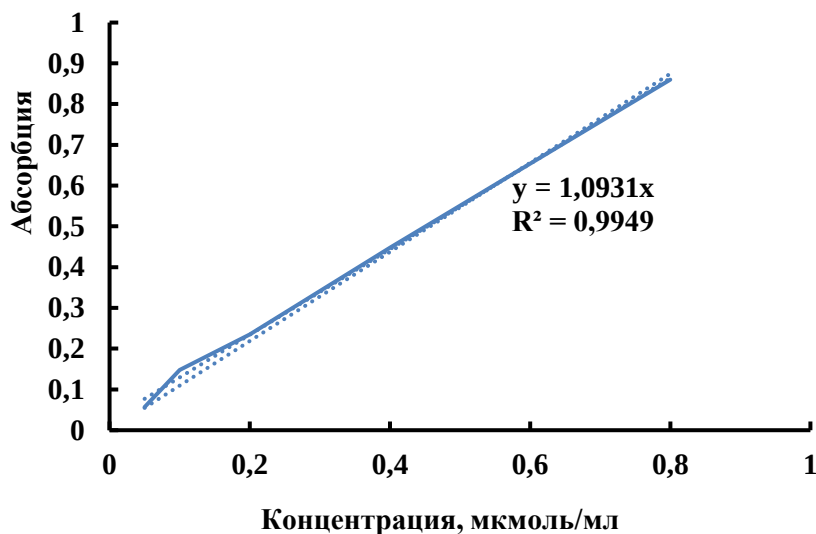


Рисунок 1 – Калибровочная кривая для определения концентрации L-цистеина

pH плёнок измеряли после их растворения в дистиллированной воде с использованием иономера Metrohm 781 pH/Ion Meter.

Время растворения плёночных композиций определяли в фосфатном буферном растворе (pH = 5,5) при температуре 37 °С. Образцы помещали в среду и фиксировали время полного растворения плёнки, определяемое как момент её полного визуального исчезновения.

Определение мукоадгезивных свойств. Мукоадгезию оценивали методом вращающегося цилиндра. Образец плёнки фиксировали на слизистой оболочке влагиалищной ткани овцы, закреплённой на стеклянной палочке согласно методу вращающегося цилиндра, описанный в литературе [13]. Систему помещали в 250 мл искусственной вагинальной жидкости и вращали со скоростью 50 об/мин при 25 °С. Время удержания определяли визуально.

Результаты и их обсуждение

В рамках данного исследования была получена тиолсодержащая полимерная система на основе поливинилового спирта с использованием L-цистеина. Модификация проводилась при различных временах взаимодействия (5 и 7 часов) с целью оценки влияния продолжительности процесса на содержание тиольных групп и физико-химические свойства полученных материалов.

В процессе модификации происходит взаимодействие функциональных групп ПВС и цистеина, приводящее к формированию тиолсодержащей системы за счёт водородных и ионных взаимодействий. Введение тиольных групп в полимерную матрицу подтверждается результатами спектроскопического и количественного анализа.

Косвенным подтверждением протекания взаимодействия служит изменение органолептических свойств: характерный запах L-цистеина, обусловленный наличием серосодержащих групп, по мере протекания процесса уменьшается, что указывает на его вовлечение в полимерную систему.

Как видно из таблицы 1, выход продукта зависит от времени реакции взаимодействия. Наименьший выход наблюдается при времени 5 часов ($75,2 \pm 24,8\%$), что сопровождается значительным разбросом значений и может свидетельствовать о нестабильности процесса на данном этапе. При увеличении времени до 7 часов выход достигает максимального значения ($98,4 \pm 1,6\%$), что указывает на более полное протекание взаимодействия и формирование стабильной системы.

Таблица 1 – Выход продуктов, полученных при различных временах модификации

Образец	Выход, %
ТПВС (5 часов)	$75,2 \pm 24,8$
ТПВС (7 часов)	$98,4 \pm 1,6$

Для количественного определения содержания тиольных групп использовали метод Элмана, обладающий высокой чувствительностью и доступностью по сравнению с альтернативными методами (электронный парамагнитный резонанс, ВЭЖХ, масс-спектрометрия и др.), требующими сложного оборудования.

Концентрацию тиольных групп рассчитывали по калибровочной кривой (рисунок 1). Установлено, что с увеличением времени модификации наблюдается закономерный рост содержания тиольных групп. Максимальное значение достигается при 7 часах синтеза и составляет $0,95$ ммоль/г, что свидетельствует о наиболее эффективном взаимодействии компонентов при данных условиях.

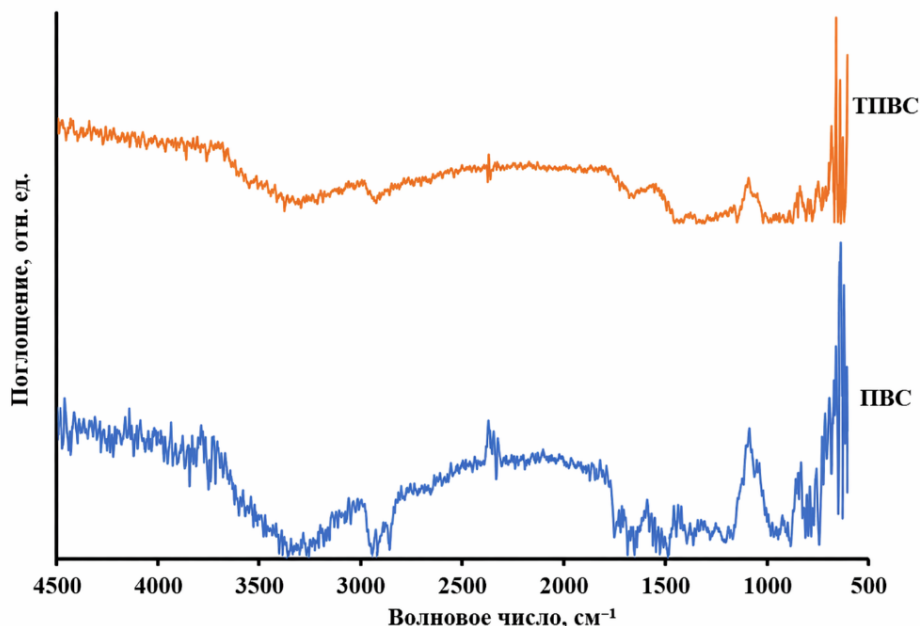


Рисунок 2 – ИК-спектры немодифицированного поливинилового спирта (ПВС) и тиолсодержащего ПВС (ТПВС)

ИК-спектроскопический анализ свидетельствует об изменении структуры полимерной системы после модификации. В спектре ТПВС наблюдаются изменения формы и интенсивности широкой полосы в области $3200\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям гидроксильных групп, что указывает на перераспределение системы водородных связей. В области $\sim 1710\text{--}1770\text{ см}^{-1}$ отмечается усиление полосы, связанное с вкладом карбонильных групп цистеина. Совокупность полученных данных свидетельствует о присутствии цистеина в полимерной матрице и его взаимодействии с ПВС.

При разработке плёночных композиций установлено, что оптимальное содержание глицерина как пластификатора составляет 5–10 % от массы полимера. Более высокие концентрации приводят к образованию липких плёнок с ухудшенными технологическими характеристиками. Плёнки на основе ТПВС характеризуются хорошей однородностью, прозрачностью, отсутствием дефектов и высокой эластичностью по сравнению с немодифицированным ПВС.

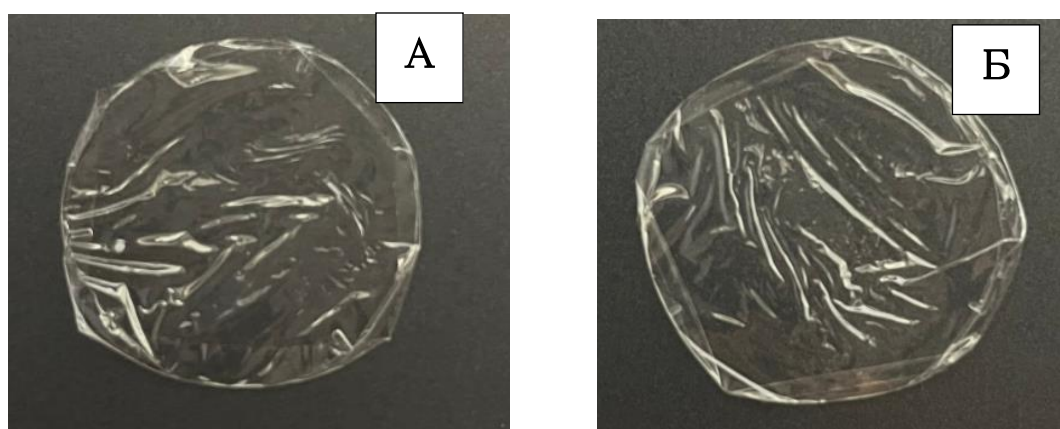


Рисунок 3 – Плёночные композиции на основе исходного ПВС (А) и тиолсодержащего ПВС (ТПВС) (Б)

Модификация ПВС приводит к изменению физико-химических свойств плёночных композиций: снижается рН и повышается устойчивость в водных растворах. Как показано в таблице 2, введение цистеина приводит к снижению рН плёнок с 6,22 (для ПВС) до 5,47–5,62 для ТПВС, что обусловлено присутствием карбоксильных групп аминокислоты.

Таблица 2 – Характеристики плёночных композиций на основе немодифицированного и тиолсодержащего ПВС

Образец	рН
ПВС	6,22
ТПВС (5 часов)	5,57
ТПВС (7 часов)	5,62

Исследование набухания показало, что немодифицированный ПВС характеризуется быстрым набуханием в фосфатном буферном растворе и растворением в течение 120 минут, тогда как ТПВС демонстрирует более контролируемое набухание и сохраняет целостность в течение более длительного времени.

Как видно из рисунка 4, немодифицированный ПВС характеризуется наименьшим временем растворения, составляющим около 180 минут.

Взаимодействие ПВС цистеином приводит к увеличению времени растворения плёночных композиций. Для образца ТПВС, полученного при 5 часах, данный показатель составляет около 250 минут. Максимальное значение наблюдается для плёнок, синтезированных в течение 7 часов (ТПВС–7 ч), где время растворения достигает ~300 минут. Таким образом, увеличение времени взаимодействия сопровождается ростом времени растворения плёночных систем.

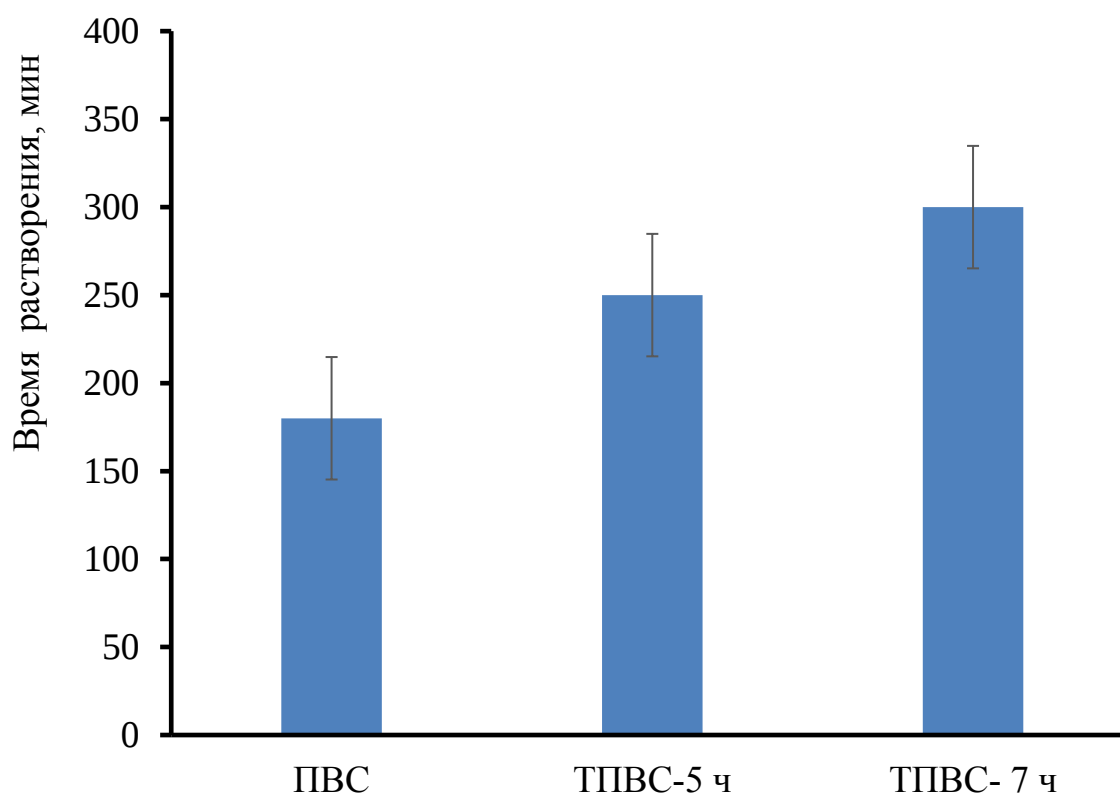


Рисунок 4 – Зависимость времени растворения пленок от состава

Мукоадгезивные свойства, оцененные методом вращающегося цилиндра, показали, что присутствия тиольных групп в матрице ПВС приводит к существенному повышению времени удержания плёночных композиций на слизистой оболочке. Это связано со способностью тиольных групп образовывать дисульфидные связи с гликопротеинами слизи, что обеспечивает более прочное и длительное удержание плёнок на поверхности.

На рисунке 5 представлена мукоадгезия плёночных композиций на слизистой оболочке влажной (эксперимент *in vitro*).

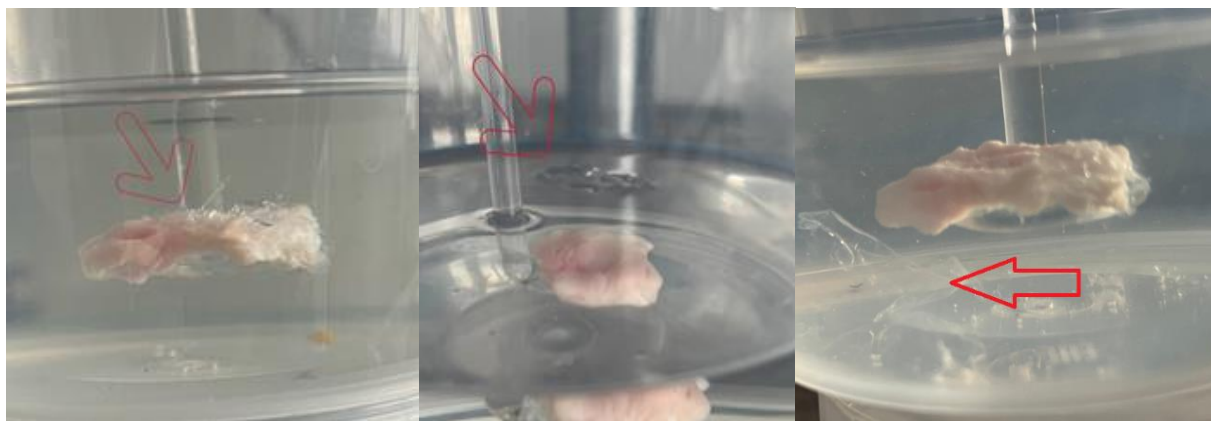


Рисунок 5 – Мукоадгезия плёночных композиций на слизистой оболочке влагалища (эксперимент in vitro)

Немодифицированный ПВС характеризуется минимальным временем удержания (3,29 мин), что обусловлено слабым взаимодействием с муцином и быстрым удалением с поверхности слизистой. Введение цистеина приводит к значительному увеличению времени удержания: для образцов, модифицированных в течение 5 и 7 часов, данный показатель возрастает до 25,87 и 36,0 минут, соответственно.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что увеличение времени модификации способствует росту содержания тиольных групп, улучшению мукоадгезивных свойств и повышению стабильности плёночных композиций. Оптимальным временем модификации в условиях данного эксперимента является 7 часов, обеспечивающее наилучшее сочетание характеристик системы.

Заключение

В работе получена тиолсодержащая полимерная система на основе поливинилового спирта с использованием L-цистеина. Установлено, что увеличение времени модификации приводит к росту содержания тиольных групп и изменению физико-химических свойств материала. Получены плёночные композиции с хорошими технологическими характеристиками, при этом введение цистеина приводит к снижению pH и увеличению времени растворения плёнок. Мукоадгезивные свойства показали увеличение времени удержания на слизистой оболочке от 3 до 36 минут. Установлена прямая зависимость между содержанием тиольных групп и мукоадгезией. Полученные результаты подтверждают перспективность применения тиолсодержащего ПВС для создания мукоадгезивных плёночных систем для вагинальной доставки.

Литература:

1. Shatabayeva E.O., et al. Development and characterization of mucoadhesive vaginal films based on polymer blends // AAPS PharmSciTech. – 2025. – Vol. 26. – Article 55.
2. das Neves J., Bahia M.F. Gels as vaginal drug delivery systems // International Journal of Pharmaceutics. – 2006. – Vol. 318. – P. 1–14.

3. Hussain A., Ahsan F. The vagina as a route for systemic drug delivery // *Journal of Controlled Release*. – 2005. – Vol. 103. – P. 301–313.
4. Ceschel G.C., Maffei P., Lombardi B.S., Ronchi C., Rossi S. Development of a mucoadhesive dosage form for vaginal administration // *Drug Development and Industrial Pharmacy*. – 2001. – Vol. 27, № 6. – P. 541–554.
5. Vermani K., Garg S. The scope and potential of vaginal drug delivery // *Pharmaceutical Science & Technology Today*. – 2000. – Vol. 3. – P. 359–364.
6. Smart J.D. The basics and underlying mechanisms of mucoadhesion // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2005. – Vol. 57. – P. 1556–1568.
7. Andrews G.P., Laverty T.P., Jones D.S. Mucoadhesive polymeric platforms for controlled drug delivery // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2009. – Vol. 71. – P. 505–518.
8. Mfoafo K., Mittal R., Omid Y., Omidian H. Thiolated polymers: an overview of mucoadhesive properties and their potential in drug delivery // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – 2023. – Vol. 84. – Article 104596.
9. Mahmood A., Bernkop-Schnürch A. S-protected thiolated polymers: synthesis and applications in mucoadhesive drug delivery // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2019. – Vol. 559. – P. 248–256.
10. Hassan C.M., Peppas N.A. Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels // *Advances in Polymer Science*. – 2000. – Vol. 153. – P. 37–65.
11. Owen D.H., Katz D.F. A vaginal fluid simulant // *Contraception*. – 1999. – Vol. 59. – P. 91–95.
12. Suchao W., et al. Synthesis and in vitro characterization of thiolated poly(vinyl alcohol) // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2016. – Vol. 102. – P. 1–8.
13. Khutoryanskiy V.V. Advances in mucoadhesion and mucoadhesive polymers // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2011. – Vol. 418. – P. 1–7.

References:

1. Shatabayeva E.O., et al. Development and characterization of mucoadhesive vaginal films based on polymer blends // *AAPS PharmSciTech*. – 2025. – Vol. 26. – Article 55.
2. das Neves J., Bahia M.F. Gels as vaginal drug delivery systems // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2006. – Vol. 318. – P. 1–14.
3. Hussain A., Ahsan F. The vagina as a route for systemic drug delivery // *Journal of Controlled Release*. – 2005. – Vol. 103. – P. 301–313.
4. Ceschel G.C., Maffei P., Lombardi B.S., Ronchi C., Rossi S. Development of a mucoadhesive dosage form for vaginal administration // *Drug Development and Industrial Pharmacy*. – 2001. – Vol. 27, № 6. – P. 541–554.
5. Vermani K., Garg S. The scope and potential of vaginal drug delivery // *Pharmaceutical Science & Technology Today*. – 2000. – Vol. 3. – P. 359–364.
6. Smart J.D. The basics and underlying mechanisms of mucoadhesion // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2005. – Vol. 57. – P. 1556–1568.
7. Andrews G.P., Laverty T.P., Jones D.S. Mucoadhesive polymeric platforms for controlled drug delivery // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2009. – Vol. 71. – P. 505–518.
8. Mfoafo K., Mittal R., Omid Y., Omidian H. Thiolated polymers: an overview of mucoadhesive properties and their potential in drug delivery // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – 2023. – Vol. 84. – Article 104596.
9. Mahmood A., Bernkop-Schnürch A. S-protected thiolated polymers: synthesis and applications in mucoadhesive drug delivery // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2019. – Vol. 559. – P. 248–256.
10. Hassan C.M., Peppas N.A. Structure and applications of poly (vinyl alcohol) hydrogels // *Advances in Polymer Science*. – 2000. – Vol. 153. – P. 37–65.
11. Owen D.H., Katz D.F. A vaginal fluid simulant // *Contraception*. – 1999. – Vol. 59. – P. 91–95.

12. Suchaoin W., et al. Synthesis and in vitro characterization of thiolated poly(vinyl alcohol) // European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. – 2016. – Vol. 102. – P. 1–8.
13. Khutoryanskiy V.V. Advances in mucoadhesion and mucoadhesive polymers // International Journal of Pharmaceutics. – 2011. – Vol. 418. – P. 1–7.

Поступила 20 мая 2025 г.

SRSTI 52.47.29

UDC 547.912.66

POLYMERIC POUR POINT DEPRESSANTS FOR REGULATING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF WAXY CRUDE OILS

**Bekbassov T.M., Ilyas S.G., Alikulov A.Zh., Makhayeva D.N., Madenova A.E.,
Yermukhambetova B.B., Mun G.A.**

*Farabi University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: Ilyas.sultan@internet.ru*

Wax deposition during the transportation of paraffin-containing crude oil under low-temperature conditions remains one of the most important flow-assurance problems for the oil industry, especially for Kazakhstan and the Kumkol region. This review summarizes the physicochemical causes of wax formation, including cooling below the wax appearance temperature (WAT), crystallization of n-alkanes, formation of a three-dimensional wax network, and the influence of crude-oil composition and flow conditions. Particular attention is paid to polymeric pour point depressants (PPDs), which modify the morphology of paraffin crystals, reduce the pour point, improve low-temperature rheological properties, and inhibit wax deposition. The paper compares several classes of polymeric reagents, including ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers, maleic anhydride-based copolymers, EVA-based composites, and chemically modified EVA systems. The literature data show that the efficiency of PPDs depends not only on dosage, but also on polymer architecture, molecular weight, vinyl acetate content, polarity, and compatibility with the specific composition of crude oil. The review emphasizes that modified EVA-based systems are among the most promising reagents for Kazakhstani waxy oils because they can combine high depressant activity, wax-inhibition efficiency, and industrial availability.

Keywords: wax deposition; pour point; polymeric depressants; rheological properties; waxy crude oil; flow assurance; crystal modification; wax appearance temperature; EVA copolymers; Kazakhstani oil.

Төмен температура жағдайында парафинді мұнайларды тасымалдау кезінде парафин шөгінділерінің түзілуі мұнай өнеркәсібіндегі ағынды қамтамасыз етудің ең өзекті мәселелерінің бірі болып табылады, әсіресе Қазақстан және Құмкөл аймағы үшін. Бұл шолуда парафин түзілуінің физика-химиялық себептері, соның ішінде мұнайдың парафиндердің кристалдану басталу температурасынан төмен салқындауы, n-алкандардың кристалдануы, үшөлшемді парафиндік құрылымның түзілуі, сондай-ақ мұнай құрамы мен гидродинамикалық жағдайлардың әсері қарастырылған. Парафин кристалдарының морфологиясын өзгертіп, мұнайдың қату температурасын төмендететін, төмен температуралық реологиялық қасиеттерін жақсартатын және парафин шөгінділерінің түзілуін тежейтін полимерлі депрессорлық қоспаларға ерекше назар аударылды. Этилен-винилацетат (EVA) сополимерлері, малеин ангидридi негізіндегі сополимерлер, EVA негізіндегі композициялар және химиялық түрлендірілген EVA жүйелері сияқты полимерлік реагенттердің әртүрлі кластарына салыстырмалы талдау жасалды. Әдеби деректерді талдау депрессорлық қоспалардың тиімділігі олардың мөлшеріне ғана емес, сонымен қатар полимер архитектурасына, молекулалық массасына, винилацетат мөлшеріне, полярлығына және нақты мұнай құрамымен үйлесімділігіне тәуелді екенін көрсетті. Түрлендірілген EVA негізіндегі жүйелер

жоғары депрессорлық белсенділігі, парафин шөгінділерін тежеу тиімділігі және өнеркәсіптік қолжетімділігі арқасында Қазақстанның жоғары парафинді мұнайлары үшін ең перспективалы реагенттердің бірі болып табылатыны атап өтілді.

Түйінді сөздер: парафин шөгінділері; қату температурасы; полимерлі депрессорлар; реологиялық қасиеттер; жоғары парафинді мұнай; ағынды қамтамасыз ету; кристалл құрылымын модификациялау; парафиндердің кристалдану басталу температурасы; EVA сополимерлері; қазақстандық мұнай.

Отложение парафинов при транспортировке парафинистых нефтей в условиях низких температур остается одной из наиболее актуальных проблем обеспечения потока в нефтяной промышленности, особенно для Казахстана и месторождений региона Кумколь. В данном обзоре рассмотрены физико-химические причины образования парафиновых отложений, включая охлаждение нефти ниже температуры начала кристаллизации парафинов, кристаллизацию n-алканов, формирование трехмерной парафиновой структуры, а также влияние состава нефти и гидродинамических условий. Особое внимание уделено полимерным депрессорным присадкам, которые способны изменять морфологию парафиновых кристаллов, снижать температуру застывания нефти, улучшать низкотемпературные реологические свойства и ингибировать парафиноотложения. Проведен сравнительный анализ различных классов полимерных реагентов, включая сополимеры этилен-винилацетата (EVA), сополимеры на основе малеинового ангидрида, композиции на основе EVA и химически модифицированные системы EVA. Анализ литературных данных показывает, что эффективность депрессорных присадок зависит не только от их концентрации, но и от архитектуры полимера, молекулярной массы, содержания винилацетата, полярности и совместимости с конкретным составом нефти. Подчеркивается, что модифицированные системы на основе EVA являются одними из наиболее перспективных реагентов для высокопарафинистых нефтей Казахстана благодаря сочетанию высокой депрессорной активности, эффективности ингибирования парафиноотложений и промышленной доступности.

Ключевые слова: парафиноотложения; температура застывания; полимерные депрессоры; реологические свойства; высокопарафинистая нефть; обеспечение потока; модификация кристаллов; температура начала кристаллизации парафинов; сополимеры EVA; казахстанская нефть.

Wax formation during oil transportation

Wax deposition during crude-oil transportation is one of the major flow-assurance challenges in the petroleum industry [1, 7, 29]. The problem is especially relevant for Kazakhstan and the Kumkol region, where a significant share of produced crude oils contains high amounts of paraffinic hydrocarbons [2-4, 17]. During long-distance pipeline transportation, especially in cold seasons, wax crystals may precipitate from the oil phase and deposit on pipeline walls. This reduces the effective pipeline diameter, increases hydraulic resistance and pressure losses, lowers throughput, and may ultimately require costly mechanical cleaning, heating, or repair operations [9].

Wax deposits are formed when the temperature of crude oil decreases below the wax appearance temperature (WAT) and approaches the pour point [6, 20, 30]. Under these conditions, dissolved n-alkanes begin to crystallize. As cooling continues, wax crystals grow, interact with one another, and may form a three-dimensional network that immobilizes part of the liquid hydrocarbon phase [22-24]. As a result, the crude oil gradually loses its ability to flow under gravity and exhibits strongly non-Newtonian rheological behavior.

The composition of crude oil strongly affects the nature and intensity of wax deposition [21, 27]. In addition to paraffins, resins, asphaltenes, light fractions, aromatic compounds, and other polar components influence crystallization, aggregation, and adhesion of wax crystals to the pipe wall. Asphaltenes and resins can stabilize colloidal structures and alter the morphology of paraffin crystals, while the roughness and surface energy of the pipeline material affect the adhesion and accumulation of deposits [39, 52].

Several theories have been proposed to explain the loss of oil mobility at low temperature, including the micellar, solvation, and crystallization theories [38, 39, 42]. The crystallization theory is currently the most widely used, since it directly relates the loss of flowability to the formation and growth of solid n-alkane crystals. Diffusion-based models of wax deposition, often derived from Fick's law, further highlight the importance of temperature gradients, concentration gradients, and mass transfer of wax molecules toward the cold pipeline wall [7, 34].

$$\frac{dm}{dt} = \rho_d D_m A \frac{dC}{dr}$$

Here, m is the mass of deposited wax, ρ_d is the density of the solid wax phase, D_m is the diffusion coefficient of dissolved wax in oil, A is the deposition surface area, C is the wax concentration in solution, and r is the radial coordinate.

Although thermodynamic factors determine whether wax precipitation is possible, kinetic factors also play a critical role. Nucleation rate, crystal growth rate, cooling history, and shear conditions determine whether wax crystals form a stable gel network quickly enough to cause operational problems [14, 15, 22 – 24]. Therefore, both thermodynamic and kinetic aspects must be considered when selecting technologies for wax-deposition control.

Flow assurance approaches in the petroleum industry

Kazakhstan's paraffinic crude oils, which may contain high wax concentrations, create serious flow-assurance problems during low-temperature transportation. Wax deposition increases viscosity, reduces pumpability, and can lead to partial or complete pipeline blockage. Traditional mitigation methods include pipeline heating, thermal insulation, mechanical pigging, blending with lighter fractions, and chemical treatment [19, 25, 28].

Thermal methods are effective but require high energy input and additional infrastructure, especially for oils with high pour points. Mechanical pigging can remove deposits already formed, but it does not prevent new wax crystallization and may be difficult or risky in long-distance pipeline systems [19]. Dilution with lighter hydrocarbons can reduce viscosity, but it may destabilize asphaltenes and require compatibility testing. Water-in-oil or oil-in-water emulsification approaches have been used in some countries, but they are less suitable for Kazakhstan because of strict water-content requirements and cold-climate operation [25, 28].

For these reasons, chemical treatment with polymeric pour point depressants is considered one of the most promising approaches. PPDs do not simply dissolve wax; instead, they modify the crystallization process [31]. Polymer molecules interact with growing wax crystals, change their morphology, suppress the formation of rigid networks, and improve the low-temperature flow properties of crude oil even at relatively low dosages [16, 29, 35].

Polymers as pour point depressants

Polymeric pour point depressants influence wax crystallization through adsorption, co-crystallization, nucleation, and steric hindrance mechanisms [8, 45]. Most effective PPD molecules contain both nonpolar hydrocarbon fragments and polar functional groups. The hydrocarbon fragments provide compatibility with paraffin crystals, while the polar groups disturb regular crystal growth and reduce the ability of wax particles to aggregate into a continuous network [10, 12, 41].

Different mechanisms have been proposed to describe the action of PPDs. According to adsorption-based interpretations, the depressant molecule attaches to the active growth faces of n-alkane crystals and changes their shape. Other approaches suggest that depressants can form micellar or supramolecular structures that delay the formation of a rigid crystal lattice. In practice, the efficiency of a PPD is usually determined by the balance between its compatibility with the oil phase and its ability to interfere with wax-crystal growth.

X-ray studies indicate that many depressants do not significantly change the crystal lattice of n-alkanes. Instead, their main effect is morphological: they reduce the length and width of wax crystals, promote the formation of smaller or irregular particles, and prevent the development of long needle-like structures. At higher concentrations, some PPDs may lead to dendritic or highly distorted crystal forms, which are less capable of forming a strong gel network [44, 49, 53].

Studies on waxy crude oils have shown that maleic anhydride- and vinyl acetate-based polymers can reduce viscosity and improve low-temperature flow properties. In many cases, EVA copolymers demonstrate better performance than simple solvent treatment, because they directly affect wax-crystal morphology rather than only diluting the oil [10, 12, 13, 41]. Representative data are summarized in Table 1.

Table 1 – Physical properties of treated oil

Type of chemical	Concentration, ppm	Temperature, °C			
		40	30	20	10
EVA	500	4.45	5.97	13.2	43.2
	5000	3.69	4.07	5.08	11.1
MA	500	10.4	19.3	20.18	50
	5000	4.4	5.8	11.71	25.54
Cyclohexane	500	11.2	19.9	23.2	55.5
	5000	4.9	6.62	7.21	23
Toluene	500	13	25.5	32.1	60.2
	5000	5	7	6.5	29.5
Acetone	500	14.9	24.3	31	65
	5000	5.4	6.74	8	25
DEA	500	15.1	24	31.4	57.3
	5000	5.28	8.2	7.81	32.4

Pour point and rheological parameters in the petroleum industry

The number, size, and shape of wax crystals determine whether they increase crude-oil viscosity, form a gel network, or remain dispersed in the liquid phase [22-24]. The most commonly discussed wax-crystal morphologies are listed below:

A. Needles – elongated crystals that can interconnect and trap the liquid hydrocarbon fraction [44].

B. Malcrystals – irregularly shaped crystals that are less able to form a continuous network and are therefore more pumpable.

C. Plates – plate-like crystals that are generally more pumpable, although curled plates may form hollow needle-like structures capable of networking.

D. Microcrystalline waxes – typically associated with refinery residues rather than crude-oil wax deposits or precipitates.

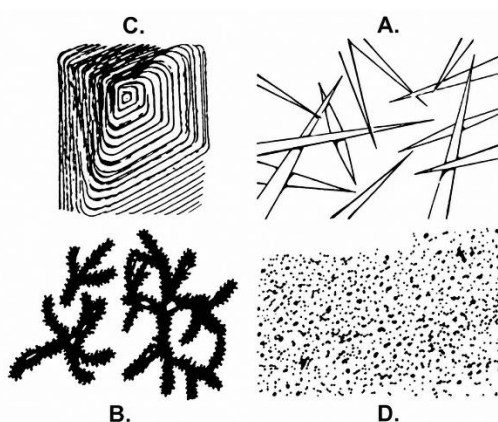


Figure 1 – Common pattern of paraffin crystal growth

Wax crystal modifiers, including many PPDs and paraffin inhibitors, prevent wax deposition by changing the structure and growth of wax crystals. These materials may co-crystallize with wax molecules or adsorb on crystal surfaces, replacing paraffin molecules at active growth sites and disrupting regular molecular alignment. As a result, wax crystals become smaller, less regular, and less capable of forming a continuous deposit or gel [48 – 50, 53] risk of pipeline blockage.

Such additives are effective only when introduced before or during wax crystallization, usually above the cloud point or WAT. They generally do not eliminate wax or substantially lower the WAT itself, but they can significantly reduce the pour point and improve rheological behavior. Depending on the crude oil and the polymer structure, the same reagent may act mainly as a pour point depressant, wax inhibitor, flow improver, or multifunctional additive [11].

Pour point and rheological properties are key parameters for evaluating the transportability of waxy crude oil. The pour point indicates the lowest temperature at which oil remains capable of flowing under standardized conditions, while rheological measurements describe viscosity and flow behavior under shear. Together, these parameters are essential for assessing pumping conditions, pressure losses, and the risk of pipeline blockage [21 – 24, 27].

Several studies have investigated the effectiveness of EVA copolymers with different compositions in modifying the pour point and viscosity of waxy crude oils. The crude-oil characteristics used in one such study is presented in Table 2 [46, 51].

Table 2 – Crude Oil Parameters

Specification	Crude-1	Crude-2	Crude-3	Crude-4	Crude-5	Methods
Specific gravity at 15.56/15.56 ° C	0.8503	0.8661	0.8846	0.8944	0.9033	ASTM D-4052
API	34.9	31.9	28.5	26.7	25.1	ASTM D-4053
Kinematic viscosity at 40 ° C C.St.	7.828	10.959	12.525	14.689	15.125	ASTM D-445
Pour point (° C)	26	20	17	14	8	ASTM D-97
Asphaltene content (wt.%)	0.3	1.5	2.8	4.7	7.8	IP-143
Wax content (wt.%)	13.1	11.2	9.7	7.4	5.2	BP-237

The crude oils listed in Table 2 were treated with different EVA copolymers, after which their pour point and rheological parameters were measured again. The data show a clear general trend: increasing the dosage of an effective EVA additive decreases both pour point and viscosity. The corresponding pour point and viscosity data are summarized in Tables 3 and 4 [46, 51].

Table 3 – Pour point of crudes treated with different EVA copolymers

Type	Concentration, ppm	EVA80	EVA20	EVA40	EVA32
Crude-1	500	15	19	21	20
	1000	5	13	16	14
	2000	- 2	9	13	10
Crude-2	500	14	15	16	16
	1000	7	8	10	10
	2000	1	4	7	6
Crude-3	500	12	9	12	10
	1000	7	3	6	5
	2000	2	-1	3	1
Crude-4	500	9	7	10	7
	1000	2	2	6	-1
	2000	-1	-1	4	- 4
Crude-5	500	4	- 2	1	-1
	1000	1	- 4	-1	- 6
	2000	- 2	- 6	- 2	-10

Table 4 – Viscosity (mPa s) of crude oils at a shear rate of 100 s⁻¹ of crudes treated with different EVA copolymers

Type	Concentration (EVA80), ppm	40 °C	20 °C	15 °C	10 °C	5 °C	Concentration (EVA32), ppm	40 °C	20 °C	15 °C	10 °C	5 °C
Crude-1	500	10	39	155	415	760	500	13	44	368	691	992
	1000	8	30	120	360	710	1000	10	38	292	612	874
	2000	2	25	98	310	680	2000	5	34	221	538	842
Crude-2	500	14	42	180	440	780	500	12	42	352	656	910
	1000	12	36	140	380	740	1000	9	36	268	584	855
	2000	7	30	110	340	715	2000	4	30	197	502	810
Crude-3	500	16	45	210	492	810	500	11	40	302	602	895
	1000	14	40	180	410	780	1000	9	32	210	554	802
	2000	9	35	150	385	730	2000	4	24	170	471	780
Crude-4	500	16	47	280	530	865	500	11	38	250	590	820
	1000	15	42	225	485	812	1000	9	32	190	510	780
	2000	9	38	186	427	785	2000	3	24	150	410	720
Crude-5	500	18	52	352	587	912	500	9	38	170	440	750
	1000	16	48	286	512	868	1000	7	32	110	350	710
	2000	10	43	227	487	802	2000	1	25	90	310	683

Maleic anhydride-based polymers have also been tested on samples from several Kazakhstani oilfields. Table 5 presents data for an esterified styrene-maleic anhydride copolymer tested on highly paraffinic oils with different physicochemical characteristics [3, 10, 13].

Table 5 – Effectiveness of the depressant action of the modified styrene-maleic anhydride copolymer on various types of oil

Oilfield	Paraffin content, %	Pour point temperature, °C		
		Blank sample	Treated oil (PPD content, wt.%)	Depression value
Kumkol	16,0	+12,0	-6,0 (0,01)	18,0
Konys	26,7	+18,0	+2,0 (0,01) +1,5 (0,5)	16,0 16,5
Bektas	38,5	+25,8	+16,0 (0,01) +14,0(0,058) +10,6 (0,093)	9,8 11,8 15,2
Zhetybay		+28,0	+12,0 (0,01)	16,0

The highest depressant activity was observed for Kumkol oil, where only 0.01 wt.% additive reduced the pour point by 18 ° C. Strong effects were also observed for Konys and Zhetybay oils, while the efficiency decreased for oils with a higher content of n-alkanes.

It should be noted that the typical industrial dosage of PPDs in Kazakhstani oilfields is often in the range of 200 – 500 ppm (0.02 – 0.05 wt.%). Therefore, high efficiency at low dosage is one of the most important criteria for selecting a practical depressant additive [3, 18].

EVA-based pour point depressants as flow improvers

Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers are among the most widely used polymeric wax modifiers and pour point depressants in the petroleum industry. Commercial EVA-based PPDs have also shown good depressant performance for oils from the Kumkol oilfield in Central Kazakhstan, which makes EVA a logical platform for further modification and optimization [45, 48, 54].

The general structural formula of an EVA copolymer is shown in Figure 2.

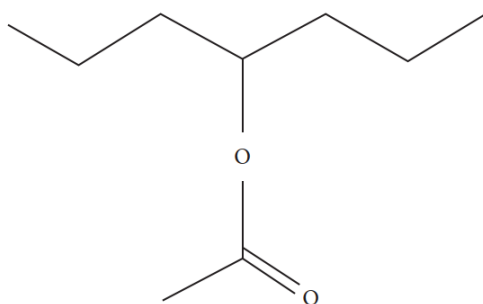


Figure 2 – Structural formula of EVA copolymer

EVA copolymers with different molecular weights and vinyl acetate contents have long been used as PPDs [48, 49, 55]. Their activity is usually associated with co-crystallization with wax molecules or the formation of a thin polymer layer on wax-crystal surfaces. This prevents the formation of large wax agglomerates and improves the flowability of waxy crude oil at low temperature. In one study, two possible effects of EVA on n-alkane crystallization were observed: EVA may either promote nucleation or inhibit crystal growth, depending on the solvent, paraffin chain length, and temperature [49, 50, 53]. The compositions studied are shown in Table 6.

Table 6 – Composition of blends and their cloud points

	Solution E1	Solution E2	Solution K1	Solution K2
Composition	5% C20-C22-C24 in ethylbenzene	4% paraffin blend in ethylbenzene	5% C20-C22-C24 in kerosene	4% paraffin blend in kerosene
Cloud point (°C)	-0.5	4.2	-6.9	1.5
Cloud point (°C) 500 ppm EVA	-1.9	3.6	-7.2	1.1

After cooling the mixtures to the WAT region, the crystal size was measured by optical microscopy. Untreated systems formed large needle-shaped crystals up to approximately 5 mm in length, whereas EVA-treated systems produced much smaller crystals, typically in the micrometre range. The results are summarized in Table 7 and illustrated in Figure 3 [49, 50, 53].

Table 7 – Crystal size obtained by optical microscopy

Paraffin solutions	Mean crystal size μm	Standard deviation μm
E1 + 100 ppm of EVA	11	3
E1 + 250 ppm of EVA	14	3
E1 + 500 ppm of EVA	8	3
E1+1000ppm of EVA	17	8
K2+250ppm of EVA	7	3
K2+500ppm of EVA	9	3
K2+750ppm of EVA	5	2
K2 + 1000 ppm of EVA	4	1

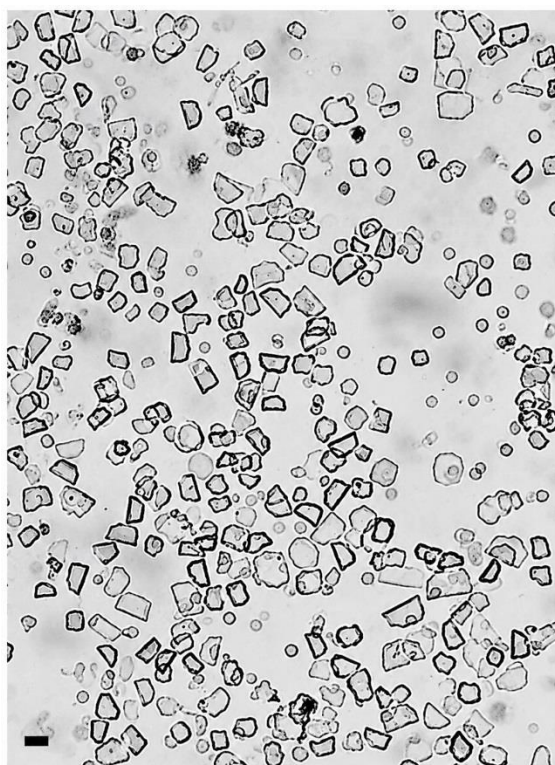


Figure 3 – Paraffin crystals obtained from mixtures with EVA

Improving chemical flow is especially important for offshore production and subsea pipeline transportation [5, 31, 32]. Heating or pigging subsea pipelines is technically difficult and expensive; if a pig becomes stuck, production may be interrupted for a long period. In such cases, stable flow assurance often relies heavily on chemical treatment. A study of Albacora crude oil from the Campos Basin in Brazil evaluated several EVA copolymers with different vinyl acetate contents and molecular weights. The copolymers are listed in Table 8.

Table 8 – EVA copolymers used to test performance

Copolymer	Number average molecular weight, Mn (g/mol)	Polydispersity, PD	Vinyl acetate content (wt %)
EVA 1	19300	2.8	41
EVA 2	14100	3.6	31
EVA3	16100	4.5	28
EVA 4	14500	3.9	28
EVA 5	10100	4.1	28
EVA 6	19300	4.4	28
EVA 7	19400	3.8	28
EVA 8	4500	2.0	36
EVA 9	2400	2.0	31
EVA 10	2600	2.7	30

The pour point of Albacora crude oil was measured after treatment with 1000 ppm of each EVA copolymer. The results, presented in Table 9, show that several EVA samples reduced the pour point from +4 ° C to below -30 ° C, demonstrating the strong potential of EVA-based polymers as flow improvers [48, 54].

Table 9 – Pour point of oil treated with 1000 ppm of different EVA copolymers

Polymer	Pour point (°C)
—	+4
EVA 1	<-30
EVA 2	<-30
EVA3	<-30
EVA 4	<-30
EVA 5	<-30
EVA 6	<-30
EVA 7	<-30
EVA 8	-12
EVA 9	-4
EVA 10	-4

The wax-inhibition efficiency of the same EVA copolymers was then evaluated using a static cold-finger simulation. The results are shown in Table 10. The data indicate that EVA copolymers with an appropriate vinyl acetate content and molecular weight can provide high inhibition efficiency, although the performance is strongly dependent on polymer structure [48, 49, 55].

Table 10 – Paraffin inhibition oil treated with 1000 ppm of different EVA copolymers

Copolymer as an additive	EVA 1	EVA 2	EVA3	EVA 4	EVA 5	EVA 6	EVA 7
Efficiency of inhibition (%)	86	64	14	0	45	2	-12

EVA-based chemicals are also used in Kazakhstan. In one study, an EVA copolymer-based reagent was tested on crude oil samples from different oilfields of the Kyzylorda region.

The main characteristics of the tested crude oils are listed in Table 11 [18, 47, 56].

Table 11 – Main characteristics of oil samples from the Kyzylorda region

Crude oil	d_{4}^{20} (kg/m ³)	PP (°C)	Wax (%)	Asphalt. (%)	Resins (%)	Fraction (%)		
						200 °C	300 °C	350 °C
Kumkol	810.4	12	14.4	0.1	7.6	29	49	59
Akshabulak	829.7	21	14.3	0.6	8.6	29	48	58
Konys-Bektas	874.4	24	16.5	2.0	7.1	15	33	47
Aschysay	878.2	21	20.1	1.3	9.2	20	39	51

The oil samples were treated with a 200 ppm EVA solution containing 25% vinyl acetate in an organic solvent. After treatment, key parameters such as pour point, wax-inhibition rate, and dynamic viscosity were measured. The results in Tables 12 and 13 confirm that EVA can reduce pour point and improve viscosity behavior, although the effect depends strongly on the origin and composition of the crude oil [18, 47].

Table 12 – Pour point and inhibition rate of EVA for Kyzylorda crude oils

	PP (°C)	m (wax), g	Inhibition degree (%)
Akshabulak			
Untreated	+21	3.6	0
Heat treated	+18	2.48	31.2
EVA	+6	1.85	48.5
Aschysay			
Crude oil	+24	4.6	0
Heat treated	+21	3.28	28.6
EVA	+15	2.99	35.0
Konys-Bektas			
Untreated	+24	4.2	0
Heat treated	+21	3.12	25.8
EVA	+9	2.85	32.1
Kumkol			
Untreated	+15	3.4	0
Heat treated	+12	2.11	37.8
EVA	+9	1.95	42.5

Table 13 – Dynamic viscosity at different temperatures of treated oil from the Kyzylorda region

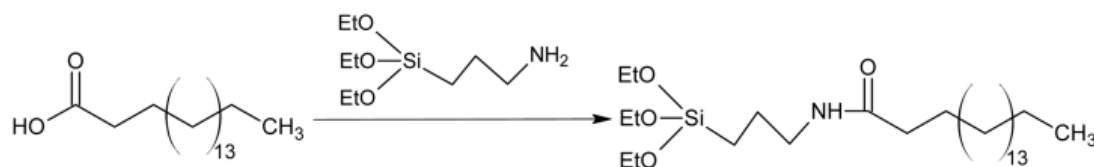
Waxy crude oil	Treatment	Dynamic viscosity (Pa s)	
		10 °C	20 °C
Akshabulak	Heat treatment	1.590	0.071
	EVA	0.010	0.005
Aschysay	Heat treatment	1.220	0.095
	EVA	0.557	0.041
Konys-Bektas	Heat treatment	4.24	0.084
	EVA	0.052	0.015
Kumkol	Heat treatment	0.020	0.005
	EVA	0.017	0.003

Synthesis and modification of EVA-based polymers

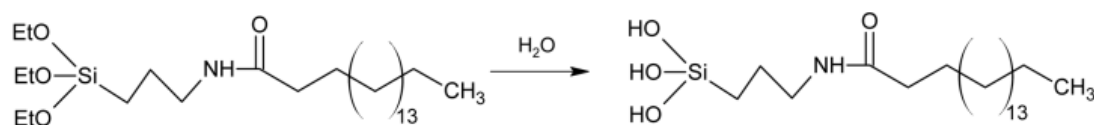
As EVA copolymers became widely used as flow improvers, many studies focused on improving their performance through chemical modification, blending, and composite formation. The purpose of such modifications is to adjust polymer polarity, compatibility with crude oil, interaction with wax crystals, and resistance to aggregation [41, 52, 55].

For example, Jing et al. [55] developed EVA/SiO₂ nanocomposite pour point depressants. In this approach, SiO₂ nanoparticles were first modified with succinic anhydride and KH550, and then combined with EVA to improve the depressant performance. The modification route is shown in Figure 4.

The first step: Acylation reaction



The second step: Hydrolysis reaction



The third step: Condensation reaction

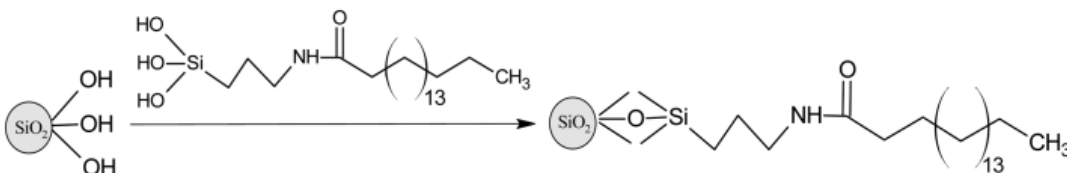


Figure 4 – Modification of SiO₂ nanoparticles

The resulting nanocomposites were tested on Daqing crude oil with a high wax content of approximately 25 wt.%. EVA copolymers containing 28% and 38% vinyl acetate and modified with

SiO₂ nanoparticles performed better than the corresponding pure EVA copolymers. These results are shown in Figures 5 and 6.

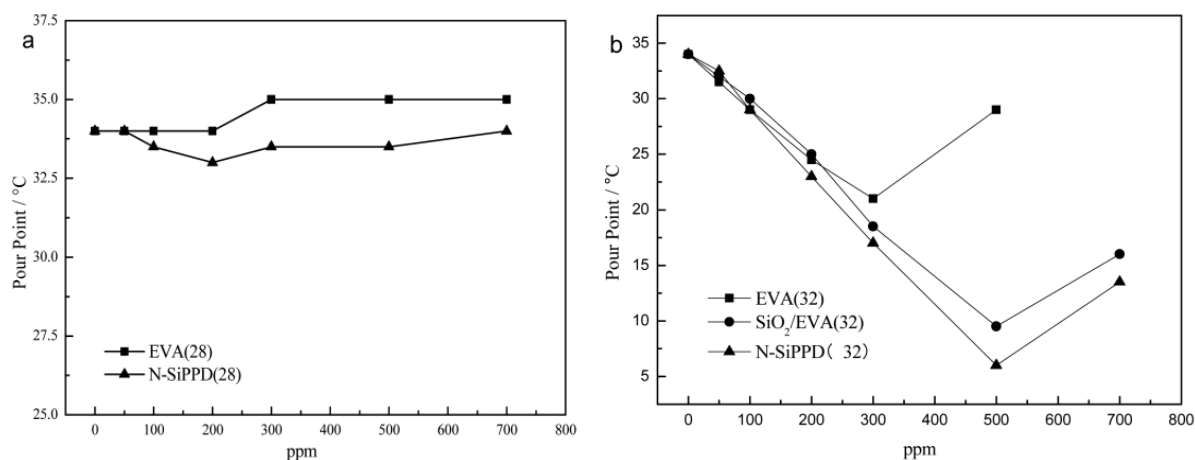


Figure 5 – EVA 28 and EVA 32 pour point of treated oil compared with oil treated by SiO₂-modified EVA nanocomposites

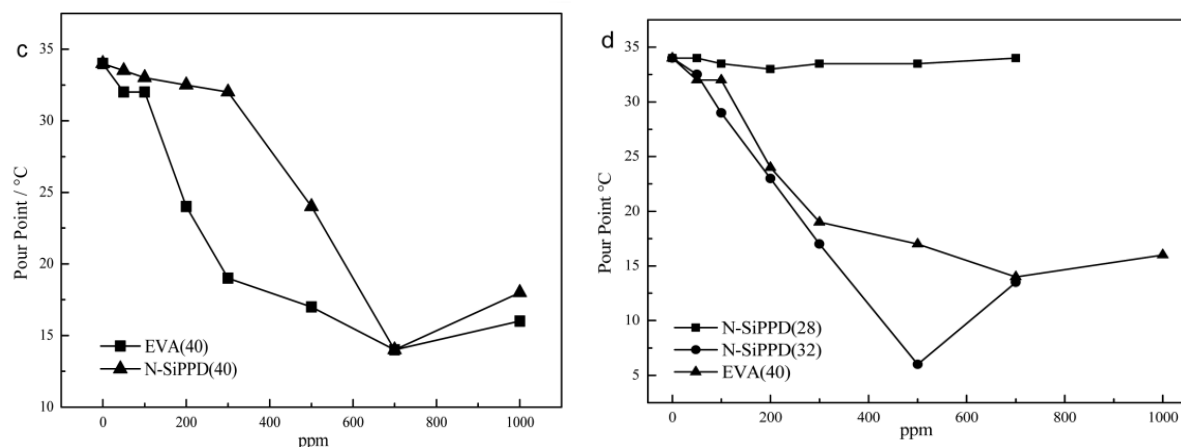


Figure 6 – EVA 40 pour point of treated oil compared with oil treated by SiO₂-modified EVA nanocomposite

Another study used gossypol, a locally available by-product of cottonseed oil processing, to modify EVA [56]. Gossypol can be obtained from soapstock generated during refining, which makes it an attractive low-cost component for the preparation of polymeric PPDs.

The EVA-gossypol composition was prepared by milling the required amounts of the starting components in a laboratory ball mill. The resulting compositions were then tested as pour point depressants.

A proposed structure of the EVA-gossypol composition is shown in Figure 7.

The crude oil used in this study was obtained from the Akshabulak field. After treatment with 50 – 500 ppm of the PPD, the main oil parameters were measured.

Crude oil parameters are listed in Table 14 below.

The initial properties of the crude oil are summarized in Table 14.

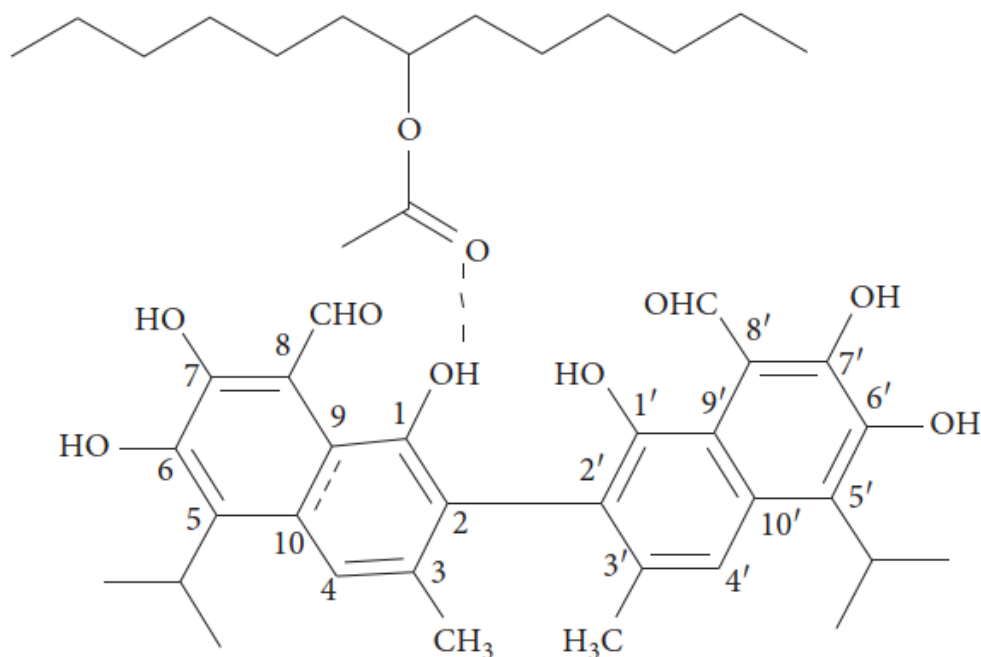


Figure 7 – Possible structure of obtained EVA-gossypol PPD

Table 14 –Parameters of crude oil tested with EVA-gossypol PPD

Property	Value
Density at 20°C (g/cm ³)	0.8427
Wax content (wt%)	17.1
Pour point (°C)	19
Kinematic viscosity (mm ² /s)	218.46

When 500 ppm of the EVA-gossypol composition was used, the pour point decreased from -3 °C to -12 °C. The highest wax-inhibition rate, 89.7%, was achieved at a lower dosage of 200 ppm. These results indicate that EVA modified with polar natural compounds can act as an efficient multifunctional reagent for waxy crude oils.

Table 15 – Pour point of oil treated with EVA and modified EVA-gossypol PPD

Additive concentration (ppm)	Pour point depression (°C) EVAc/CG composition (wt%)					
	EVA	90:10	80:20	75:25	70:30	65:35
50	6	8	8	6	3	1
100	9	11	12	9	4	2
250	8	10	10	11	5	4
500	6	7	7	7	6	4

According to the literature, EVA can also be chemically modified through hydrolysis to form EVA-M, which contains additional hydroxyl groups [52]. These groups increase the polarity of the polymer and may improve its interaction with wax crystals and polar components of crude oil.

The chemical reaction scheme for EVA hydrolysis is shown in Figure 10.

The effectiveness of EVA-M was evaluated using several crude oils from Kazakhstan. The main results are presented in Table 16.

Table 16 – Pour point and inhibition rate of EVA-M for Kyzylorda crude oils

	PP (°C)	m (wax), g	Inhibition degree (%)
Akshabulak			
Untreated	+21	3.6	0
Heat treated	+18	2.48	31.2
EVA-M	0	1.13	68.7
Aschysay			
Crude oil	+24	4.6	0
Heat treated	+21	3.28	28.6
EVA-M	+9	2.01	56.2
Konys-Bektas			
Untreated	+24	4.2	0
Heat treated	+21	3.12	25.8
EVA-M	+3	1.58	62.3
Kumkol			
Untreated	+15	3.4	0
Heat treated	+12	2.11	37.8
EVA-M	-3	0.95	72.0

The data show that EVA-M can provide stronger wax inhibition than unmodified EVA for several oils. For example, in Kumkol crude oil, the wax-inhibition efficiency increased from 58% for EVA to 72% for EVA-M, while the pour point decreased from +12 ° C to -3 ° C. Similar improvements were observed for some other oilfields. These results support the broader conclusion that modification of EVA is a promising route for developing more efficient PPDs for Kazakhstani waxy crude oils.

Conclusion

Polymeric pour point depressants are among the most effective chemical tools for controlling the low-temperature rheological properties of waxy crude oils. Unlike simple dilution or heating, polymeric PPDs act at the level of wax-crystal formation and morphology. They reduce the ability of wax crystals to form rigid networks, decrease the pour point, improve viscosity behavior, and may inhibit wax deposition on cold surfaces. The reviewed data show that EVA-based reagents remain one of the most important industrial classes of PPDs. However, their performance strongly depends on crude-oil composition, polymer molecular weight, vinyl acetate content, polarity, and dosage. Modified EVA systems, including EVA/SiO₂ composites, EVA-gossypol compositions,

hydrolyzed EVA-M, and grafted EVA-based copolymers, can provide higher efficiency than unmodified EVA in selected oils.

Table 17 – Dynamic viscosity at different temperatures of treated oil from the Kyzylorda region

Waxy crude oil	Treatment	Dynamic viscosity (Pa s)	
		10 °C	20 °C
Akshabulak	Heat treatment	1.590	0.071
	EVA-M	0.009	0.004
Aschysay	Heat treatment	1.220	0.095
	EVA-M	0.069	0.027
Konys-Bektas	Heat treatment	4.24	0.084
	EVA-M	0.045	0.012
Kumkol	Heat treatment	0.020	0.005
	EVA-M	0.012	0.002

For Kazakhstan, where paraffinic crude oils create serious transportation problems, further development of modified EVA-based depressant additives is a scientifically and industrially relevant direction. The most promising reagents are those that combine high wax-inhibition efficiency, low effective dosage, compatibility with local crude oils, and economically feasible production technology.

References

- 1 Chala G.T., Sulaiman S.A., Japper-Jaafar A. Flow start-up and transportation of waxy crude oil in pipelines: a review // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2018. – Vol. 251. – P. 69–87.
- 2 Zhang F., Ouyang J., Feng X., Zhang H., Xu L. Paraffin deposition mechanism and paraffin inhibition technology for high-carbon paraffin crude oil from the Kazakhstan PK oilfield // *Petroleum Science and Technology*. – 2014. – Vol. 32, № 4. – P. 488–496.
- 3 Nadirov K.S., Zhantasov M.K., Marenov B.T., Bimbetova G.Z., Orynbasarov A.K., Shukhanova Z.K. Obtaining high-paraffin-content oil depressants // *Chemical Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 44, № 2. – P. 310–317.
- 4 Sayakhov B.K., Aldyarov T.K., Diduh A.G., Guzov S.Y., Sadykova G.D., Sigitov V.B. Investigation of wax precipitation in pipeline of Pavlodar-Shymkent // *Oil Gas Journal (Kazakhstan)*. – 2004. – № 4. – P. 99–106.
- 5 Gluyas J.G., Underhill J.R. The Staffa Field, Block 3/8b, UK North Sea // *Geological Society, London, Memoirs*. – 2003. – Vol. 20, № 1. – P. 327–333.
- 6 El-Dalatony M., Jeon B.-H., Salama E.-S., Eraky M., Kim W., Wang J. Occurrence and characterization of paraffin wax formed in developing wells and pipelines // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, № 6. – Art. 967.
- 7 Huang Z., Lee H.S., Senra M., Fogler H.S. A fundamental model of wax deposition in subsea oil pipelines // *AIChE Journal*. – 2011. – Vol. 57, № 11. – P. 2955–2964.
- 8 Тертерян Р.А., Башкатова С.Т. Депрессорные присадки к дизельным топливам. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1987. – 66 с.
- 9 Wang K.S., Wu C.H., Creek J.L., Shuler P.T., Tang V. Wax deposition behavior in crude oil systems // *Journal of Petroleum Science and Technology*. – 2003. – Vol. 21. – P. 359–366.
- 10 Xu J., Qian H., Xing S., Li L., Guo X. Synthesis of poly(maleic acid alkylamide-co-olefin-co-styrene) copolymers and their effect on the yield stress and morphology of waxy gels with asphaltenes // *Energy and Fuels*. – 2011. – Vol. 25. – P. 573–579.

- 11 Frohlich A., Rice B. Natural additives for wax control // *Industrial Crops and Products*. – 2005. – Vol. 21, № 1. – P. 25–30.
- 12 Atta M.A., Al-Shafey H.I., Ismail E.A. Influence of ethylene acrylic alkyl ester copolymer wax dispersants on the rheological behavior of Egyptian crude oil // *Journal of Dispersion Science and Technology*. – 2011. – Vol. 32. – P. 1296–1305.
- 13 Al-Shafey H.I., Hashem A.I., Abdel Hameed R.S., Dawood E.A. Studies on the influence of long chain acrylic esters copolymers grafted with vinyl acetate as flow improver additives of crude oils // *Advances in Applied Science Research*. – 2011. – Vol. 2, № 5. – P. 476–489.
- 14 Paso K.G. Paraffin Gelation Kinetics: PhD Dissertation. – Ann Arbor: University of Michigan, 2005.
- 15 Merino-Garcia D., Margarone M., Correria S. Kinetics of waxy gel formation from batch experiments // *Energy and Fuels*. – 2007. – Vol. 21. – P. 1287–1295.
- 16 Li W., Li H., Da H., Hu K., Zhang Y., Teng L. Influence of pour point depressants on wax deposition: a study on wax deposit characteristics and pipeline pigging // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 217. – Art. 106817.
- 17 Makhmotov E.S., Sagitov V.B., Ismurzin O.B., Kondratiyev V.V. Physical-chemical and rheological parameters of crude oils of Kazakhstan Republic. – Almaty: Zhibek Zoly, 2008.
- 18 Kozhabekov S.S., Zhubanov A.A., Toktarbay Z. Study the rheological properties of waxy oil with modified pour point depressants for the South Turgai oil field in Kazakhstan // *Oil and Gas Science and Technology – Revue IFP Energies nouvelles*. – 2019. – Vol. 74. – P. 28.
- 19 Southgate J. Wax removal using pipeline pigs: thesis. – Durham: Durham University, 2004.
- 20 Rehan M., Nizami A.-S., Taylan O., Al-Sasi B.O., Demirbas A. Determination of wax content in crude oil // *Petroleum Science and Technology*. – 2016. – Vol. 34, № 9. – P. 799–804.
- 21 Ghannam M.T., Hasan S.W., Abu-Jdayil B., Esmail N. Rheological properties of heavy and light crude oil mixtures for improving flowability // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 81. – P. 122–128.
- 22 Rønningsen H.P. Rheological behavior of gelled waxy North Sea crude oils // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 1992. – Vol. 7, № 3. – P. 177–213.
- 23 Visintin R.F.G., Lapasin R., Vignati E., D'Antona P., Lockhart T.P. Rheological behavior and structural interpretation of waxy crude oil gels // *Langmuir*. – 2005. – Vol. 21, № 14. – P. 6240–6249.
- 24 Venkatesan R., Nagarajan N.R., Paso K., Yi Y.B., Sastry A.M., Fogler H.S. The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions // *Chemical Engineering Science*. – 2005. – Vol. 60, № 13. – P. 3587–3598.
- 25 Russell R.J., Chapman E.D. The pumping of 85 °F pour point Assam (Nahorkatiya) crude oil at 65 °F // *Journal of the Institute of Petroleum*. – 1971. – Vol. 57, № 554. – P. 117–128.
- 26 Singh P., Venkatesan R., Fogler H.S. Morphological evolution of thick wax deposits during aging // *AIChE Journal*. – 2001. – Vol. 47, № 1. – P. 6–18.
- 27 Zhang J., Liu X. Some advances in crude oil rheology and its application // *Journal of Central South University*. – 2008. – Vol. 15, Suppl. 1. – P. S288–S292.
- 28 Martínez-Palou R., Mosqueira M.L., Zapata-Rendón B., Mar-Juárez E., Bernal-Huicochea C., Clavel-López J.C., Aburto J. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: a review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 75, № 3–4. – P. 274–282.
- 29 Chi Y., Yang J., Sarica C., Daraboina N. A critical review of controlling paraffin deposition in production lines using chemicals // *Energy and Fuels*. – 2019. – Vol. 33, № 4. – P. 2797–2809.
- 30 Pedersen K.S. Wax precipitation in crude oils // *Energy and Fuels*. – 2003. – Vol. 17, № 2. – P. 321–328.
- 31 Merino-Garcia D., Duenas-Diez M., Gomez S. Risk assessment methodology for flow assurance challenges: the sooner you look at it, the better // *Offshore Technology Conference Paper 22404*. – 2013.
- 32 Zerpa L.E., Sloan E.D., Koh C.A. Hydrate risk assessment and restart procedure optimization offshore using a transient hydrate prediction model // *Offshore Technology Conference Paper 22406*. – Brazil, 2011.

- 33 Merino-Garcia D., Shaw J., Carrier H. Petrophase 2009 panel discussion on standardization of petroleum fractions // *Energy and Fuels*. – 2010. – Vol. 24, № 4. – P. 2175–2177.
- 34 Valinejad R., Solaimany Nazar A.R. An experimental design approach for investigating the effects of operating factors on the wax deposition in pipelines // *Fuel*. – 2013. – Vol. 106. – P. 843–850.
- 35 Hafiz A.A., Khidr T.T. Flow improvers for waxy crude oils // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2007. – Vol. 56. – P. 296–302.
- 36 Patton C.C., Casad B.M. Paraffin deposition from refined wax solvent system // *SPE Journal*. – 1970. – 17 p.
- 37 Chernozhukov N.I. *Oil and Gas Processing Technology. Part 3. Purification and Separation of Petroleum Feedstock, Production of Commercial Petroleum Products*. – Moscow: Chemistry, 1978. – 424 p. (in Russian)
- 38 Zhuze T.P. Migration of oil and gas and phase equilibria in hydrocarbon systems at high pressures. – M.: VINITI, 1969. – 188 p. (in Russian)
- 39 Rebinder P.A. Surface phenomena in dispersed systems. Physicochemical mechanics: selected works. – Moscow: Nauka, 1979. – 384 p. (in Russian)
- 40 Dushechkin A.P., Ivanov V.I., Terteryan R.A., Livshits S.D. Branched copolymers of ethylene with vinyl acetate as depressant additives to diesel fuels. – M.: TsNIITEneftekhim, 1989. – 9 p. (in Russian)
- 41 Al-Shafey H.I., Abdel Hameed R.S., Ismail E.A., El Azabawy O.E. Studies of poly ethylene acrylic acid derivatives as pour point depressants of waxy crude oils // *Organic Chemistry: An Indian Journal*. – 2014. – Vol. 10, № 8. – P. 308–314.
- 42 Englin B.A. et al. Study of the mechanism of action of additives // *Reports of the 2nd international symposium*. – Gale (GDR), 1976. – P. 392–407. (in Russian)
- 43 Ridzuan N., Adam F., Yaacob Z. Evaluation of the inhibitor selection on wax deposition for Malaysian crude oil // *Petroleum Science and Technology*. – 2016. – Vol. 34, № 4. – P. 366–371.
- 44 Grimbergen R., van Hoof P.J.C.M., Meekes H., Bennema P. Morphology of orthorhombic n-paraffin crystals: the influence of multiple connected nets // *Journal of Crystal Growth*. – 1998. – Vol. 191. – P. 846–860.
- 45 Terteryan R.A. Depressant additives for oils, fuels and oils. – M.: Chemistry, 1990. – 240 p. (in Russian)
- 46 Jafari Behbahani T., Golpasha R., Akbarnia H., Dahaghin A. Effect of wax inhibitors on pour point and rheological properties of Iranian waxy crude oil // *Fuel Processing Technology*. – 2008. – Vol. 89. – P. 973–977.
- 47 Orazbekuly Y., Boiko G., Lubchenko N., Dergunov S. Novel high-molecular multifunctional reagent for the improvement of crude oil properties // *Fuel Processing Technology*. – 2014. – Vol. 128. – P. 349–353.
- 48 Machado A.L.C., Lucas E.F. Poly(ethylene-co-vinyl acetate) copolymers as modifiers of oil wax crystallization // *Petroleum Science and Technology*. – 1999. – Vol. 17, № 9–10. – P. 1029–1041.
- 49 Ashbaugh H.S., Guo X., Schwahn D., Prud'homme R.K., Richter D., Fetters L.J. Interaction of paraffin wax gels with ethylene/vinyl acetate copolymers // *Energy and Fuels*. – 2005. – Vol. 19, № 1. – P. 138–144.
- 50 Jafari Ansaroudi H.R., Vafaie-Sefti M., Masoudi S., Behbahani T.J., Jafari H. Study of the morphology of wax crystals in the presence of ethylene-co-vinyl acetate copolymer // *Petroleum Science and Technology*. – 2013. – Vol. 31, № 6. – P. 643–651.
- 51 Taraneh J.B., Rahmatollah G., Hassan A., Alireza D. Effect of wax inhibitors on pour point and rheological properties of Iranian waxy crude oil // *Fuel Processing Technology*. – 2008. – Vol. 89, № 10. – P. 973–977.
- 52 Yao B., Chen W., Li C., Yang F., Sun G., Wang G. Polar asphaltenes facilitate the flow improving performance of polyethylene-vinyl acetate // *Fuel Processing Technology*. – 2020. – Vol. 207. – Art. 106481.

53 Marie E., Chevalier Y., Eydoux F., Germanaud L., Flores P. Control of n-alkanes crystallization by ethylene-vinyl acetate copolymers // Journal of Colloid and Interface Science. – 2005. – Vol. 290. – P. 406–418.

54 Machado A., Lucas E. Poly(ethylene-co-vinyl acetate) copolymers as modifiers of oil wax crystallization // Petroleum Science and Technology. – 1999. – Vol. 17. – P. 1029–1041.

55 Jing G., Sun Z., Tu Z., Bian X., Liang Y. Influence of different vinyl acetate content on the properties of EVA/modified nano-SiO₂ composite PPD // Energy and Fuels. – 2017. – Vol. 31.

56 Marenov B., Nadirov K., Zhantasov M., Nadirov R. Ethylene-vinyl acetate copolymer/crude gossypol compositions as pour point depressants for waxy oil // International Journal of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–7.

Поступила 6 июня 2025 г.

МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

МРНТИ 37.15.21

УДК 550.38 550 343(612.1)

КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Нагорный В.М.

Сумской государственный университет, Сумы, Украина
e-mail: vjacheslav.nagorny@gmail.com

Рассмотрены примеры использования методики прогнозирования работоспособности человека-оператора, применяемой в режиме реального времени на протяжении его рабочей смены. Методика основана на допущении о том, что процесс изменения состояния оператора можно представить как процесс, развивающийся в режиме с обострением. Это позволяет рассматривать информационный сигнал, фиксируемый при контроле электроэнцефалограммы его мозга, как временной ряд, состоящий из двух составляющих. Одна составляющая представляет собой гладкий монотонно изменяющийся тренд. Вторая составляющая является периодически изменяющейся функцией. По результатам аппроксимации временного ряда моделями этих составляющих прогнозируется время работы оператора до усталости, и выделяются характерные участки вариации на протяжении рабочей смены его работоспособности. В статье приведен пример использования методики прогнозирования, подтвердивший ее эффективность.

Ключевые слова: прогнозирование работоспособности оператора, режим с обострением, периодическая составляющая, логопериодическая функция, динамическая система, прогнозная модель, время достижения усталости.

Шынайы уақытта оның жұмыс ауысымында қолданылатын адам-операторының өнімділігін болжау әдістемесін қолдану мысалдары қарастырылған. Әдіс оператор күйінің өзгеру процесі ишеленіскен режимде дамитын процесс ретінде ұсынылуы мүмкін деген болжамға негізделген. Бұл оның миының электроэнцефалограммасын бақылау кезінде жазылған ақпараттық сигналды екі компоненттен тұратын мезгілдік қатар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Бір құрамдас – біркелкі, монотонды өзгертін тренд болып табылады. Екінші – мерзімді түрде өзгертін функция. Мерзімді қатарларды осы құрамдастардың үлгілерімен жуықтау нәтижелері бойынша оператордың шаршағанға дейінгі жұмыс уақыты болжанады және оның өнімділігінің барлық жұмыс ауысымындағы вариацияның сипаттамалық аймақтары анықталады. Мақалада болжау техникасын қолданудың тиімділігін растайтын мысал келтірілген.

Түйінді сөздер: оператордың өнімділігін болжау, ишеленіскен режим, мерзімді құрамдас, логомерзімді функция, динамикалық жүйе, болжамды модель, шаршау уақыты.

Examples of the use of a method for predicting the performance of a human operator, applied in real time during his work shift, are considered. The method is based on the assumption that the process of changing the operator's state can be represented as a «blow-up» process. This allows us to consider the information signal recorded during monitoring of the electroencephalogram of his brain as a time series consisting of

two components. One component is a smooth monotonically changing trend. The second component is a periodically changing function. Based on the results of approximating the time series with models of these components, the operator's work time before fatigue is predicted, and characteristic areas of variation in his performance are identified during the work shift.

Keywords: *predicting operator performance, mode with «blow-up» periodic component, log-periodic function, dynamic system, predictive model, time to fatigue.*

Введение

Труд как особая форма взаимодействия человека с окружающей природой является исключительным достоянием человека. Под влиянием труда происходят формирование и совершенствование способностей работающего человека, создающего материальные и культурные ценности.

Труд в полной мере стал основным определяющим фактором жизнедеятельности большинства трудоспособного населения. Будучи многосторонним явлением, труд с социально-экономической точки зрения выступает как создатель и мера материальных ценностей, с научной стороны труд – важная форма взаимодействия человека с окружающей средой и целесообразной коллективной деятельностью.

Специальный раздел гигиены труда (физиологии), изучает изменения функционального состояния организма человека под влиянием трудовой деятельности с целью разработки и обоснования профилактических мероприятий по оптимизации трудового процесса, способствующих поддержанию высокой работоспособности и сохранения здоровья человека.

Исследования в области физиологии труда развиваются по двум направлениям. Во-первых, это изучение общих физиологических закономерностей в процессе трудовой деятельности; во-вторых, изучение конкретных видов труда с целью рационализации (научной организации) трудового процесса. Физиология труда при решении прикладных вопросов использует данные тех областей знаний, которые определяют общую организацию производства. Это связано с тем, что любое мероприятие физиологического характера может стать фактором повышения работоспособности человека и улучшения его функционального состояния только при правильном применении технологических, технических, организационных и других средств производства.

Задачи физиологии труда охватывают широкий круг вопросов, включающий:

- изучение физиологических закономерностей различных видов труда;
- исследование физиологических механизмов динамики работоспособности (устомления) человека в производственных условиях;
- оценку тяжести и напряженности трудового процесса;
- разработку физиологических основ научной организации труда, а именно, оптимизация рабочих движений, рабочей позы, организации рабочего места, ритма труда, режима труда и внутрисменного отдыха;

Цель данной работы – рассмотрение метода прогнозирования в режиме реального времени работоспособности человека-оператора. Для контроля степени критичности состояния человека метод использует регистрируемую в онлайн режиме электроэнцефалограмму (ЭЭГ) оператора. При этом для количественной оценки степени изменения работоспособности оператора основываются на представлении оператора, как «blow-up» динамической системы.

Обзор литературы

Необходимым условием современного этапа развития системно-количественной физиологии целостного организма, как научного направления физиологии человека, является разработка новых совершенных методов количественного анализа функционального состояния организма человека-оператора. Это дает возможность своевременно осуществлять диагностику и прогнозирование состояний человека и проводить мероприятия по охране и восстановлению его здоровья. При этом особое значение имеет прогнозирование работоспособности человека-оператора в опасных и ответственных профессиях (например, авиационных диспетчеров, операторов атомных станций, пилотов, машинистов, судоводителей и т.д.) [1].

Профессиональная деятельность в таких областях требует высокой степени концентрации, внимательности и способности быстро принимать решения в условиях стресса. Ошибки, допущенные из-за снижения работоспособности или усталости оператора, могут иметь катастрофические последствия, как для самого человека, так и для окружающих [2].

Современные исследования показывают, что работоспособность оператора подвержена влиянию многих факторов, таких как психофизиологическое состояние, режим сна и отдыха, уровень стресса, возрастные и индивидуальные особенности организма, а также особенности профессиональной среды [3]. В связи с этим, разработка методов прогнозирования уровня работоспособности становится важным направлением для предотвращения аварий и чрезвычайных ситуаций.

Это определяет задачу физиологического нормирования, включающего необходимость выявления различных уровней активности физиологических функций, наличие резервов регуляции, их характеристики, тактики использования и т.д. Разработка автоматизированных систем мониторинга предсменного (предрабочего) контроля и систем постоянного внутрисменного текущего контроля уровня работоспособности и/или функционального состояния организма каждого работника, независимо от вида его деятельности, представляет конкретную цель для физиологов труда. Создание таких систем с обратной связью позволяет своевременно устанавливать неблагоприятные физиологические изменения, проводить профилактические меры и тем самым предупреждать не только нарушения состояния здоровья, но и возможность возникновения аварийных ситуаций и травматизма.

Актуальным в физиологии труда является также направление, связанное с возможностью коррекции функционального организма человека различными традиционными и нетрадиционными методами. Отсутствие научно обоснованных рекомендаций по их организации, оснащению и функционированию может привести к значительному снижению или отсутствию положительного эффекта. Апробация и последующее внедрение различных средств коррекции функционального состояния должны проводиться с учетом вида, специфики трудовой деятельности, индивидуальных особенностей и состояния здоровья.

Традиционные подходы к оценке работоспособности включают субъективные и объективные методы, такие как самооценка, мониторинг физиологических параметров, в частности активности мозга [4]. Изучение активности мозга, путем, например, онлайн контроля его электроэнцефалограммы (ЭЭГ), открывает новые перспективы для разработки более точных и персонализированных прогнозов работоспособности человека-оператора в рабочих условиях [5].

Работоспособность – величина динамическая и может изменяться в течение рабочего дня, смены или в зависимости от индивидуальных биоритмов оператора [6].

Важно учитывать не только текущий уровень работоспособности, но и его динамику. Работоспособность оценивается различными показателями, в частности результатом самого труда по производительности, эффективности, скорости работы, экспертной оценке профессиональной деятельности, а также по показателям, отражающим функциональное состояние человека [7]. Работоспособность в процессе трудовой деятельности имеет несколько фаз или сменяющих друг друга состояний человека. Первой из них является фаза «вработываемости», или нарастающий период работоспособности.

Следующий период – фаза высокой устойчивости работоспособности, определяется стабильной устойчивой деятельностью при оптимальном адекватном энергетическом обеспечении [8]. Период высокой устойчивой работоспособности сменяет фаза снижения работоспособности, которая свидетельствует о развитии утомления в регулирующих звеньях, ухудшении энергетики организма и т.д. Фазная динамика изменения работоспособности характерна как для первой половины рабочего дня (т.е. до обеда), так и для второй – после обеденного перерыва до конца смены [9].

Во второй половине рабочего дня фаза вработываемости короче по времени, фаза устойчивой работоспособности несколько ниже по уровню и менее длительная, а фаза снижения работоспособности наступает раньше, развивается быстрее и более выражено его снижение по сравнению с первой половиной смены. Иногда в конце смены, за 20—30 мин до ее окончания, отмечается кратковременное повышение работоспособности, названное «конечным порывом».

Таким образом, трудовая деятельность человека осуществляется, прежде всего, за счет формирования динамических мозговых систем, определяющих совокупность психических процессов, разнообразные двигательные акты, усиленную работу систем жизнеобеспечения организма и обеспечивающих оптимальную их координацию в достижении конечной цели [10].

Современные системы мониторинга физиологических параметров (например, частоты сердечных сокращений, уровня кортизола, мозговой активности) позволяют отслеживать уровень работоспособности в режиме реального времени. Это дает возможность своевременно предупреждать оператора о необходимости отдыха или коррекции поведения для предотвращения ошибок [11].

Идея «blow-up» систем предложена в [12] и подробно изложена в [13]. Суть идеи заключается в представлении контролируемого сигнала, характеризующего состояние динамической «blow-up» системы, как сумму монотонно изменяющегося тренда и накладывающихся на него лог-периодических колебаний.

$$A_{\text{СУМ}} = A_{\text{ТР}} + A_{\text{ПВР}} \quad (1)$$

Модель тренда $A_{\text{ТР}}$ (2) содержит четыре неизвестных: A , B , T , α .

$$A_{\text{ТР}} = A + B \cdot (T - t)^\alpha. \quad (2)$$

Периодическая составляющая $A_{ПЕР}$ выделяется из контролируемого сигнала (1), посредством применения «быстрого» алгоритма экстремальной фильтрации [14] (выражение (3)).

$$A_{ПЕР} = -0.25 A_{СУМ-1} + 0.5 A_{СУМ} - 0.25 A_{СУМ+1} . \quad (3)$$

Периодическая составляющая $A_{ПЕР}$ описывается моделью (4) так же с четырьмя неизвестными параметрами: ω , φ , T , C :

$$A_{ПЕР} = C \cdot \cos(\omega \cdot \ln(T - t) - \varphi) , \quad (4)$$

Главным из этих неизвестных является общее для обеих моделей время T , называемое моментом обострения. По мере приближения текущего времени t ко времени T выражение в скобках в (2) и (4) стремится к нулю. На практике это означает, что состояние системы, функционирующей в «blow-up» режиме, истощая свой ресурс, стремится к критическому состоянию, сопровождающемуся разрушением или радикальным изменением закона своего развития [12]. Применительно к человеку-оператору приближение времени работы t ко времени T эквивалентно истощению ресурса человеческого организма, что приводит к падению его работоспособности человека до уровня, не позволяющего качественно в соответствии с квалификационными требованиями выполнять производственное задание.

Согласно методике, время T рассчитываются при минимизации разницы U (5) между экспериментально определяемым трендом ЭЭГ (сигналом $A_{СУМ}$ (1)) и расчетными значениями моделей (2) и (4).

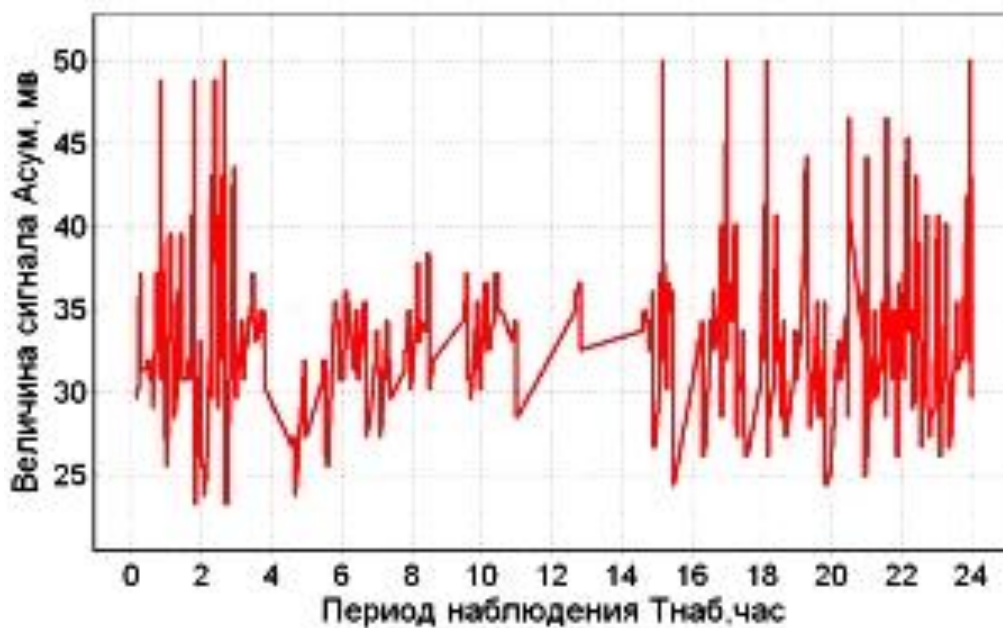
$$U = \sum_{i=1}^n (A_{СУМ} - A_{ТР} - A_{ПЕР})^2 \Rightarrow \min . \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

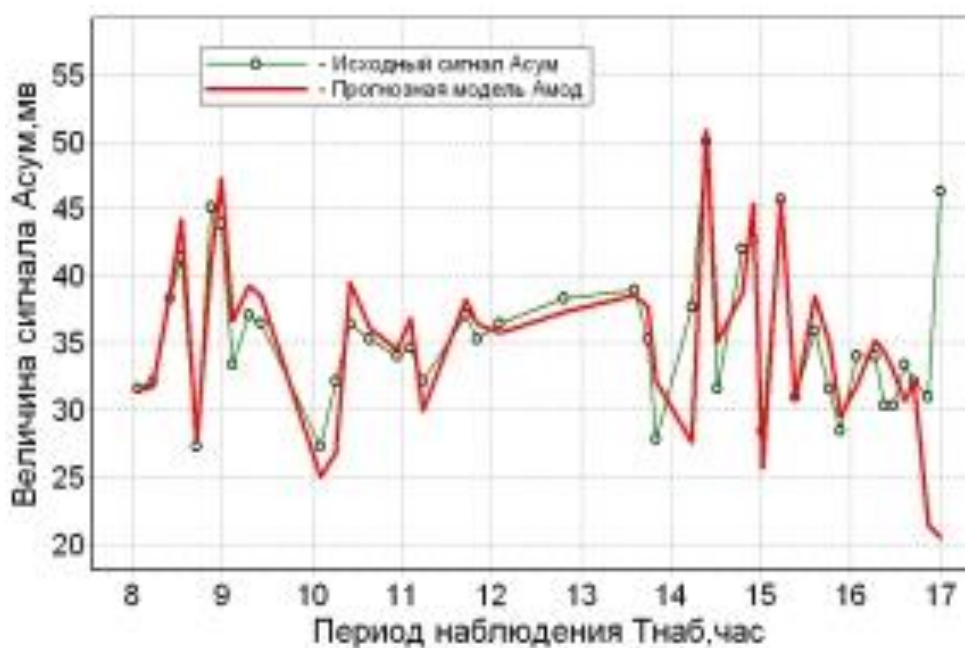
Целью экспериментальных исследований было определение возможности использования определяемого в режиме онлайн сигнала ЭЭГ для оценки надежности работы оператора, как ключевого и ответственного производственного звена.

При анализе сигнала ЭЭГ ставилась задача по выявлению вариации работоспособности оператора на протяжении смены при выполнении ответственного производственного задания.

График ЭЭГ, полученный по результатам дистанционных измерений сигнала, генерируемого мозгом человека-оператора, приведен на рисунке 1 а).



А



Б

Рисунок 1 – Электроэнцефалограмма человека-оператора: А – исходная ЭЭГ;
Б – аппроксимация ЭЭГ прогнозной моделью Амод

При обработке ЭЭГ, посредством минимизации функционала U (5), выполненной с помощью компьютерной программы, выявлялись характерные для оператора вариации его работоспособности (рисунок 2).

Как следует из рисунка 2, смена начиналась с участка «вработываемости» длительностью 1 час, в течении которого (к 9-ти часам) уровень работоспособности позволял качественно работать до 15 часов дня. Преодолев в районе 11 часов «предобеденный» спад

работоспособности, в послеобеденное время оператор вышел на уровень работоспособности, обеспечивающий выполнение производственного задания, в среднем, до 18 часов дня. Далее оператор испытал типовую «усталость в конце смены», сопровождавшуюся кратковременным подъемом работоспособности – «конечным порывом».

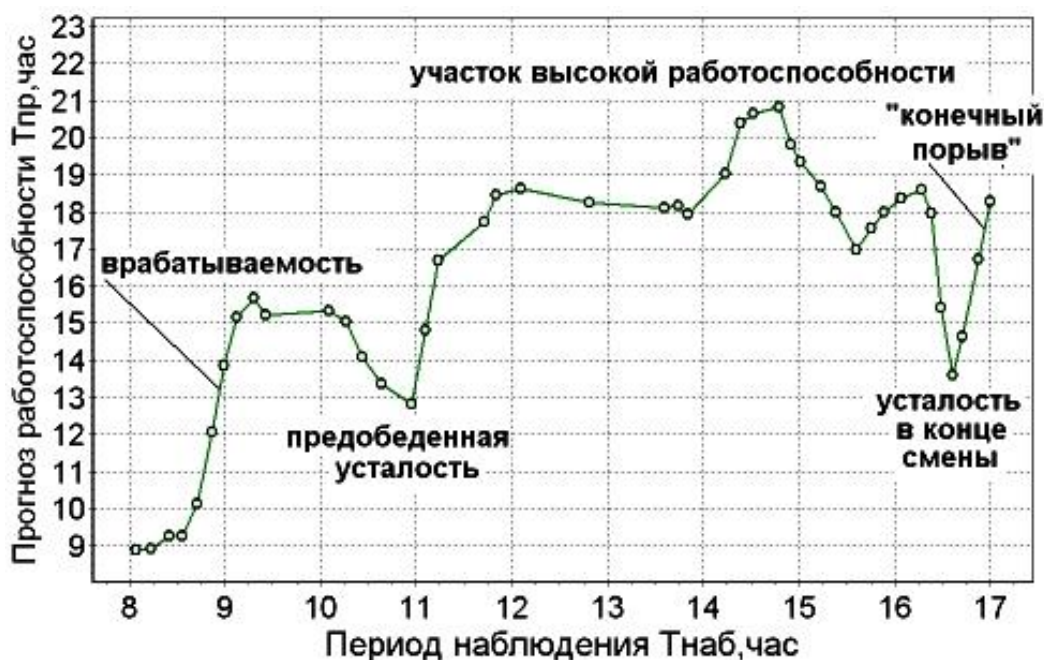


Рисунок 2 – Прогноз вариация работоспособности оператора на протяжении рабочей смены

Ниже приводится «Протокол...», документирующий результаты контроля работоспособного состояния оператора при окончании смены на участках: «усталости в конце смены» и «конечного порыва».

ПРОТОКОЛ прогноза работоспособности оператора

```
=====
||   Время прогноза   ||
||   16.21 час       ||
=====
```

ПРОГНОЗ:

Прогноз наиболее вероятной длительности работы до усталости составляет:
15.24 час
и изменяется с доверительной вероятностью $P=0.95$ в следующих границах:
от 15.12 до 15.37 час

```
=====
||   Время прогноза   ||
||   16.31 час       ||
=====
```

ПРОГНОЗ:

Прогноз наиболее вероятной длительности работы до усталости составляет:
13.31 час
и изменяется с доверительной вероятностью $P=0.95$ в следующих границах:
от 13.11 до 13.42 час

=====

	Время прогноза	
	16.47 час	

=====

ПРОГНОЗ:

Прогноз наиболее вероятной длительности работы до усталости составляет:
16.23 час
и изменяется с доверительной вероятностью $P=0.95$ в следующих границах:
от 16.21 до 16.25 час

=====

	Время прогноза	
	17.00 час	

=====

ПРОГНОЗ:

Прогноз наиболее вероятной длительности работы до усталости составляет:
18.24 час
и изменяется с доверительной вероятностью $P=0.95$ в следующих границах:
от 18.12 до 18.30 час

Таким образом, приведенные выше результаты контроля вариации сигнала ЭЭГ в режиме реального времени являются достаточно наглядными, позволяющими следить за изменением работоспособности человека-оператора на протяжении всей рабочей смены. Это свидетельствует об эффективности рассмотренной методики прогнозирования работоспособного состояния человека в процессе выполнения им производственного задания.

Выводы

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что действующие методы контроля по электроэнцефалограмме работоспособности оператора усовершенствован, во-первых, ЭЭГ рассматривается, как временной ряд и, во-вторых, этот ряд анализируется в предположении о том, что поведение оператора в производственной среде правомерно рассматривать, как поведение «blow-up» системы.

Практическая значимость полученных результатов открывает новые перспективы для разработки более точных и персонализированных прогнозов момента нарушения работоспособности человека-оператора, как наиболее критичного элемента производственной системы.

Перспективами дальнейших исследований является дальнейшее изучение возможности использования разработанной методики для прогнозирования работоспособности оператора в режиме реального времени, осуществляемого непосредственно в опасных для оператора рабочих условиях.

Литература:

1. Губин В.А., Самсонов В.Г. Контроль работоспособности операторов сложных систем: методы и технологии // Психофизиология и охрана труда. – 2019. – 2(34). – 145–152.
2. Хмелевский Н.Л. Методы оценки и прогнозирования психофизиологического состояния человека-оператора в критических видах деятельности // Авиационная психология и безопасность полетов. – 2017. – 3(29). – 84-97.
3. Helton W.S., Warm J.S. Signal detection theory and workload: Examining the effects of signal salience on performance. // Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. – 2014. – 56(1). – P.104-115.
4. Matthews G., Hancock P.A., Desmond P.A. A cognitive science approach to operator fatigue // Ergonomics in Design. – 2017. – 5(1). – P. 6–13.
5. Wickens C.D. Processing resources and attention // Human Performance in High-Stress Environments. – 2019. – P. 39-60.
6. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования энергетических систем Ленинград «Наука» 1982 с.268.
7. Фокин Ю.Г. Оператор технических средств: обеспечение надежности. М.: Воениздат, 1985. 192 с.
8. Миллер Д.Ю., Суэйн А. Ошибки человека и его надежность / Человеческий фактор. Под ред. Г.Сальвенди. Т. 1. М.: Мир, 1991. С. 360–417.
9. Woodson E. Human factors design handbook. New York: McGraw-Hill. 1981.
10. Щебланов В.Ю., Бобров А.Ф. Надежность деятельности человека в автоматизированных системах и ее количественная оценка // Психологический журнал. 1990. № 3. С. 60–69.
11. Бодров В.А., Орлов В.Я. Психология и надежность: человек в системах управления техникой / РАН. ин-т психологии. - М., 1998. - 285 с.: табл.
12. Подлазов А.В. Режимы с обострением с комплексными показателями. Лог-периодические колебания в модели разрыва пучка волокон // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2009. – № 35.
13. Nahorny V. Monitoring vibrations and disturbances in industry and nature. – Springer Nature Switzerland AG. 2024.–105 с. ISBN 978-3-031-62189-5, ISBN 978-3-031-62190-1, (e-Book), <https://doi.org/10.1007/978-3-031-62190-1>.
14. Мясникова Н.В. «Быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации // Известия высших учебных заведений. Поволжье. Технические науки, 2020. – Т. 53, № 1. – С. 70–77. DOI: 10.21685/2072-3059-2020-1

References:

1. Gubin V.A., Samsonov V.G. Monitoring the Performance of Complex System Operators: Methods and Technologies. – Psychophysiology and Labor Protection. – 2019. – 2(34). – P.145–152.

2. Khmelevsky N. L. Methods for Assessing and Predicting the Psychophysiological State of a Human Operator in Critical Activities // Aviation Psychology and Flight Safety. – 2017. – 3(29). – 84–97.
3. Helton W.S., Warm J.S. Signal Detection Theory and Workload: Examining the Effects of Signal Salience on Performance // Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. – 2014. – 56(1). – P. 104–115.
4. G. Matthews, P. A. Hancock, P. A. Desmond. "A Cognitive Science Approach to Operator Fatigue." Ergonomics in Design, 2017, 5(1): 6-13.
5. Wickens C.D. "Processing resources and attention." Human Performance in High-Stress Environments, 2019: 39-60.
6. Gubinsky A.I. Reliability and quality of functioning of energy systems – Leningrad: Science, 1982. – p. 268.
7. Fokin Yu.G. Operator of technical means: ensuring reliability. Moscow: Voenizdat, 1985. –192 p.
8. Miller D.Yu., Swain A. Human errors and reliability / Human factor. Ed. G. Salvendi. Vol. 1. Moscow: Mir, 1991. Pp. 360–417.
9. Woodson E. Human factors design handbook. New York: McGraw-Hill. 1981.
10. Shcheblanov V. Yu., Bobrov A. F. Reliability of human activity in automated systems and its quantitative assessment // Psychological journal. 1990. No. 3. Pp. 60–69.
11. Bodrov V.A., Orlov V.Ya. Psychology and reliability: man in technology control systems / RAS. Institute of Psychology. – Moscow, 1998. – 285 p.
12. Podlazov A.V. Regimes with exacerbation with complex indicators. Log-periodic oscillations in a fiber bundle rupture model // Preprints of the Keldysh Institute of Problems of Materials Science. – 2009. – No. 35.
13. Nahorny V. Monitoring vibrations and disturbances in industry and nature. Springer Nature Switzerland AG. 2024. - 105 p. ISBN 978-3-031-62189-5, ISBN 978-3-031-62190-1, (e-Book), <https://doi.org/10.1007/978-3-031-62190-1>.
14. Myasnikova N. V. "Fast" algorithm for extreme filtering // News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences, 2020. – Vol. 53, No. 1. – P. 70–77. DOI: 10.21685/2072-3059-2020-1

Поступила 14 ноября 2024 г.

SRSTI 44.01.85

UDC 004.94:621.311

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A DIGITAL POWER PLANT TRAINING SIMULATOR BASED ON C++ AND UNREAL ENGINE 5 (A CASE STUDY OF THE KAPCHAGAY HYDROELECTRIC POWER PLANT)

Tsoy A.A., Shepovalov D.P., Yevstifeyev* V.N.

JSC "Institute "KazNIPIEnergoprom", Almaty, Kazakhstan
e-mail: yvladimirn@gmail.com

This paper examines the development and application of the Power Plant Simulator software suite designed for training and drilling operational personnel at energy facilities. The relevance of the study is driven by workforce shortages and increasing safety requirements for plant operation, under which traditional training methods do not provide sufficient practice in emergency and off-normal modes. The objective of the research is to create a digital training simulator that enables realistic real-time reproduction of power plant processes and provides a user-friendly human – machine interface. The methodological framework includes analysis of international experience and standards in simulator-based training, mathematical modeling of power plant processes, 3D modeling of equipment, and experimental verification through scenario-based testing. The solution architecture is implemented as a modular system with a C++ computational core and a visualization subsystem integrated with Unreal Engine 5, providing photorealistic graphics while maintaining interactivity. As a pilot case, a digital twin of a hydro unit at the Kapchagay Hydropower Plant was developed, including detailed models of the turbine, generator, auxiliary systems, the machine hall, and the control console. Verification of model adequacy demonstrated small deviations of key parameters from reference data: in nominal operation, the power discrepancy was within a few percent, while for transient processes (e.g., water hammer during rapid closure of the wicket gates) the deviation was on the order of up to 5%. The system supports training in basic operations, drilling of procedure-based actions in emergency modes, qualification assessment, and scenario-based sessions with logging of trainee actions. In addition, the results show that a purely software implementation without specialized hardware control panels reduces deployment barriers and improves scalability for educational institutions and industrial enterprises. Recommendations are provided for deploying domestic digital simulators to enhance training effectiveness, ensure knowledge continuity, and attract young specialists to the power sector.

Keywords: digital training simulator; power engineering; operational personnel training; hydropower plant; mathematical modeling; 3D visualization; emergency modes; model verification; human – machine interface.

В статье рассматривается разработка и применение программного комплекса Power Plant Simulator, предназначенного для обучения и тренировки оперативного персонала энергетических объектов. Актуальность работы обусловлена кадровым дефицитом и ростом требований к безопасности эксплуатации, при которых традиционные методы обучения не обеспечивают

достаточной практики аварийных и нештатных режимов. Цель исследования состоит в создании цифрового тренажёра, обеспечивающего реалистичное воспроизведение процессов электростанции в реальном времени и удобный для пользователя человеко-машинный интерфейс. Методологическая основа включает анализ мирового опыта и стандартов симуляторного обучения, математическое моделирование процессов энергоустановок, 3D-моделирование оборудования и экспериментальную верификацию сценариями. Архитектура решения реализована как модульная система с вычислительным ядром на C++ и подсистемой визуализации, интегрированной с Unreal Engine 5, что обеспечивает фотореалистичную графику при сохранении интерактивности. В качестве пилотного объекта создан цифровой двойник гидроагрегата Капчагайской ГЭС, включая детализированные модели турбины, генератора, вспомогательных систем, машинного зала и пульта управления. Верификация адекватности показала малые отклонения ключевых параметров от справочных данных: для номинального режима расхождение мощности составило менее нескольких процентов, а для переходных процессов (например, гидроудар при быстром закрытии направляющего аппарата) – порядка до 5%. Комплекс поддерживает обучение базовым операциям, отработку действий по регламентам в аварийных режимах, оценку квалификации и сценарное занятие с регистрацией действий обучаемого. Дополнительно показано, что программная реализация без специализированных аппаратных пультов снижает барьеры внедрения и повышает масштабируемость решения для учебных организаций и предприятий. Сформулированы рекомендации по внедрению отечественных цифровых тренажёров для повышения эффективности подготовки кадров, обеспечения преемственности знаний и привлечения молодых специалистов в отрасль.

Ключевые слова: цифровой тренажёр; энергетика; подготовка оперативного персонала; гидроэлектростанция; математическое моделирование; 3D-визуализация; аварийные режимы; верификация модели; человеко-машинный интерфейс.

Мақалада энергетикалық нысандардың жедел персоналын оқыту және жаттықтыру үшін арналған Power Plant Simulator бағдарламалық кешенін әзірлеу және қолдану қарастырылады. Жұмыстың өзектілігі кадр тапшылығының байқалуымен және пайдалану қауіпсіздігіне қойылатын талаптардың артуымен айқындалады, мұндай жағдайда дәстүрлі оқыту әдістері авариялық және штаттан тыс режимдерді жеткілікті деңгейде практикалық нысықтауды қамтамасыз етпейді. Зерттеудің мақсаты – электр станциясы процестерін нақты уақыт режимінде шынайы түрде қайта өндіретін және пайдаланушыға ыңғайлы адам–машина интерфейсін ұсынатын цифрлық тренажер құру. Әдіснамалық негізі симуляторлық оқыту бойынша әлемдік тәжірибе мен стандарттарды талдауды, энергоқондырғылар процестерін математикалық модельдеуді, жабдықтың 3D-модельдеуін және сценарийлер арқылы эксперименттік верификацияны қамтиды. Шешім архитектурасы C++ тіліндегі есептеу ядросы және Unreal Engine 5-пен интеграцияланған визуализация ішкіжүйесі бар модульдік жүйе ретінде іске асырылған, бұл интерактивтілікті сақтай отырып фотореалистік графиканы қамтамасыз етеді. Пилоттық объект ретінде Қапчағай ГЭС-інің гидроагрегатының цифрлық егізі әзірленді, оған турбина, генератор, қосалқы жүйелер, машина залы және басқару пультінің егжей-тегжейлі модельдері енгізілді. Адекваттылықты верификациялау негізгі параметрлердің анықтамалық деректерден аз ғана ауытқуын көрсетті: номиналдық режим үшін қуат бойынша айырмашылық бірнеше пайыздан аспады, ал өтпелі процестер үшін (мысалы, бағыттаушы аппаратты жылдам жабу кезіндегі гидроудар) – шамамен 5%-ға дейін болды. Кешен негізгі операцияларды оқытуды, авариялық режимдерде регламенттер бойынша әрекеттерді нысықтауды, біліктілікті бағалауды және оқушының әрекеттерін тіркеумен сценарийлік сабақ өткізуді қолдайды. Сонымен қатар, мамандандырылған аппараттық пультерсіз бағдарламалық іске асыру енгізу кедергілерін төмендетіп, оқу ұйымдары мен кәсіпорындар үшін шешімнің масштабталуын арттыратыны көрсетілді. Кадр даярлаудың тиімділігін көтеру, білімнің сабақтастығын қамтамасыз ету және

салаға жас мамандарды тарту мақсатында отандық цифрлық тренажерлерді енгізу бойынша ұсынымдар тұжырымдалды.

Түйінді сөздер: *цифрлық тренажер; энергетика; жедел персоналды даярлау; гидроэлектр станциясы; математикалық модельдеу; 3D-визуализация; авариялық режимдер; модельді верификациялау; адам–машина интерфейсі*

Introduction

The power industry is experiencing an acute need for modern workforce training methods. Traditional approaches to training are increasingly being replaced by digital simulators capable of interactively reproducing the operation of energy facilities. This paper examines the development and application of the “Power Plant Simulator” computer program – a digital power plant simulator developed by the KazNIPIEnergoprom Institute and intended for training operational personnel. An analysis of the literature and existing solutions shows that full-scope simulators with a realistic human – machine interface are widely recognized worldwide as an effective tool for personnel training [1]. The paper describes the study objectives and object, the methodology for creating a digital power plant model (using a hydro unit as an example), and its integration with a modern graphics engine. Early prototypes demonstrated high model fidelity, with minimal deviations from reference calculation data. The simulator enables real-time visualization of equipment operation and allows personnel to rehearse actions under both normal and emergency conditions. Based on the research results, recommendations are formulated for implementing such simulators at domestic energy facilities to improve training efficiency, ensure continuity of knowledge transfer, and promote the industry among young specialists.

Electric power engineering is one of the fundamental sectors underpinning the functioning of the modern economy and society. Reliable and safe operation of power plants is directly determined by the qualifications of operational personnel. In recent years, however, many countries have faced a shortage of experienced staff in the energy sector. In Kazakhstan and Russia, engineers and operators of the older generation are gradually retiring, while the inflow of young specialists is not sufficiently rapid. According to industry studies, energy companies are now confronted with a dual challenge: on the one hand, they must maintain a high level of qualification among existing personnel to ensure the safe operation of current power systems; on the other hand, they must prepare staff to address future tasks amid technological change [2-4]. This workforce challenge is also relevant for the national power sector.

At the same time, requirements for safety and efficiency in the operation of energy facilities continue to increase. Even minor operator errors can lead to serious disruptions and accidents; therefore, high-quality personnel training is a key prerequisite for power system reliability. Traditional training methods – on-the-job apprenticeship based on “observe and remember,” as well as learning from textbooks and lectures – no longer fully meet modern requirements [5, 6]. First, such approaches are time-consuming and often do not allow trainees to practice off-normal situations without risking equipment. Second, the new generation of specialists perceives information differently: young people who grew up in the digital era learn more effectively through interactive computer environments, 3D graphics, and real-time visualization. Accordingly, training systems must evolve to reflect these characteristics.

A modern solution to this problem is the use of realistic simulation-based training systems – software and hardware complexes that model power plant processes in real time. Global practice has relied for decades on full-scope simulators for training personnel at thermal, hydro, and nuclear

power plants, as well as in grid companies. Today, full-function simulators that reproduce the characteristics of the real facility and the familiar control interface are considered a standard tool for training operational staff worldwide [7]. Research confirms that simulator-based training significantly improves skill quality: in particular, practicing various off-normal scenarios in the safe environment of a simulator allows operators to acquire the necessary experience much faster and without risk to equipment [8]. In essence, a modern operator training simulator is one of the most effective means of preparing personnel to operate a plant under diverse dynamic regimes, accelerating the development of professional competencies [9].

In view of the above, the relevance of this study is driven by the power industry's need for innovative approaches to personnel training and drilling. Digital power plant simulators help address the challenge of transferring knowledge from experienced specialists to the younger generation in a clear and interactive format, while also supporting safety by enabling the rehearsal of actions in conditions that emulate real emergency situations without risk to people or equipment. In addition, realistic visualization of the training process increases the motivation and engagement of young specialists, contributing to workforce inflow into the industry. Within the framework of the state-level energy digitalization agenda, the adoption of such training technologies aligns with the priorities of the industry's innovative development.

The research methods are based on an interdisciplinary approach and include analysis of scientific and technical literature, system modeling methods for power installations, computer-based three-dimensional modeling of equipment, and experimental verification of the developed simulator using test scenarios. Model development relied on object-oriented programming (C++), 3D graphical visualization, and numerical methods for solving systems of equations describing the dynamics of power units. To assess model adequacy, simulation results were compared with equipment nameplate data and with calculated reference examples from the literature.

Thus, the introduction substantiates the relevance of the study and formulates the aim, object, and methodological basis of the work. The next section provides a literature review on simulation-based training systems in the power industry, followed by a description of the simulator development process and a discussion of the results obtained.

1 Literature Review

1.1 Global Experience in the Use of Simulators in the Power Industry

Simulation-based training systems for power enterprises initially achieved their greatest development in the nuclear power sector, where safety requirements are the most stringent. As early as the 1980s, many countries operated full-scope simulators of nuclear power plant main control rooms, fully reproducing instrument panels and responding to operator actions. Experience in the nuclear industry demonstrated the effectiveness of such systems in preventing errors: operators trained on simulators are better prepared for off-normal situations and are less likely to take incorrect actions in real operating conditions. Following nuclear power, this approach was extended to thermal power plants (TPPs) and hydroelectric power plants (HPPs). To date, the use of simulators for personnel training has become a de facto standard in global power plant operation practice [10]. As experts note, no other form of training can convey the experience of controlling a complex technological facility as realistically and safely as a high-fidelity simulator with an accurate model and interface.

A full-scope simulator typically implies accurate reproduction of the characteristics of the controlled object (the generating unit) and the standard human – machine interface (HMI),

including control panels, consoles, and displays of information systems [1]. In other words, the trainee sees the same instruments and controls as at the real workplace, while the underlying software model simulates the plant's response to every operator action. The global industry has established requirements for such simulators. For example, the American Nuclear Society issued the ANSI/ANS-3.5 standard defining technical requirements for nuclear power plant simulators (real-time operation, deviations of key parameters from reference values not exceeding specified limits, etc.). IAEA guidance documents also emphasize the necessity of using simulators in personnel training as an element of safety culture. Thus, by the beginning of the 21st century, a well-established global practice had formed: before an operator is allowed to work independently at a power plant, they must undergo training and skills assessment on a simulator.

1.2 Industry Standards and Requirements for Simulators

In the post-Soviet space, the development of simulator-based training technologies followed its own path, building on the legacy of the Soviet era. In the USSR, regulatory provisions adopted in the 1970s laid the foundations for simulator development in the power sector. At the level of the Ministry of Energy, methodological guidelines were prepared describing the principles for building all-mode simulators – systems capable of reproducing both steady-state operating conditions of a generating unit and transient processes up to and including emergency situations. These documents ensured a unified approach to developing simulators for TPPs, HPPs, NPPs, and power grids, which made it possible by the 1980s to deploy training complexes at many large energy facilities. In modern Russia, this area continues to evolve. For example, the specialized company JSC “Simulators of Power Plants and Networks” (JSC “TEST”) has, since the late 1970s, developed and implemented dozens of simulation-based training systems for various power plants. The development of such systems takes into account compliance with state and industry standards and regulations, including standards for modeling generating units and the requirements of the supervisory authority (Rostekhnadzor) for personnel training, among others. All modern simulators undergo certification procedures confirming their quality and compliance with requirements. In particular, simulator complexes must provide high adequacy of the physical model (accurately reproducing the dynamics of the prototype unit), model automatic control systems, include training tools (an instructor workstation), and be implemented on a reliable software and hardware platform.

Special attention should be given to requirements for the software and computational components of simulators. The mathematical model of a power unit must solve, in real time, a system of equations describing processes in the boiler, turbine, generator, heat exchangers, pipelines, and other plant components. The model must cover a wide range of operating modes – from start-up and shutdown to emergency equipment failures. To ensure interactivity, computations are performed with a small integration time step (on the order of 100 ms or less), which requires optimized code and sufficient computing power. The interface (HMI) must fully match the real one – down to fonts and the arrangement of instruments on screens where digital control systems are used, or down to the appearance and tactile feedback of controls if the simulator is equipped with hardware replicas of instruments. In addition, an instructor workstation module is required, enabling the instructor to set scenarios (e.g., introduce equipment failures, change loads, simulate external events) and monitor trainee actions. Finally, modularity and extensibility are crucial: practice shows that simulator systems require periodic updates (for

example, following plant modernization or to add new scenarios), so the architecture must allow changes without a complete redesign of the model.

In Russia and Kazakhstan, the development of simulators for electric power facilities relies on national GOST and SNiP standards, as well as international standards related to software quality. For example, ISO 9000 series standards are widely used to support development quality; JSC “TEST” itself is certified to ISO 9001. Requirements for educational software products may also be governed by educational standards. In addition, energy companies introduce internal regulations defining the procedure for simulator-based training and the frequency of knowledge assessment for operational personnel. Thus, power plant simulators today are developed and operated within clearly defined standards, which ensures their effectiveness and safety.

1.3 Modern Technologies in Personnel Training (VR/AR)

A separate development direction in simulation technologies is virtual reality (VR) and augmented reality (AR) systems. They do not replace classical operator training simulators but rather complement them by enabling the training of tasks related to personnel actions outside the control room. For example, VR technologies can be used to train maintenance and operational staff to act directly in the turbine hall or on the plant premises, where spatial movement and interaction with equipment are required. Modern VR headsets and controllers make it possible to create an immersive environment in which the trainee can inspect a full-scale 3D model of equipment, practice walkdowns, troubleshoot, perform switching operations, and so forth. International studies indicate that VR training can significantly improve learning outcomes, especially regarding knowledge of plant layout and equipment location [11]. For instance, pilot deployment of VR simulators for training field workers at nuclear power plants produced positive results: most participants reported that VR-based training helped them better understand three-dimensional spatial aspects of the plant, increased confidence in their actions, and improved retention of equipment locations. At the same time, nearly all respondents (93%) agreed that virtual reality increases training effectiveness and can successfully complement traditional methods.

Despite clear advantages, VR training is still regarded as an auxiliary tool. Researchers emphasize that simulation in a virtual environment should be complemented by traditional forms of training and that its effectiveness requires further quantitative assessment [12]. Nevertheless, it is already evident that, due to full immersion and interactivity, VR/AR technologies can attract young specialists and provide practical skills in a safe environment. Some major energy companies worldwide are introducing VR elements to train personnel in working with high-voltage equipment, firefighting equipment, and emergency response procedures at power plants. Within the “digital twin” concept, VR modules can be linked to the overall plant model, providing a unified data space [13-16].

Systematic reviews on safety and virtual training confirm that, when tasks are properly designed, VR simulators can improve the quality of procedural learning and ensure safe practice of hazardous operations [17-19].

In Kazakhstan and Russia, virtual reality technologies for the power sector are at an early stage of adoption but undoubtedly have strong potential for future personnel training.

Thus, the literature and practical experience indicate that digital simulators have become firmly embedded in personnel training practices for power enterprises worldwide [20].

Their use is regulated by standards, while technological innovations (such as VR) expand training capabilities. Against this background, the development of domestic solutions for digital power plant simulation that meet modern requirements is both relevant and timely. The following section provides a detailed methodology for creating such a simulator – the “Power Plant Simulator” software suite developed at the KazNIPiEnergoprom Institute – and presents the results of its testing.

2 Methodology for Developing a Digital Simulator

2.1 Architecture of the “Power Plant Simulator” Program

The software suite under development is a modular system consisting of a simulation core and a visualization subsystem. The simulation core computes all physical processes of the power plant model in real time, while the visualization subsystem is responsible for graphical representation of equipment states and the surrounding environment. The architecture follows a block-hierarchical modeling principle: each major unit (e.g., turbine, generator, boiler, pumping station) is represented by a set of interconnected mathematical models combined into a module. The unit modules are then integrated into a unified computational block that calculates interactions among all parts of the generating unit.

Within the software core, several types of input data required for simulator initialization and operation are clearly distinguished:

Structural data (I1): information about equipment configuration, geometry, and interconnections. This category includes three-dimensional models of objects (e.g., turbine and generator components, valves, pipelines) as well as structural connection diagrams. In “Power Plant Simulator,” a proprietary format based on FBX is used to load equipment 3D models.

Kinematics data (I2): descriptions of mechanical degrees of freedom and constraints, including mounting and support points, rotation angles of blades and joints, limit positions of valves and gates, and similar parameters. These data define moving parts of units and the ranges of their motion.

Working-fluid parameters (I3): properties of the medium flowing through the equipment: for thermal power engineering, this is water and steam; for a hydro turbine, water; for a gas turbine unit, air and combustion products. This category specifies thermodynamic parameters – pressure, temperature, density, and viscosity ranges – as well as characteristics such as turbulence, phase transitions (boiling/condensation), and others. This information is required to calculate flow regimes, heat transfer, and energy conversion.

In addition to the above core information flows, the core also receives:

Time-scale factor (T): a special parameter allowing acceleration or deceleration of the simulation. By changing this factor, an instructor or user can, for example, simulate a 24-hour operating cycle in accelerated mode or examine a fast transient process in slow motion, improving the usability of the training process.

Control inputs (A1 and A2): signals from the user (operator) that emulate actions on the plant controls. A1 is used for continuous signals (analog regulators, levers, setpoints), while A2 is used for discrete signals (buttons, switches). For example, changing the position of a lever controlling water supply to the turbine is an A1 signal, whereas pressing an emergency shutdown button is an A2 signal. Using these inputs, the simulator core solves the system dynamics equations and produces an output data array Ores (Output Result). The results include both

numerical values (process parameters such as pressure, power, rotational speed, etc.) and visualization coordinates (positions of moving equipment elements, rotation angles, displacements of graphical objects). The output data O_{res} are

transferred to the visualization (rendering) module, which displays the system state on the screen.

Thus, the program architecture provides a clear separation between the computational core (simulation) and the graphics engine (visualization). This modularity enabled flexible selection of optimal solutions for each part. C++ (using Visual Studio) was chosen for the core due to the requirement for high computational performance. The mathematical models of equipment units were implemented manually based on physical principles and reference data for specific objects (in particular, for the hydro turbine – using Soviet catalog data from the 1970s). During core development, particular attention was paid to numerical stability and correct handling of nonlinear dependencies typical of power systems (e.g., the dependence of turbine flow rate on guide vane opening and head).

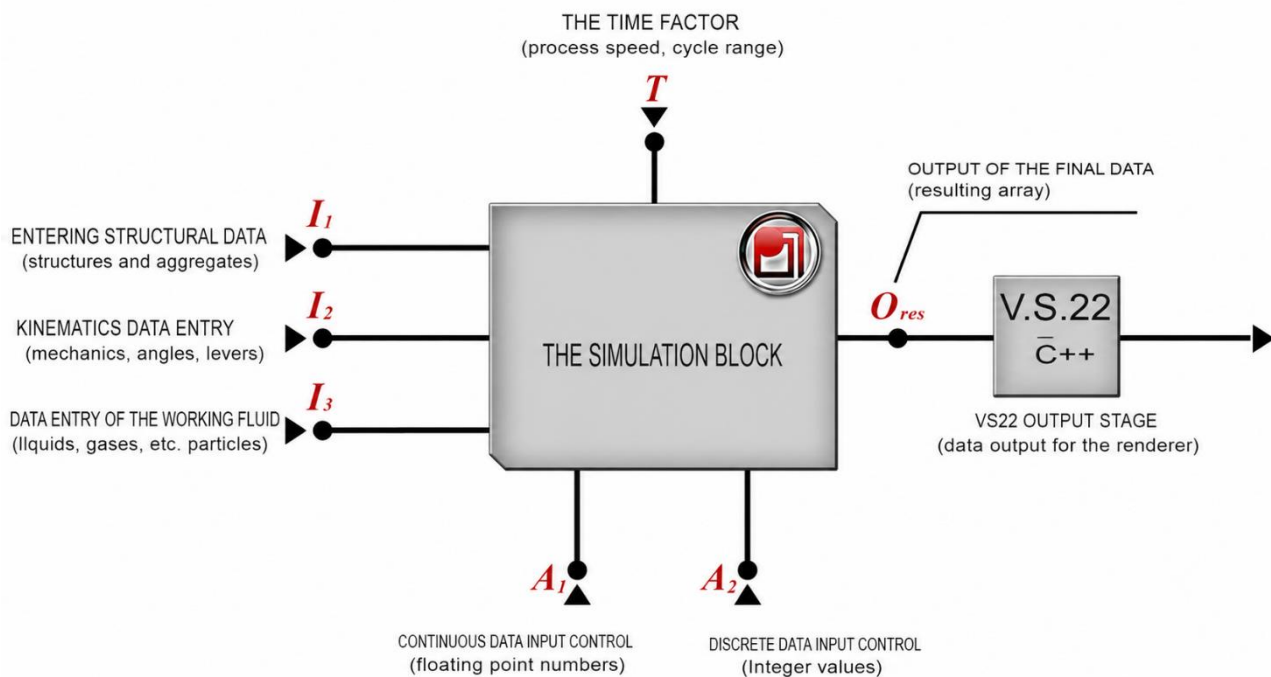


Figure 1 – Simulation Block

2.2 Development of a Digital Model of Power Equipment

The next key stage was the development of a digital model of a specific power plant used to pilot-test the simulator. As a pilot project, a hydroelectric power plant model was selected – specifically, the Kapchagay HPP, one of the operating hydroelectric plants in the region. This choice was driven by several factors. First, the PL2 hydro units installed at the Kapchagay HPP have demonstrated reliable performance and are supported by a substantial research and reference base. Second, the plant's geographic proximity made it possible, when needed, to validate the model against the real facility.

The HPP modeling process included several components: collecting baseline data, three-dimensional geometric modeling, developing mathematical submodels of key subsystems, and integrating everything into a unified system. Data collection relied on archival materials, including technical catalogs of hydro turbines and HPP equipment. In particular, the project team studied the

Kaplan-type PL2 adjustable-blade turbine schematics based on the 1975 catalog of the Leningrad Metal Works and the reference book *Hydro Turbine Construction in the USSR* (1970). These sources contain design drawings of the turbine, generator, wicket gate mechanism, and auxiliary systems, as well as operating characteristics (rated power, efficiency, allowable loads, etc.). Based on these data, the project engineers used Blender to accurately recreate the geometric model of the hydro turbine and adjacent assemblies. The modeled components included a spiral case of a specific shape (trapezoidal cross-section, wrap angle of approximately 300°), a wicket gate mechanism with guide vanes and their actuation mechanisms, the turbine shaft, the generator rotor and stator, and the oil pressure unit of the governing system.

The turbine, generator, and auxiliary system components were reproduced with high precision, ensuring realistic visualization.

In addition to the turbine and generator, a digital model of the HPP machine hall and the control room was created. The objective was not only to compute hydraulic and electrical processes, but also to visually present the surrounding environment to the operator – i.e., the arrangement of equipment, rooms, and control panels. To this end, the HPP building, the operator workstation with the control console, and auxiliary equipment were modeled in Blender. The resulting models were imported into the simulator via the above-described I1 channel (structural data). The I2 channel (kinematics data) was configured so that the turbine blades and guide vanes could rotate, sluice gates could open, and the generator shaft and rotors could rotate in the generator model. The I3 channel (working-fluid parameters) contained data on water, including the head range (upper reservoir water level), turbine flow rates, the physical properties of water under various temperature conditions, and related parameters. The model also included the turbine operating points – the dependence of output power on guide vane opening under different heads (the so-called turbine load table). These data were subsequently used to evaluate the simulator's accuracy.

Once the geometric and computational models were prepared, they were integrated with the simulation core. This represented a “coupling” of two worlds: three-dimensional objects and mathematical equations. In practice, this meant that each state variable computed in the core was linked either to a visual element or to a displayed numerical parameter. For example, the equation calculating the current water flow through the turbine simultaneously affected both the rotation speed of the 3D turbine shaft model and the power indicator on the instrument panel. At this stage, the correctness of these links had to be tested: engineers ran the simulation and verified whether changes in all visual elements corresponded to expected behavior. At the end of May 2024, the first working version of the digital HPP model was obtained and successfully launched in conjunction with the simulation block. The initial test runs showed that the model behavior in normal operating modes was close to reality: when the nominal head was specified and the guide vanes were opened to the calculated optimum, the simulator produced an output power value that almost exactly matched the turbine's nameplate rating. Deviations of key parameters (pressure, rotational speed, generator voltage) did not exceed a few percent, indicating high model fidelity. Thus, the task of adequate physical modeling of the HPP prototype was generally accomplished. Remaining issues concerned performance optimization and visual realism, which required moving to the next stage – selection of a graphics engine.

Figure 1 presents the digital 3D model of the hydro unit developed for the simulator.

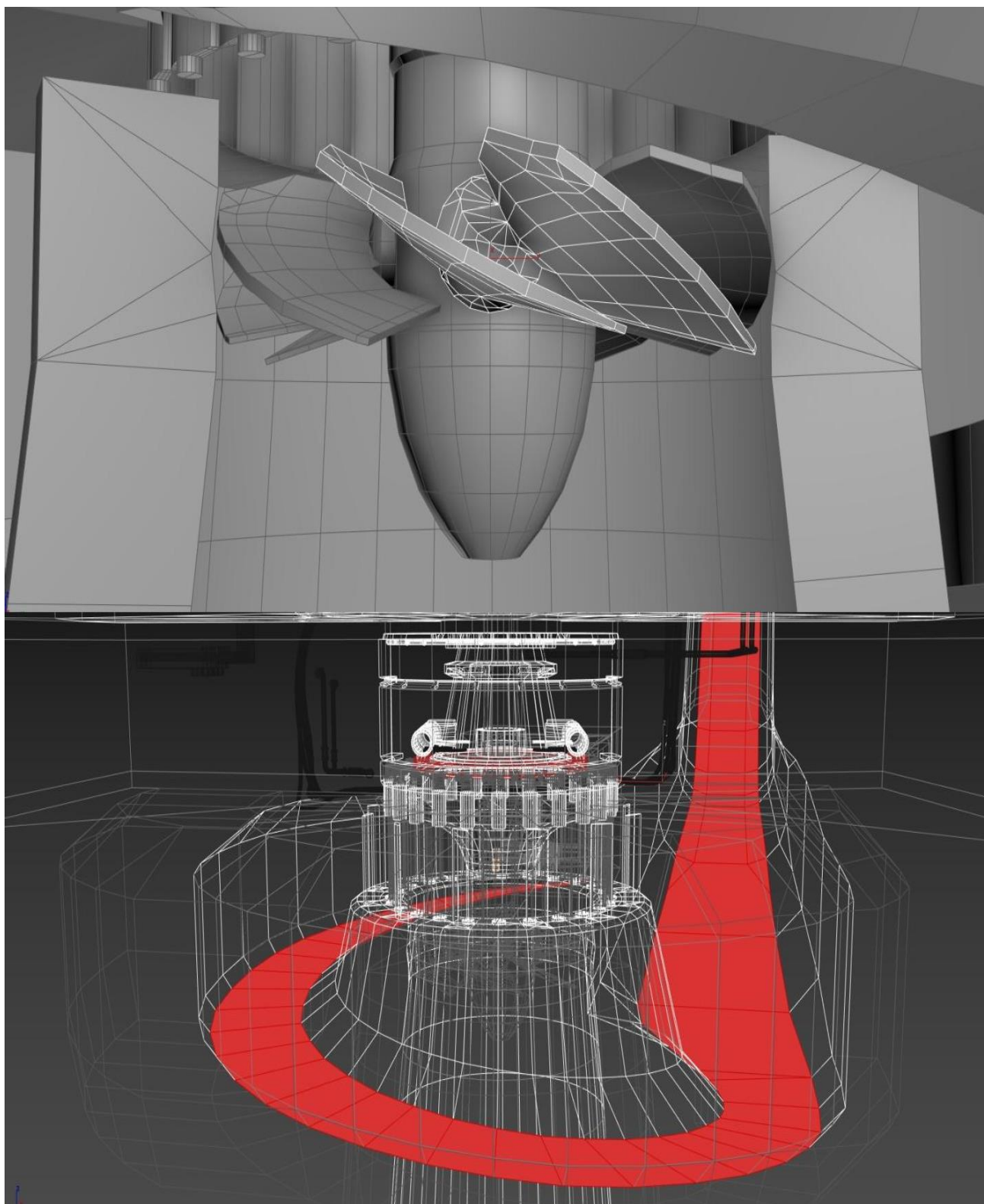


Figure 2 – Digital Model of the HPP Hydro Unit in the Simulator

2.3 Integration of the Simulation Core with a Graphics Engine

The first prototype version ran on a test server and rendered graphics using the same environment as the computational core (Visual Studio). This rendering was essentially provisional: it provided only basic display of 3D models without advanced effects, and the frame

rate was unsatisfactory. To transform the prototype into a full-featured training simulator, it was necessary to ensure photorealistic rendering and smooth performance even on a standard personal computer. The obvious solution was to use an off-the-shelf game graphics engine. Such engines are optimized for fast rendering of complex scenes, include visual effects (lighting, shadows, reflections), and support low-level interaction with the GPU, enabling high performance. The team considered several widely used technologies, including Unigine 2, Unity 6, Unreal Engine 5, Godot, and the promising domestic Nau Engine.

Each candidate had its strengths and weaknesses. For example, Unigine Engine 2 initially appeared attractive as a product of Russian origin; however, in 2022–2023 its development shifted toward foreign markets, and obtaining the required developer support proved difficult. In addition, tests revealed a number of technical challenges in integrating our objects into the Unigine environment, so this option was abandoned. Unity is known for its ease of use and broad adoption; however, in recent years Unity Technologies changed its licensing policy to a less favorable model, and reports emerged regarding developer support issues. Given the risk of instability associated with Unity, this option was also rejected. Godot – a lightweight open-source engine – seemed attractive from the standpoint of independence, but the team lacked sufficient experience with it, and the required training would have taken too much time. The promising Russian Nau Engine, derived from the Dagor Engine, was at an early stage of development and was not yet available for practical use.

Ultimately, Unreal Engine 5 (UE5) by Epic Games became the leading choice. By 2023, this engine had established itself as one of the most advanced and high-performance solutions. Its advantages include the modern Lumen global illumination system and Nanite micropolygon technology, which allow highly complex scenes to be rendered without performance loss; a mature developer toolchain with extensive libraries and examples; and close integration with hardware acceleration on NVIDIA GPUs. The development team conducted an experimental integration of UE5 with the simulation core, and the results were compelling: even on a relatively old (2017) graphics card, a high frame rate was achieved while visualizing our HPP model. The simulator + UE5 combination demonstrated smooth real-time operation – turbine rotation, water flow, and dynamic lighting and shadows in the machine hall were all rendered without noticeable delay. After these tests, the choice of graphics engine became clear. By the end of summer 2024, the digital HPP training simulator had been fully migrated to the Unreal Engine 5 platform and compiled as a standalone application.

The transition to UE5 also provided additional benefits. First, it became possible to easily expand visual effects – for example, to add animated moving clouds, water spray, and a photorealistic sky and landscape around the plant. Second, Unreal supports VR devices, which in the future opens a pathway to combining our simulator with VR training (as noted in the literature review, this is a highly relevant direction). Third, UE5 provides convenient tools for building user interfaces, enabling the display of auxiliary panels on screen, including parameter indicators, prompts, and scenario menus. After integration with the engine, the developers performed a series of final calibrations of the model. In particular, algorithms were refined for coordinating the rotation angles of the turbine runner blades and the guide vanes based on the load table – this is necessary to ensure that, for any combination of head and turbine opening, the simulator correctly determines the generated power. By autumn 2024, the simulator program had reached a completed form.

Figure 3 shows a fragment of the interface of the resulting simulator: the Kapchagay HPP control room visualized in Unreal Engine 5, alongside a photograph of the real control console for comparison. It can be seen that the graphical accuracy is very high – instrumentation, sensors, and indicators on the control panel are reproduced in fine detail.

High-quality visualization in Unreal Engine 5 provides trainees with a strong sense of presence.

After integration and graphics tuning, development of the “Power Plant Simulator” software power plant simulator entered its final stage. The finished product is a PC application capable of real-time operation and does not require expensive specialized equipment. The following sections describe the functional capabilities of the developed system and the results of its testing under various scenarios.



Figure 3 – Comparison of the Main Control Console: Actual HPP Control Panel (left) and Virtual Interface in the Simulator (right)

3 Results and Discussion

3.1 Capabilities and Functions of the Developed Simulator

As of early 2025, the “Power Plant Simulator” system offers a broad set of functionalities that enable its use across multiple areas of industry practice. The key capabilities include the following:

Digital modeling of any type of power plant. The simulator architecture was designed from the outset as universal, making it possible to digitize and simulate the operation of virtually any power plant – thermal, hydro, nuclear, solar, wind, and others. It is sufficient to implement the appropriate equipment models and control laws. This makes the system a flexible tool applicable to different power enterprises.

Modularity and extensibility. The software is designed to allow the addition of new modules and functions as needed. For example, an electric grid model can be added to train power system dispatchers, or an economic analysis module can be included to evaluate plant performance. Such extensibility increases the value of the simulator by enabling customization for specific tasks.

Training and drilling of operational personnel. The primary purpose of the system is to serve as a training simulator for power plant operational staff. The simulator provides training modes in which beginners can become familiar with plant equipment, learn unit control algorithms, and understand interdependencies among parameters. A drilling mode is also implemented: the instructor sets a scenario (e.g., “turbine run-up and generator synchronization to the grid” or “emergency pump trip”), and the trainee must perform the required actions. During drills, the system records all operator steps and can subsequently analyze them and identify errors.

Knowledge assessment and certification. The simulator can be used for periodic qualification checks of existing plant personnel. A testing mode is provided in which an employee, without prompts, must operate a virtual generating unit under various conditions. The results are recorded and can serve as a basis for certification/attestation. This approach is already applied at major NPPs and TPPs; with our universal simulator it becomes available for other facilities as well.

Emergency scenario practice. One of the most valuable features of the simulator is the ability to safely reproduce emergency and off-normal equipment operating modes. Neither at a real plant nor even at a training ground is it possible to reproduce, for example, a turbine failure or a generator short circuit without the risk of serious consequences. The simulator, however, can reproduce virtually any emergency – from boiler overheating and protection trips to a sudden earthquake disabling part of the equipment. In the simulator, the operator learns to act strictly according to procedures under extreme conditions, which in reality can save lives and protect equipment from severe damage.

Presentation and outreach modes for a broad audience. The simulator can be used not only for specialized training but also for introductory purposes. For example, during onboarding it is possible to conduct a virtual tour of the plant – demonstrating the layout of an HPP or TPP, the operating principles of key units, and an “inside view” of the power unit. It can also be used for presentations to management or investors: the digital plant model makes it possible to clearly demonstrate planned modernization or new solutions. Finally, media and communications teams can use the simulator to create educational videos, interactive museum exhibits, and similar content.

Engineering design and debugging. An important application area is industrial visualization and the design of new facilities. In effect, the simulator acts as a digital twin of an energy facility. Design engineers can upload a plant under design and evaluate its behavior virtually – for example, how it will start up, how it will respond to various load regimes, and how maintenance-friendly the equipment layout is. This can help identify potential issues at the design stage, thereby reducing risks during real construction. In addition, a digital twin enables personnel training even before a plant is commissioned [21]. Real-world examples are known where digital twins

accelerated commissioning; for instance, Emerson reported that operator training on a digital twin significantly reduced the start-up time of a new unit and lowered commissioning costs [22].

Photorealistic graphics. By using Unreal Engine 5, the simulator achieves very high visual quality up to photorealism. This is important not only aesthetically but also for training effectiveness: immersion in a near-real environment helps trainees acquire skills that transfer more readily to the real facility. High graphical fidelity also supports presentations and outreach, as visually compelling content makes a strong impression on audiences.

Industry outreach and talent attraction. Finally, the simulator serves as a tool to promote the power industry among young people. A generation raised on computer games perceives complex systems differently, and high-quality simulation is an effective way to demonstrate the complexity and appeal of energy professions. “Power Plant Simulator” can engage students, school engineering clubs, and young engineers by demonstrating power plant operation in an interactive format, thereby addressing the strategic challenge of attracting new talent to the sector.

These capabilities are supported by early results of simulator deployment. During pilot training sessions using the developed simulator, trainees were observed to learn the material significantly better than during traditional lectures. According to feedback, studying diagrams and equipment operating principles in an interactive 3D environment proved far more intuitive. Even experienced operators participating in the pilot found it useful to refresh their skills – especially for emergency procedures that are rarely encountered in practice. Thus, the developed power plant simulator demonstrated effectiveness as a training and drilling system, supporting the conclusions of global studies regarding the benefits of simulation-based training.

3.2 Verification of Modeling Adequacy

A key aspect of developing any simulator is verification – assessing how accurately the model reproduces the behavior of the real facility. For our system, multi-stage tests were performed, ranging from validation of individual calculation blocks to full-scale plant operating scenarios. Already at the hydro-turbine modeling stage, as noted above, the resulting characteristics were compared with the manufacturer’s tabulated data. For example, at a nominal head of 35 m and a guide vane opening angle of 32° , the simulator produced an output of approximately 56 MW, which matches the nominal rating of the Kapchagay HPP unit (55 MW, allowing for a small deviation); a discrepancy of less than 2% is considered an excellent result. Similarly, the rotor speed was maintained at exactly 50 Hz during generator synchronization to the grid, and the generated voltage corresponded to 13.8 kV.

Next, transient processes were simulated, such as rapid closure of the guide vanes (emergency turbine trip). The model predicted a sharp pressure surge upstream of the turbine (water hammer) and rising levels in the penstocks, consistent with well-known real effects. Numerical values (pressure surge magnitude) were compared with calculations using a simplified formula; the deviation did not exceed 5%. This indicates that the hydraulic model behaves correctly. Another important test was unit start-up from standstill: the simulator successfully passed through all stages, from opening the pre-turbine gate, accelerating the turbine, energizing the generator field, and reaching nominal operating conditions in parallel with the grid. The automatic speed governor and the generator excitation system embedded in the model kept parameters within allowable limits, and the unit reached steady operation without oscillations or deviations.

In addition to the hydro unit, adjacent systems were also verified, such as the oil pressure unit supplying hydraulic control pressure for blade actuation. The simulator correctly reflected

pressure drops during intensive blade actuation and the start-up of the standby oil pump. The electrical part – generator and transformer – was also tested. When a short circuit was simulated on the auxiliary busbars, protective automation operated, the generator model responded by increasing current up to the specified limit, after which excitation was reduced. All of these responses were programmed according to real protection relay settings, and tests confirmed their correct execution.

Overall, the adequacy verification demonstrated that the developed simulator has a high degree of fidelity. Naturally, any model involves assumptions – for example, we did not simulate network overvoltage processes or minor details such as bearing heating – however, for training purposes and for the main technological processes, all key aspects are covered. The small discrepancies identified in testing are quantitative in nature and do not affect the qualitative picture. Thus, it can be concluded that the simulator has been validated on the hydroelectric plant case study. The next step is similar work for a thermal power plant, including development of a steam boiler and steam turbine unit model. It is expected that, thanks to the modular principle, most of the platform will remain unchanged, and only the blocks responsible for hydraulics will need to be replaced with steam-cycle models.

3.3 Comparison with Existing Solutions

The developed system should be considered in the context of other simulators used in the power industry. In the post-Soviet space, the best-known solutions are those produced by JSC “TEST” (JSC “Simulators of Power Plants and Networks”), which has historically held a leading position in terms of the number of simulators deployed at power plants. As a rule, JSC “TEST” simulators are full-scope complexes with a hardware-and-software replica of the main control board (i.e., real control consoles or their fragments connected to a computing system). They are highly valued for model accuracy and compliance with regulatory requirements; however, they also have certain limitations. First, such systems are typically developed for each plant individually and over a long period (sometimes years), which makes them costly – many enterprises cannot afford a from-scratch development. Second, their architecture is often closed and highly specialized, which complicates updates or modifications by the customer. Finally, hardware replication of the control panel increases realism but reduces flexibility: a simulator created for a thermal power plant cannot be reconfigured for a hydroelectric plant without replacing the entire instrument panel.

Our approach is characterized by greater universality and accessibility.

“Power Plant Simulator” is a cross-platform software solution running on a standard PC and not requiring special hardware, except, optionally, a standard VR kit when needed. This means it can be deployed quickly and at relatively low cost by distributing software copies and, if required, VR headsets. It can be installed in university and college training classrooms, as well as at power plants for self-paced personnel training. Of course, if necessary, the system can be supplemented with hardware mock-ups of control panels; however, the key feature is that such hardware is not required for basic operation. Expert feedback on our solution indicates that, in terms of flexibility and universality, it is closer to modern digital simulators used, for example, in aviation, where software-based pilot simulators have long been standard.

When compared with foreign analogues, it should be noted that the global market includes commercial software products for power unit modeling. Examples include simulators by CORYS (France) for nuclear and thermal power plants, and integrated systems from Siemens and Emerson

(e.g., Ovation Digital Twin) for operator training. These products are very powerful but also very expensive and typically oriented toward large corporations. Our simulator, developed by a scientific organization, is potentially several times more affordable while offering comparable core capabilities. For instance, Emerson Ovation Digital Twin – a digital twin based on the Ovation DCS platform – is positioned as a tool for operator training and control algorithm testing integrated into the overall control system. A distinguishing feature of Emerson’s solution is the use of a copy of the actual DCS software within the simulator, which ensures complete interface identity. In our approach, we chose interface emulation: the simulator reproduces monitoring and control screens that are visually and functionally analogous to real ones, while operating autonomously. This is a more flexible approach, as it does not require licensing industrial DCS software inside the simulator.

A key indicator of simulator maturity is the accuracy of the mathematical model. In the case of Emerson or CORYS, models can achieve very high precision, including reproduction of fine oscillatory processes, since these companies rely on decades of experience and large libraries of ready-made components. Our simulator is only at the beginning of this trajectory; at present, the model granularity can be considered moderate – sufficient for training purposes, but potentially insufficient for engineering analysis of emergency processes at a strict scientific level. However, the architecture supports incremental refinement: for example, it is possible to implement a more accurate grid dynamics model or include delayed thermal effects in equipment if such tasks arise.

In summary, “Power Plant Simulator” successfully combines approaches validated by global practice with modern visualization technologies. It delivers most of the functions typical of leading international simulators, while remaining relatively straightforward to deploy and adapt to new facilities. Further project development is expected to include expansion of the model library (for different plant types), improvement of instructor tools, and introduction of networked modes (for training groups of operators simultaneously, as implemented in full-scope simulators). Nevertheless, the results achieved to date can be regarded as a significant step forward in the field of digital workforce training for the power industry.

Conclusion

In this study, a software power plant simulator – Power Plant Simulator – intended for training and drilling operational personnel was developed and experimentally validated. The work was comprehensive in nature, integrating analysis of global experience, software engineering, mathematical modeling, and pedagogical aspects.

The introduction substantiated the relevance of the topic by demonstrating that the power industry requires new approaches to workforce training capable of replacing outdated methods and mitigating the shortage of experienced specialists. Simulation-based training systems were identified as an optimal solution, as confirmed by international practice and research. The study defined the objective (development of an effective training simulator) and the object of research (the personnel training process supported by digital models), and outlined the applied methods (mathematical modeling and experimental validation).

The literature review analyzed existing simulator systems and the requirements placed on them. It was noted that full-scope and semi-physical simulators have long been a standard tool for personnel training, and the historical prerequisites for the development of this field in the USSR/Russia were described. Modern technologies, including virtual reality, were considered as enabling tools that enhance training. Overall, the review showed that the proposed project aligns

with global trends and corresponds to national standards (GOST and sectoral regulations) governing personnel training. The main part of the work addressed the simulator development methodology. A program architecture was designed that includes a simulation core (C++ models) and a graphical visualization module based on Unreal Engine 5. A digital model of a hydroelectric power plant (Kapchagay HPP) was created with detailed 3D visualization of the turbine, generator, and auxiliary systems. The model was integrated with the simulation core, resulting in a full-featured virtual generating unit controllable in real time. Particular attention was paid to model accuracy: initial tests confirmed only minor deviations from real hydro unit characteristics (on the order of a few percent), indicating the validity of the chosen modeling methods. To address graphics performance, UE5 was selected and successfully applied, providing photorealistic rendering without loss of real-time responsiveness.

Pilot operation results demonstrated the simulator's multifunctionality. The developed system can train beginners in fundamental plant operating principles, drill experienced operators in emergency scenarios, support knowledge assessment, and serve as a tool for presentations and engineering/project work. This broad application scope is a key advantage. In practice, the simulator implements the concept of a digital twin of a power plant: it not only supports training, but can also be used for experimental studies, such as evaluating modernization hypotheses. A notable outcome was confirmation of the effectiveness of simulator-based training – compared to traditional instruction, the interactive format yielded improved learning outcomes and practical skill development.

Overall, the study objective was achieved: a working prototype of a digital power plant simulator was created, providing the core functions of a training and drilling system. It demonstrates high modeling fidelity and realism, supporting its potential for successful application in educational and industrial organizations.

Future work includes expanding the model library (adding templates for thermal and nuclear power plants), developing scenarios for group training (shift operation simulation and multi-operator interaction), and producing methodological materials for instructors. In addition, close cooperation with specialized educational institutions is planned to integrate the simulator into engineering education programs. These efforts will contribute to improving the quality of education and workforce training in the power sector in response to contemporary challenges.

References:

1. Barroso H. et al. Use of control room simulators for training of nuclear power plant personnel // IAEA-TECDOC-1411. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004. – 85 p. – ISBN 92-0-110604-1.
2. Chwilkowska-Kubala A., Cyfert S. Malewska K. Mierzejewska K., Szumowski, W. The impact of resources on digital transformation in energy sector companies. The role of readiness for digital transformation // *Technology in Society*. – 2023. – Vol. 74. – Art. 102315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102315>.
3. Fareri S., Apreda R., Mulas V., Alonso R. The worker profiler: Assessing the digital skill gaps for enhancing energy efficiency in manufacturing // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2023. – Vol. 196. – Art. 122844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122844>.
4. Armiento M., Lelli M., Andrews C. et al. Analysing the global workforce dynamics of the energy transition: main findings from the World Energy Employment report 2023 // *Discover Sustainability*. – 2025. – Vol. 6. – Art. 35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00773-7>.

5. Vong K.C., Udomvitid K., Ueki Y., Intalar N., Pongsathornwiwat A., Pannakkong W., Komolavanij S., Jeenanunta C. Strategic Human Resource Development for Industry 4.0 Readiness: A Sustainable Transformation Framework for Emerging Economies. *Sustainability* – 2025. – № 17. – P. 6988. <https://doi.org/10.3390/su17156988>
6. Cazeri, G. T., Santa-Eulália, L. A. de, Serafim, M. P., & Anholon, R. Training for Industry 4.0: a systematic literature review and directions for future research. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. – 2022 – 19(3), – 1–19. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2022.007>
7. Tavira-Mondragón J., Cruz-Cruz R. Development of Modern Power Plant Simulators for an Operators Training Center // *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science* 2010. – Vol. I. – San Francisco, USA: WCECS. – 2010. – P. 491–496.
8. Bracco, F.; Masini, M.; Glowinski, D.; Piccinno, T.; Schaerlaeken, S. Simulation as a Training Method for Electricity Workers' Safety. *Int. J. Environ. Res. Public Health* – 2021. – № 18. – P. 1591. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041591>
9. Marcano L., Haugen F.A., Sannerud R., Komulainen T. Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? // *Safety Science*. – 2019. – Vol. 115. – P. 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.019>.
10. Sidwall K., Wang P. A review of recent best practices in the development of real-time simulation and digital twins for power systems // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art. 1111. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031111>.
11. Masiello, I.; Herault, R.; Mansfeld, M.; Skogqvist, M. Simulation-Based VR Training for the Nuclear Sector—A Pilot Study. *Sustainability*. – 2022. – № 14. – P. 7984. <https://doi.org/10.3390/su14137984>
12. Pakarinen S., Laarni J., Koskinen H., Passi T., Liinasuo M., Salonen T.-T. Virtual-Reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review // *Progress in Nuclear Energy*. – 2024. – Vol. 169. – Art. 105104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105104>.
13. Simon, J., Gogolák, L., Sárosi, J., Fürstner, I. Augmented Reality-Based Distant Maintenance Approach. *Actuators*. – 2023 – Vol. 12. P. 302. <https://doi.org/10.3390/act12070302>
14. Hazuda N. Digital twins and virtual reality transform utility workforce training // *Virginia Tech News*. – 2025. – 29 Apr. – URL: <https://news.vt.edu/articles/2025/04/eng-ece-digital-twins-virtual-reality-workforce-training.html>
15. Partarakis, N.; Evdaimon, T.; Katsantonis, M.; Zabulis, X. Training First Responders Through VR-Based Situated Digital Twins. *Computers*. – 2025. – № 14. – P. 274. <https://doi.org/10.3390/computers14070274>
16. Zhang J, Ma F, Pi Y, Du H and Pan X. Digital twin embodied interactions design: Synchronized and aligned physical sensation in location-based social VR. *Front. Virtual Real.* – 2025. –P. 6:1499845. <https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1499845>
17. Dhalmahapatra, K., Maiti, J., Krishna, O.B. Assessment of a Virtual Reality-Based Safety Training Simulator for Electric Overhead Crane Operations. *Safety Science*. – 2021 – Vol. 139. Article 105241. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105241>
18. Scorgie D., Feng Z., Paes D., Parisi F., Yiu T.W., Lovreglio R. Virtual reality for safety training: A systematic literature review and meta-analysis // *Safety Science*. – 2024. – Vol. 171. – Art. 106372. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106372>.
19. Jongbloed J., Chaker R., Lavoué E. Immersive procedural training in virtual reality: A systematic literature review // *Computers & Education*. – 2024. – Vol. 221. – Art. 105124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105124>.
20. Tavira-Mondragón J., Romero-Jiménez G., Jiménez-Fraustro L. Fossil Fuel Power Plant Simulators for Operator Training // *Electric Research Institute*. – Mexico: Fossil Fuel and the Environment – 2012. – P. 91-120.21.

21. Sleiti A.K., Kapat J.S., Vesely L. Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 3704–3726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2022.02.305>.

22. Larson A. Digital twins provide the platform to identify potential problems and improve power plant performance // Power Magazine. – 2024. – 20 Feb. – URL: <https://www.powermag.com/digital-twins-provide-the-platform-to-identify-potential-problems-and-improve-power-plant-performance/>

Поступила 9 июня 2025г.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SRSTI 81.93.29

UDC 004.75:004.8:004.056

DEVELOPMENT OF A DECENTRALIZED VOTING SYSTEM UTILIZING BLOCKCHAIN AND MACHINE LEARNING

Amangeldy A.Ye.

Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: al_amangeldy@kbtu.kz

This article addresses the problem of ensuring transparency, integrity, and trust in electoral processes. Traditional voting systems are vulnerable to fraud, manipulation, and lack of verifiability. A decentralized voting system based on blockchain technology and machine learning methods is proposed. The blockchain component ensures immutability and transparency of voting data, while machine learning is used to classify voting sessions as normal or suspicious based on simulated behavioral data. The proposed system leverages Ethereum smart contracts for secure and verifiable ballot handling, combined with a supervised Random Forest classifier trained exclusively on synthetic data. A prototype was developed and evaluated under controlled simulation conditions, including scenarios with normal and malicious voter behavior. Experimental results demonstrated high classification accuracy in identifying suspicious voting patterns within the simulated environment. The results confirm the potential of integrating blockchain and machine learning for building secure and transparent digital voting platforms.

Keywords: *blockchain, decentralized voting, machine learning, anomaly detection, smart contracts, election security*

В данной статье рассматривается проблема обеспечения прозрачности, целостности и доверия к избирательным процессам. Традиционные системы голосования подвержены мошенничеству, манипуляциям и недостаточной верифицируемости. Предлагается децентрализованная система голосования, основанная на технологии блокчейн и методах машинного обучения. Компонент блокчейна обеспечивает неизменяемость и прозрачность данных голосования, тогда как машинное обучение используется для классификации сессий голосования как нормальных или подозрительных на основе смоделированных поведенческих данных. Предлагаемая система использует смарт-контракты Ethereum для безопасной и проверяемой обработки бюллетеней в сочетании с обучаемым методом Random Forest, обученным исключительно на синтетических данных. Прототип системы был разработан и протестирован в контролируемых условиях моделирования, включая сценарии нормального и вредоносного поведения избирателей. Экспериментальные результаты продемонстрировали высокую точность классификации при выявлении подозрительных моделей голосования в рамках моделируемой среды. Полученные результаты подтверждают потенциал интеграции блокчейна и машинного обучения для создания безопасных и прозрачных цифровых платформ голосования.

Ключевые слова: *блокчейн, децентрализованное голосование, машинное обучение, обнаружение аномалий, смарт-контракты, безопасность выборов.*

Бұл мақалада сайлау үдерістерінің ашықтығын, тұтастығын және сенімділігін қамтамасыз ету мәселесі қарастырылады. Дәстүрлі дауыс беру жүйелері алаяқтыққа, манипуляцияларға және тексеру мүмкіндігінің жеткіліксіздігіне бейім. Блокчейн технологиясы мен машиналық оқыту әдістеріне негізделген орталықтандырылмаған дауыс беру жүйесі ұсынылады. Блокчейн компоненті дауыс беру деректерінің өзгермейтіндігі мен ашықтығын қамтамасыз етеді, ал машиналық оқыту модельденген мінез-құлық деректері негізінде дауыс беру сессияларын қалыпты немесе күмәнді ретінде жіктеу үшін қолданылады. Ұсынылған жүйе бюллетеньдерді қауіпсіз әрі тексерілетін өңдеуді қамтамасыз ететін Ethereum смарт-келісімшарттарын және тек синтетикалық деректер негізінде оқытылған Random Forest қадағаланатын классификаторын пайдаланады. Жүйенің прототипі қалыпты және зиянды дауыс беруші әрекеттерінің сценарийлерін қамтитын бақыланатын модельдеу жағдайларында әзірленіп, сыналды. Эксперимент нәтижелері модельденген ортада күмәнді дауыс беру үлгілерін анықтауда жоғары жіктеу дәлдігін көрсетті. Алынған нәтижелер қауіпсіз әрі ашық цифрлық дауыс беру платформаларын құру үшін блокчейн мен машиналық оқытуды біріктірудің әлеуетін растайды.

Түйінді сөздер: блокчейн, орталықтандырылмаған дауыс беру, машиналық оқыту, аномалияларды анықтау, смарт-келісімшарттар, сайлау қауіпсіздігі.

Introduction

Elections serve as the cornerstone of democratic governance, establishing legitimacy and enabling citizens to participate in decision-making processes. Trust, transparency, and accuracy are vital in ensuring the credibility and acceptance of election outcomes. However, traditional paper-based and centralized electronic voting (e-voting) systems are increasingly under scrutiny due to their susceptibility to vote tampering, privacy violations, lack of transparency, and reliance on centralized authorities [1, 2]. High-profile incidents of election fraud and interference across various countries have exposed the vulnerabilities of existing infrastructures, prompting the urgent need for more secure, transparent, and verifiable voting alternatives.

Blockchain technology has emerged as a transformative solution in addressing many of the limitations of traditional voting mechanisms. By offering decentralized data storage and immutable ledgers, blockchain eliminates the need for a central authority while ensuring that all recorded transactions (or votes) are tamper-proof and traceable [3-5]. Ethereum, in particular, facilitates the use of smart contracts – self-executing code that automates procedures such as vote validation, ballot counting, and result publication, all in a transparent and auditable manner [6].

In parallel, advancements in machine learning (ML) have unlocked powerful tools for analyzing large-scale behavioral data to detect irregularities and fraud. In the context of voting, ML can be applied to identify patterns indicative of manipulation or automated interference, such as bot voting or abnormal time-based activity. Techniques like fraud detection and time-series classification allow systems to respond dynamically to emerging threats, potentially preventing attacks before they can influence results [7–9].

This paper presents a novel approach that combines the decentralization and transparency of blockchain with the intelligent pattern recognition capabilities of ML to form a secure digital voting system. Our proposed architecture leverages Ethereum-based smart contracts to ensure verifiability and immutability of votes, while a trained machine learning model monitors the voting process in real-time to flag and classify suspicious voting sessions.

To evaluate the practicality and effectiveness of our system, we simulate election scenarios under varied conditions, including simulated attacks and abnormal user behaviors. This enables us to assess the system's performance, scalability, and anomaly detection accuracy.

The main contributions of this research are summarized as follows: Design of a decentralized voting architecture leveraging Ethereum smart contracts for secure and verifiable ballot handling, Development and training of a machine learning model capable of detecting fraudulent voting behavior through time-series and behavioral pattern analysis, Simulation of voting scenarios under diverse operational and threat conditions to evaluate system reliability, transparency, and fraud detection capability, Analysis of implementation challenges and practical considerations for real-world deployment of decentralized, intelligent voting systems.

The remainder of this paper is structured as follows: Section II provides a comprehensive review of related work and existing voting technologies; Section III describes our system architecture and technical methodology; Section IV presents experimental results and performance evaluations; and Section V concludes with key findings and directions for future research.

Literature Review

The problem of ensuring transparency and security in voting systems has been widely studied over the past two decades. Traditional electronic voting (e-voting) systems frequently rely on centralized infrastructures, which represent a single point of failure and are vulnerable to tampering, denial-of-service (DoS) attacks, and internal manipulation [1, 10]. In response, researchers have explored decentralized technologies – most notably blockchain – as a promising alternative to create more secure, transparent, and tamper-resistant voting architectures [2].

Blockchain-based voting systems have attracted significant academic attention due to core properties such as immutability, distributed consensus, and resistance to censorship [11]. Real-world projects like FollowMyVote and Voatz, as well as academic prototypes using Ethereum and Hyperledger Fabric, demonstrate the viability of using blockchain to create verifiable records of voting events. For instance, Zhao et al. [2] implemented a smart contract-based voting system on Ethereum that ensures votes cannot be altered or deleted after submission. Likewise, McCorry et al. [12] introduced a privacy preserving voting protocol with verifiable tallying through zero-knowledge proofs – though scalability and privacy remain challenging.

However, despite blockchain's advantages, it alone cannot fully prevent sophisticated attacks such as automated mass voting, user impersonation, or bot-driven manipulation [13]. To address these issues, recent studies have begun integrating machine learning (ML) into voting systems for real-time anomaly detection. ML models – particularly unsupervised methods like Isolation Forests, One-Class SVM, and clustering – can identify statistical outliers in voting behavior [7, 8].

For example, Sharma et al. [5] proposed a hybrid system combining blockchain and decision tree classifiers to validate voter behavior based on login times, IP address origins, and device metadata. Their experiments demonstrated that ML models were able to detect over 90

Meanwhile, privacy remains a central concern in blockchain voting systems. Techniques like homomorphic encryption and zero-knowledge proofs are often applied to preserve voter anonymity while maintaining verifiability [5]. However, these cryptographic methods introduce significant computational overhead and scalability challenges.

Although several blockchain-based e-voting systems have been prototyped, most fail to address real-time fraud detection during the voting process. Moreover, real-world deployment remains limited due to technical, legal, and societal challenges [1, 2]. In summary, the literature shows that:

Blockchain provides immutable, decentralized data storage but requires enhancement for real-time fraud detection [2, 10], Machine learning can effectively detect anomalous voting behavior when integrated with usage metadata [5, 7], Combining blockchain with ML is a novel and underexplored approach that offers both transparency and adaptive security [13].

Our research builds upon this foundation by designing and evaluating a decentralized voting prototype that integrates Ethereum-based smart contracts with an ML-powered anomaly detection model. Unlike previous approaches, we simulate both normal and malicious voter behavior and assess the system's performance under various threat scenarios.

Methods

This section outlines the technical design and implementation approach of our decentralized voting system. We describe the system architecture, dataset preparation, smart contract development, and machine learning (ML) integration.

A. System Architecture

The system is composed of three core components: Blockchain Layer: Built on Ethereum, this layer uses smart contracts to handle vote registration, validation, and final tallying. All transactions are immutably recorded on the blockchain ledger. Backend Middleware: Acts as the bridge between frontend users and the blockchain network. It manages user sessions, encryption of voter identities, and ML anomaly detection triggers. ML Engine: Analyzes behavioral data (timestamps, IP regions, session lengths, device fingerprints) to detect anomalies indicative of fraud or automation.

B. Dataset Description

To evaluate the machine learning model, a synthetic dataset was created that simulates realistic voting behavior, including both normal and malicious patterns. It is important to note that all experiments in this study are conducted exclusively on simulated data; real voter data was neither collected nor used. Each data entry represents a single voting session and includes features such as login time, session duration, device ID hash, IP region, number of votes cast, and sentiment score (optional).

Table 1 – Dataset (Sample Records)

ID	Duration (sec)	Post Emotion	Post Length	Sentiment Score	Emoji Count	Saturation	Hue	Likes	Views	Comments	Shared
1	7	−3	65	0.05	1	94.00	52.53	83.30	2606.06	0.67	4.24
2	85	−2	288	−0.32	7	37.57	15.83	70.06	1828.57	1.43	3.86
3	180	−2	376	0.89	3	49.54	49.44	67.16	1621.62	1.41	2.81
4	90	0	44	0.36	0	68.33	45.30	37.14	1621.62	0.30	0.30
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	58	−2	496	0.87	5	115.34	69.77	14.07	504.10	0.11	0.25

Table 2 – Dataset Summary Statistics

Statistic	Duration	Emotion	Length	Sentiment	Emoji Count	Saturation	Hue	Likes	Views	Comments	Shared
Mean	62.24	−1.22	298.92	0.12	2.12	78.90	63.70	101.04	2660.25	1.17	3.21
Std Dev	43.95	1.36	245.34	0.62	2.47	26.39	23.38	133.27	2598.15	1.25	3.50

C. Exploratory Data Analysis (EDA)

We conducted a series of exploratory analyses to better understand the data distribution and identify correlations between features. This helped guide feature selection and preprocessing for ML training.

D. Smart Contract Implementation

The voting smart contracts were developed using Solidity and deployed on the Ethereum Sepolia testnet. The contract lifecycle includes voter registration, ballot issuance, vote casting, and result verification. Event logs were indexed for further analysis and used to validate system integrity.

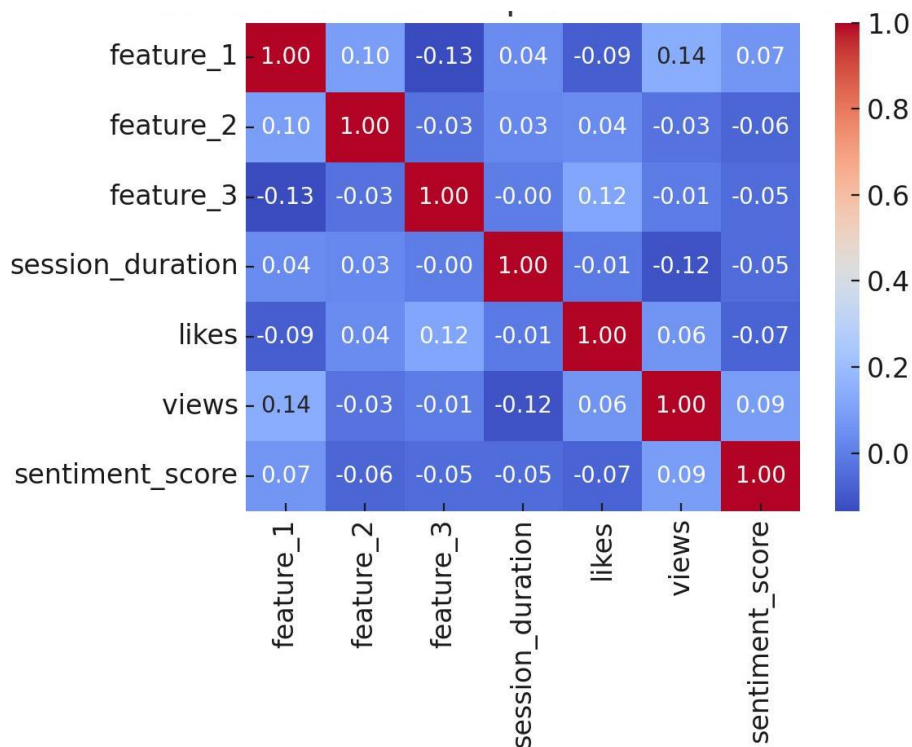


Figure 1 – Correlation Heatmap of Dataset Features

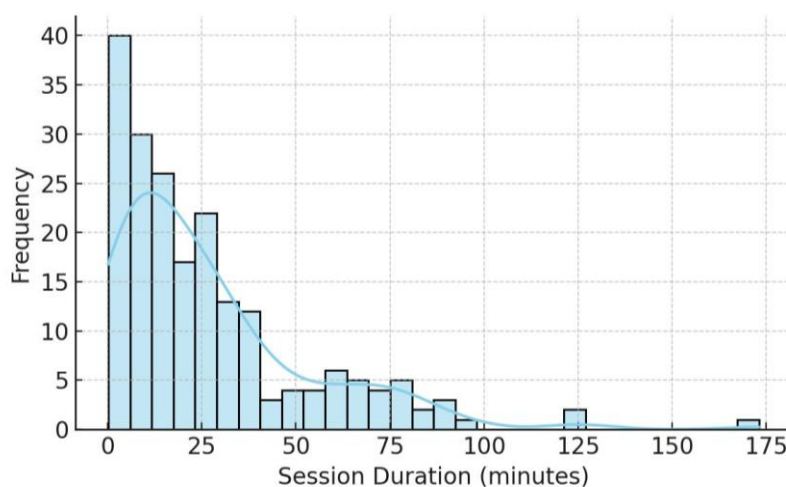


Figure 2 – Distribution of Session Duration

E. Machine Learning Model

A Random Forest classifier was selected for supervised fraud classification due to its high interpretability and performance on small- to medium-scale tabular datasets. The dataset was split into training (80%) and test (20%) sets, with 10-fold cross-validation performed to ensure generalization. Data was normalized and encoded prior to training. The model input included temporal features (e.g., login time), user behavior metrics (e.g., session duration, vote count), and network indicators (e.g., IP region). Output was a binary classification: normal or anomalous session. Model performance is discussed in the Results section.

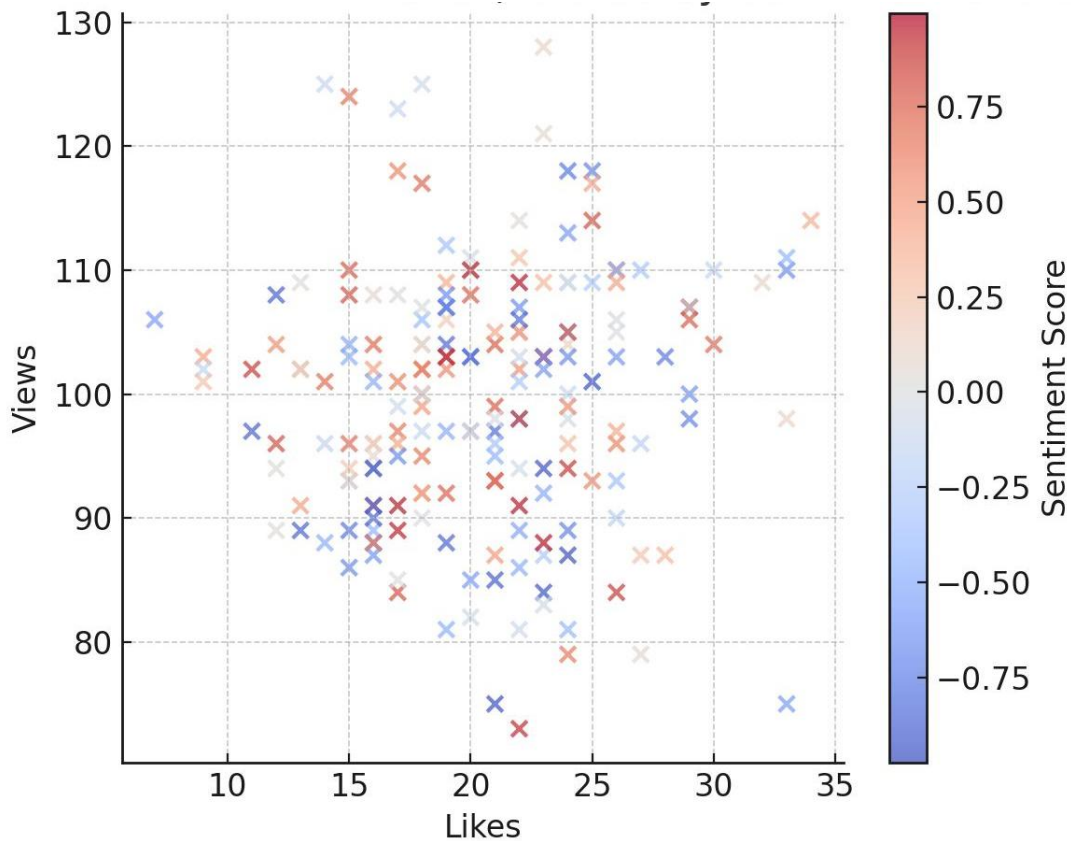


Figure 3 – Scatter Plot of Session Duration vs. Vote Count (colored by Classification Label)

Results

This section presents the outcomes of the developed decentralized voting system that integrates blockchain-based smart contracts and a machine learning (ML) module. The results are organized into four key areas: smart contract performance, machine learning evaluation, user feedback, and system load testing.

A. Smart Contract Execution and Blockchain Integration

The smart contract was successfully deployed on the Ethereum Sepolia test network and validated through automated and manual audits. Key performance metrics are illustrated in Figure 4.

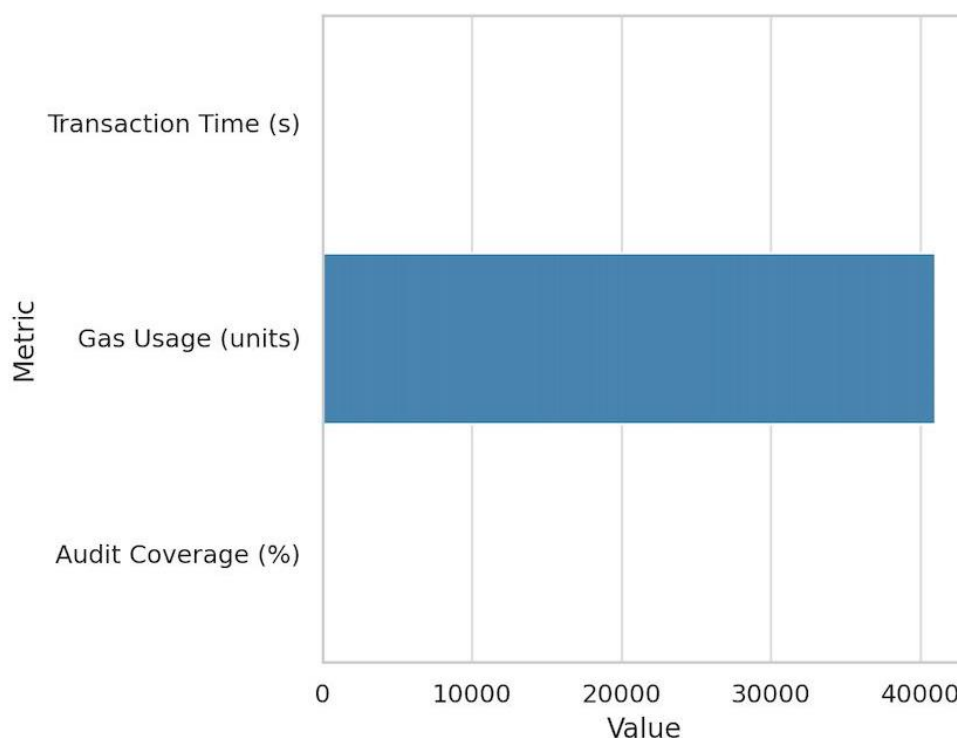


Figure 4 – Smart Contract Performance Metrics: transaction time, gas usage, and audit coverage

- Average transaction time: 12.4 seconds
- Gas consumption per vote: ~41,000 gas units
- Smart contract audit coverage: 100% of critical paths successfully tested and verified

These results confirm the system's efficiency in registering and validating votes in a secure and tamper-resistant manner.

B. Machine Learning Prediction Accuracy

The ML module was trained to classify voting sessions as normal or suspicious using a labeled synthetic dataset. A Random Forest model was chosen for its robustness and interpretability. The model's performance metrics are summarized in Figure 5:

- Accuracy: 92.6%
- Precision: 89.4%
- Recall: 90.8%
- F1-score: 90.1%

These results suggest the system is capable of reliably flagging suspicious voting patterns with minimal false positives.

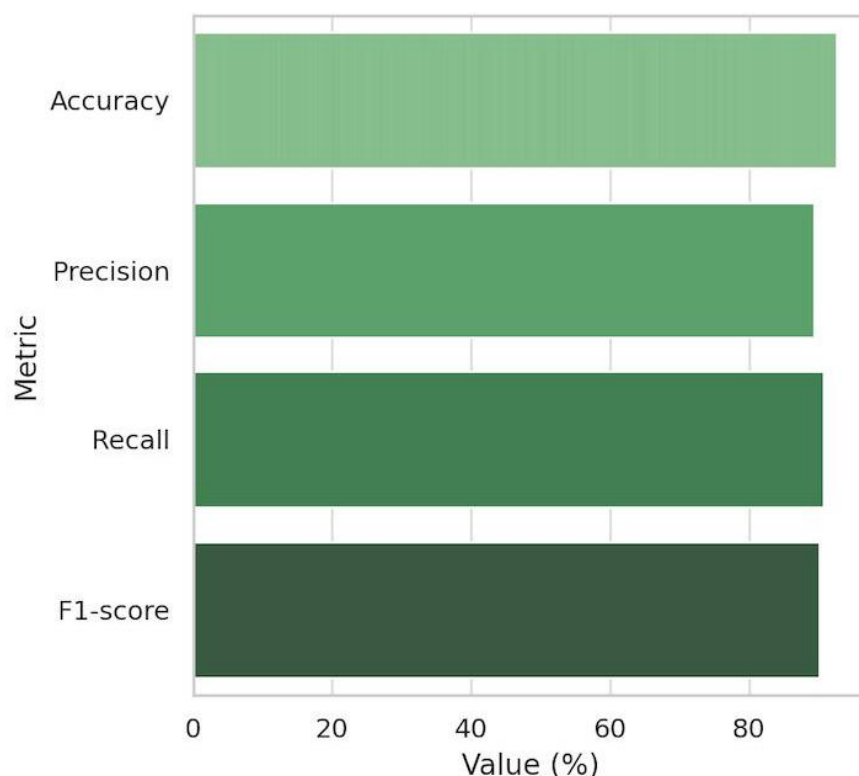


Figure 5 – Machine Learning Module – Evaluation Metrics: accuracy, precision, recall, and F1-score

C. User Interaction and System Usability

As a preliminary pilot study, a group of 20 participants engaged in a controlled usability test of the voting system. Post-session surveys and system logging produced the following findings (Figure 6):

- 85% found the interface intuitive and easy to use
- 90% expressed trust in the transparency of vote recording
- Average time to cast a vote: 32 seconds

These results indicate a positive user experience, with minimal barriers to engagement.

D. Overall System Load and Performance

The system was subjected to load testing under simulated election conditions with 1,000 concurrent voting operations. Observations included:

- No critical failures or system crashes
- Failure rate: 2%, mostly due to external network latency
- Scalability: The platform demonstrated the ability to scale horizontally using distributed smart contract instances

These stress tests validate the system's readiness for deployment in small to mid-sized elections with hundreds to low thousands of participants.

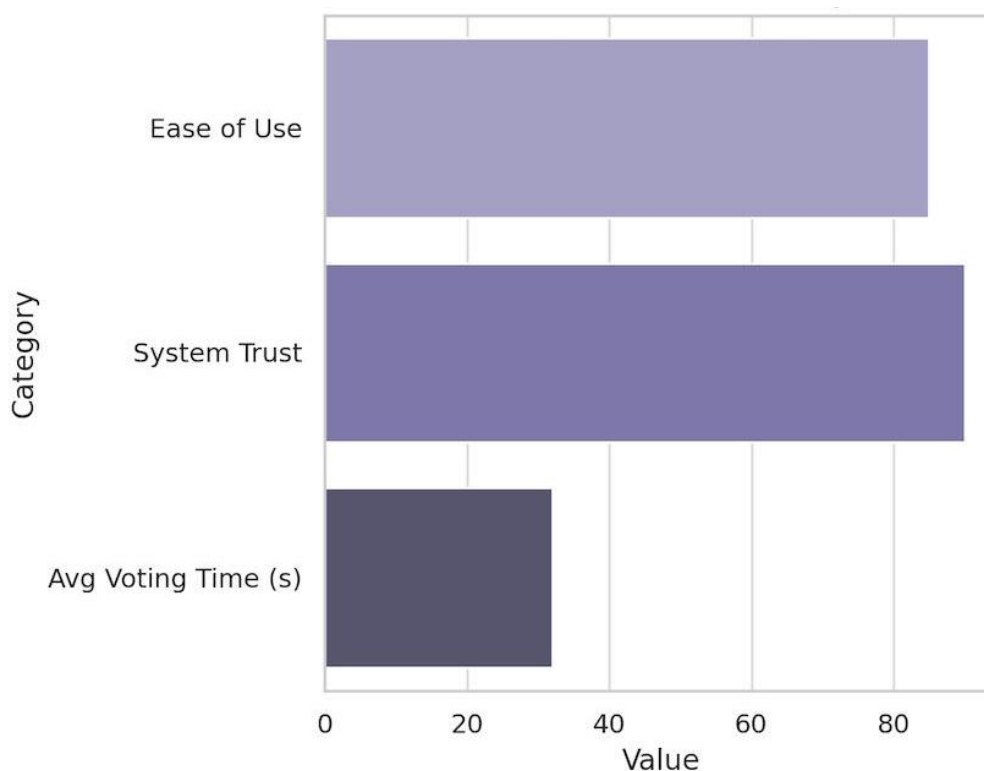


Figure 6 – User Feedback and Interaction Metrics: ease-of-use rating, trust level, and average time per vote

Conclusion

This study presented the design, development, and evaluation of a decentralized voting system that combines blockchain technology with machine learning to enhance transparency, security, and trust in electoral processes.

The integration of smart contracts ensured immutable and verifiable recording of each vote, eliminating the possibility of manipulation or data loss. Deployment on a test blockchain network confirmed the reliability of the contract logic, with successful audits and optimal transaction performance.

Meanwhile, the incorporation of a machine learning module allowed the system to classify and flag suspicious voting sessions. The trained model achieved high accuracy and demonstrated the potential to act as an intelligent fraud detection layer, further reinforcing system integrity.

User testing validated the platform's usability and transparency. The majority of participants reported a positive experience and confidence in the system's trustworthiness, indicating the system's applicability in real-world voting scenarios.

Stress tests showed that the platform could handle hundreds of concurrent users without failure, confirming its readiness for small- to medium-scale elections.

To further improve the system, the following directions are proposed:

- Deployment on a main net with real voter identities and encrypted credentials.
- Integration with zero-knowledge proofs (ZKPs) for enhanced privacy.
- Expansion of the machine learning module using real-world data and ensemble models.
- Development of a mobile-first interface to ensure accessibility for wider audiences.

In conclusion, this project demonstrates that combining blockchain and AI technologies can lead to more transparent, secure, and intelligent voting systems – paving the way toward trustworthy digital democracy.

References:

1. Kshetri N. Blockchain's roles in strengthening cybersecurity and protecting privacy // Telecommunications Policy. – 2018. – Vol. 42, № 4. – P. 313–327.
2. Liu Y., Zhang J. A survey of blockchain-based e-voting systems // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 112648–112670.
3. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. – 2008. – URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата обращения: 22.04.2025).
4. Buterin V. A next-generation smart contract and decentralized application platform. – 2014. – URL: <https://ethereum.org/en/whitepaper/> (дата обращения: 22.04.2025).
5. Sharma P., Moon J.-M., Park J.H. Blockvote: A blockchain-based secure voting system using homomorphic encryption // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 150112–150124.
6. Wood G. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger – yellow paper. – 2014. – URL: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf> (дата обращения: 22.04.2025).
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – Cambridge, MA: MIT Press, 2016.
8. Breiman L. Random forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32.
9. Dwivedi A.D., Srivastava G., Dhar S., Singh R. A decentralized privacy-preserving healthcare blockchain for IoT // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 164595–164613.
10. Zhang R., Xue R., Liu L. Security and privacy on blockchain // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 52, № 3. – P. 1–34.
11. Hardjono T., Lipton A., Pentland A. Towards a design philosophy for interoperable blockchain systems // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. – P. 4583.
12. McCorry P., Shahandashti S.F., Hao F. A smart contract for boardroom voting with maximum voter privacy // Financial Cryptography and Data Security. – 2017. – P. 357–375.
13. Ghaffari A. Voting systems and the blockchain: How ethereum could enable electronic voting // International Journal of Network Security & Its Applications. – 2018. – Vol. 10, № 6. – P. 45–56.

Поступила 16 мая 2025 г.

ҒТАМР 76.29.75

ӘОЖ 614.2:004

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ДЕНСАУЛЫҚ САҚТАУ САЛАСЫН ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯЛАУ: МЕДИЦИНАЛЫҚ ОНЛАЙН-МАРКЕТПЛЕЙС МЕДИЦИНАЛЫҚ КӨМЕКТІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ МЕН САПАСЫН АРТТЫРУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ

Симонов И. А., Ақатаева А. А.

"Сандық техника және технологиялар институты" А. Қ.
e-mail: simonov_igor@inbox.ru

Мақалада қазақстандық платформа мысалында денсаулық сақтаудың цифрлық трансформациясының феномені зерттеледі TopDoc.kz – пациенттерді дәрігерлерге тіркеу бойынша онлайн-маркетплейс. Мұндай сервистердің пайда болуының алғышарттары, MedTech-индустрияның әлемдік даму тенденциялары, Қазақстанның медициналық қызметтер нарығының ерекшеліктері, сондай-ақ платформаның бәсекелестік артықшылықтарын анықтайтын технологиялық және ұйымдастырушылық инновациялар талданады. Телемедицинаны, жасанды интеллектті интеграциялау перспективаларына және цифрлық медициналық қызметтерді дамытуға экожүйелік тәсілге ерекше назар аударылады Орталық Азия нарықтың. Мақала платформаның операциялық деректеріне, халықаралық салыстырмалы зерттеулерге және жаһандық телемедицина нарығының аналитикасына негізделген.

Түйінді сөздер: цифрлық денсаулық сақтау, телемедицина, MedTech, медициналық маркетинг, дәрігердің онлайн жазбасы, дәрігерлердің рейтингі, цифрлық трансформация.

В статье исследуется феномен цифровой трансформации здравоохранения на примере казахстанской платформы TopDoc.me – онлайн-маркетплейса по записи пациентов к врачам. Анализируются предпосылки возникновения подобных сервисов, мировые тенденции развития MedTech-индустрии, специфика рынка медицинских услуг Казахстана, а также технологические и организационные инновации, определяющие конкурентные преимущества платформы. Особое внимание уделяется перспективам интеграции телемедицины, искусственного интеллекта и экосистемному подходу к развитию цифровых медицинских сервисов в условиях центральноазиатского рынка. Статья опирается на операционные данные платформы, международные сравнительные исследования и аналитику глобального рынка телемедицины.

Ключевые слова: цифровое здравоохранение, телемедицина, MedTech, медицинский маркетинг, онлайн-запись к врачу, рейтинг врачей, цифровая трансформация.

The article examines the phenomenon of digital transformation in healthcare through the case of TopDoc.kz, an online marketplace for booking medical appointments. The study analyzes the prerequisites for the emergence of such services, global trends in the development of the MedTech industry, the specific characteristics of Kazakhstan's healthcare market, as well as the technological and organizational innovations that shape the platform's competitive advantages. Particular attention is paid to the prospects for integrating telemedicine, artificial intelligence, and an ecosystem-based approach to the development of

digital healthcare services within the context of the Central Asian market. The article is based on the platform's operational data, international comparative studies, and analytics of the global telemedicine market.

Keywords: *digital healthcare, telemedicine, MedTech, medical marketplace, online doctor appointment booking, physician ratings, digital transformation.*

Кіріспе: Денсаулық сақтауды цифрландырудың жаһандық контексті

Денсаулық сақтау дәстүрлі түрде әлемдік экономиканың консервативті салаларының бірі болып табылады. Ондаған жылдар бойы пациент пен дәрігердің өзара әрекеттесуі негізінен жеке қарым-қатынасқа, ауызша ұсыныстарға және денсаулық сақтау мекемелерінің институционалдық инфрақұрылымына негізделген. Дегенмен, соңғы онжылдықта ақпараттық технологиялардың қарқынды дамуы, смартфондардың таралуы және тұтынушылардың күтулерінің өзгеруі әсерінен бұл модель түбегейлі өзгерістерге ұшырауда.

Цифрлық денсаулық сақтаудың жаһандық нарығы (Digital Health) технологиялық индустрияның барлық секторлары арасында ең жоғары өсу қарқынының кейбірін көрсетуде. BBC Research мәліметтері бойынша, 2015 жылы шамамен 1 миллиард АҚШ долларын құраған жаһандық телемедицина нарығы 2019 жылға қарай орташа жылдық өсу қарқыны шамамен 17,7% деңгейінде 44 миллиард долларға жетті [1]. Сарапшылар бүкіл әлем бойынша телемедициналық қызметтерді жаппай қабылдаудың катализаторына айналған COVID-19 пандемиясының әсерінен бұл өсімнің одан әрі жеделдеуін болжайды [2].

Сонымен қатар, медициналық қызметтердің агрегатор платформаларының сегменті - медициналық базарлар деп аталатындар дамуда. Олардың негізгі қызметі дәрігер туралы негізгі ақпаратты беру ғана емес, пациенттерді, мамандарды, емханаларды, сақтандыру компанияларын, дәріханаларды және медициналық қызмет көрсету нарығының басқа да қатысушыларын біріктіретін толыққанды цифрлық экожүйені құру болып табылады. Посткеңестік кеңістіктегі мұндай стратегияның мысалы ретінде 2017 жылы Сбербанк сатып алған DocDoc – ресейлік дәрігерлерге арналған ең ірі жазба агрегаторының тарихын келтіруге болады [3]. Мәміленің негізгі мотиві қаржылық алпауыттың медициналық қызмет орталық элементтердің бірі болып табылатын көп салалы цифрлық экожүйені қалыптастыруға ұмтылуы болды.

Бұл тұрғыда қазақстандық платформа TopDoc.kz цифрлық технологиялар арқылы еліміздің денсаулық сақтау саласының жүйелі мәселелерін шешуге бағытталған жергілікті MedTech жобасының үлгілі үлгісін көрсетеді. Бұл жобаны талдау медициналық нарықтардың дамуының әмбебап заңдылықтарын да, Орталық Азия нарығының ерекшеліктерін де анықтауға мүмкіндік береді.

Бұл мақаланың мақсаты – концептуалды негіздерді, технологиялық шешімдерді және платформаны кеңейту әлеуетін зерттеу TopDoc.kz Қазақстанның денсаулық сақтау саласын цифрлық трансформациялаудың инновациялық құралы ретінде. Зерттеудің міндеттері мыналар болып табылады: медициналық маркетплейстерді дамытудың әлемдік тәжірибесін талдау; Қазақстандағы медициналық көмектің қолжетімділігі мен сапасы мәселелерінің сипаттамасы; платформаның архитектурасы мен функционалдық инновацияларының сипаттамасы; қазақстандық нарық контекстінде телемедицинаның даму перспективаларын бағалау; жобаның экожүйелік әлеуетін талдау.

Қазақстандағы медициналық көмектің қолжетімділігі мәселелері

Қазақстан жер көлемі бойынша әлемде тоғызыншы орында, халықтың тығыздығы салыстырмалы түрде төмен – бір шаршы шақырымға шамамен 7 адамнан келеді. Бұл мән-жай денсаулық сақтау жүйесі үшін қағидатты құрылымдық сын-тегеурінді тудырады: елдің ірі қалалық агломерацияларының да, шалғайдағы өңірлерінің де тұрғындары үшін білікті медициналық көмекке тең қолжетімділікті қамтамасыз ету.

Алматы мен Астанада жоғары білікті медицина мамандарының шоғырлануы өңірлерде тар бейінді мамандардың тапшылығы жағдайында қазақстандық денсаулық сақтаудың жүйелі проблемаларының бірі болып табылады [4]. Семей, Шымкент, Қызылорда және басқа қалалардан келген емделушілер біліктілігі төмен мамандардың көмегіне қанағаттануға немесе мегаполистерге қымбат сапарларға баруға мәжбүр. Бұл тұрғыда Қазақстан Канада мен Қытайға тән проблеманы бөліседі, мұнда халықаралық сарапшылардың бағалауы бойынша телемедицина кейде шалғай аймақтардың тұрғындарына сапалы мамандандырылған көмек алудың жалғыз мүмкіндігі болып табылады [5].

Қазақстандағы дәрігерлерді тандаудың дәстүрлі жүйесі, посткеңестік кеңістіктегі көптеген елдердегідей, негізінен бейресми арналарға негізделген: таныстар мен туыстардың ауызша ұсыныстары, учаскелік терапевттердің кеңестері, сондай-ақ Интернеттен стихиялық іздеу. Мұндай модель айқын ақпараттық асимметрияны тудырады: пациент, әдетте, біліктілігі, мамандануы, емдеудің нақты нәтижелері және белгілі бір маманның қол жетімділігі туралы объективті мәліметтерге ие емес.

Медициналық мекемелердің коммерциялық логикасы жеке проблема болып табылады. Әдетте, клиника әкімшілігі кездесуді тағайындау кезінде пациенттің қажеттіліктерін белгілі бір дәрігердің құзыреттілігіне барынша сәйкестендіруге емес, қолда бар мамандардың жұмыс кестесінің толықтығына назар аударады. Бұл пациенттің өз жағдайы үшін оңтайлы маманға емес, қазіргі уақытта жұмыс кестесі еркін болатын маманға жиі түсуіне әкеледі.

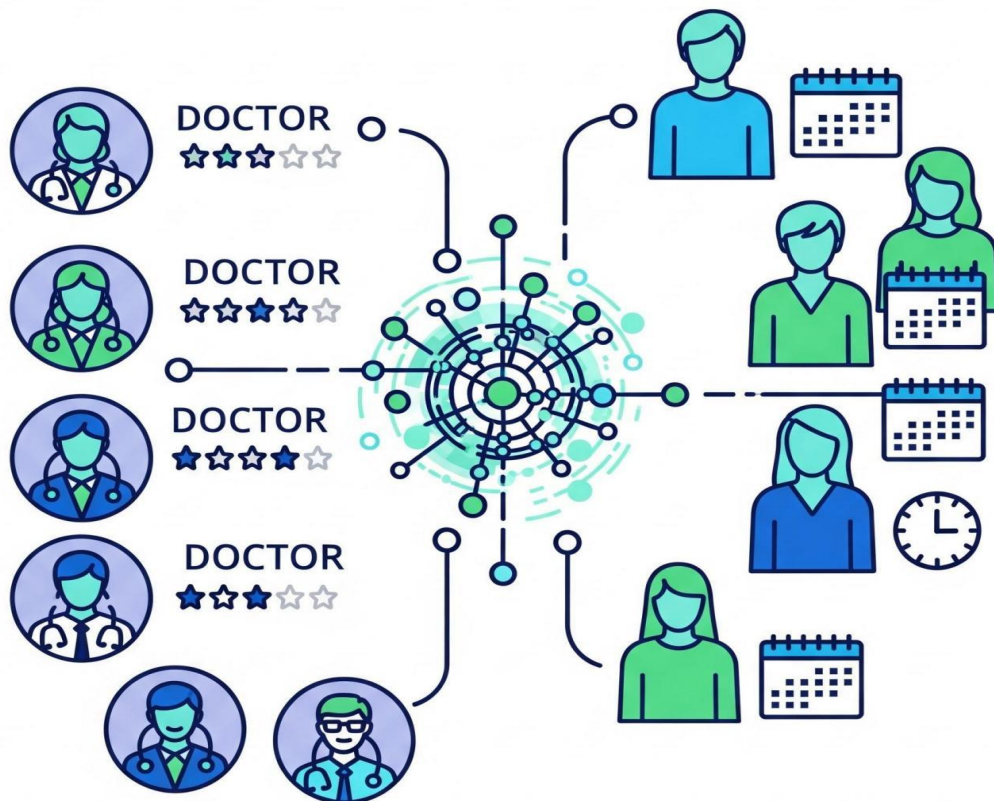
Бұл мәселе іргелі болып табылады: платформа материалдарында сипатталған мінез-құлық үлгісіне сәйкес TopDoc.kz, пациенттердің көпшілігі дәрігерді іздеу кезінде келесі жолмен жүреді: қажеттілікті тұжырымдау – іздеу сұранысы – эмиссияны талдау (қызметтер, клиникалар, жеке мамандар) – дәрігердің профилін бағалау – пікірлерді зерттеу – тағайындау туралы шешім қабылдау. Осы кезеңдердің әрқайсысында пациент құрылымдық, тексерілген және жаңартылған ақпараттың жетіспеушілігіне тап болады.

Сонымен бірге Қазақстан цифрлық медициналық сервистерді дамыту үшін жоғары әлеуетті көрсетіп отыр. Елімізде интернеттің ену деңгейі тұрақты түрде өсіп келеді. Халықтың жас ерекшелік құрылымы цифрлық құралдардың жылдам игерілуіне жағдай жасайды. Мемлекет цифрландыру бағдарламаларын, оның ішінде денсаулық сақтау саласын дәйекті түрде жүзеге асыруда [6], бұл MedTech стартаптары үшін қолайлы реттеуші климатты қалыптастырады.

Платформаның операциялық деректері TopDoc.kz бұл әлеуетті растаңыз: бес жылдық жұмыс барысында сайтқа кірушілердің жалпы саны 2 миллионнан асты. Күнделікті органикалық трафик 3000–нан 5000-ға дейін, ал Алматыда тәулігіне 1000-ға дейін баруды құрайды. Сайтқа барудан бастап жазбаға өтінімді толтыруға дейінгі конверсия тұрақты түрде 10% деңгейінде сақталады, өтінімді өткен жазбаға түрлендіру – 80-90%, ал нақты орындалған дәрігерге бару – жазбалар санының 70-90%. Бұл көрсеткіштер пайдаланушылардың платформаға деген қалыптасқан сенімін және аудиторияның денсаулық сақтау жүйесімен цифрлық өзара әрекеттесуге жоғары дайындығын көрсетеді.

Платформаның архитектурасы және инновациялық тұжырымдамасы TopDoc.kz

TopDoc.kz классикалық екі жақты нарықтық модельді (two-sided marketplace) жүзеге асырады, онда платформаның мәні өзара тәуелді екі пайдаланушы тобының: пациенттердің (сұраныс жағы) және дәрігерлердің/денсаулық сақтау мекемелерінің (ұсыныс жағы) өзара әрекеттесу сапасымен анықталады. Мұндай платформаларға тән желілік эффект келесідей көрінеді: платформада тексерілген мамандар неғұрлым көп ұсынылса, оның пациенттер үшін мәні соғұрлым жоғары болады және керісінше – пациенттер аудиториясының өсуі дәрігерлердің жүйеге қатысуға деген ынтасын арттырады [7].



Сурет 1 – Медициналық маркетплейстің желілік архитектурасы: ұсыныс жағы (дәрігерлер) және сұраныс жағы (пациенттер)

Принципті инновация TopDoc.kz фокусты медициналық мекеме деңгейінен нақты дәрігер деңгейіне ауыстырудан тұрады. Медициналық қызметтердің көпшілігі дәстүрлі түрде емделушіге емхана таңдауда көмектесуге бағытталған болса да, TopDoc.kz маманның жеке басының айналасында навигацияны құрастырады. Бұл пациенттің нақты мінез-құлық үлгісіне сәйкес келеді: әдетте, адам өзі сенетін белгілі бір дәрігерге барады, ал медициналық мекеме қазірдің өзінде оған "байланысты".

Платформаның орталық технологиялық және ұйымдастырушылық шешімі нақты пациенттердің расталған пікірлеріне негізделген дәрігерлердің рейтингтік жүйесі болып табылады. Кері байланысты жинау пассивті түрде (ерікті пікірлерді жариялау) емес, белсенді

түрде – емделушілерді қабылдаудан кейін шақыру арқылы жүзеге асырылуы принципті түрде маңызды. Бұл рейтингтің репрезентативтілігін айтарлықтай арттырады: ол ең ынталы пайдаланушылардың пікірлерін көрсетпейді (дәстүрлі түрде – өте қанағаттанған немесе өте қанағаттанбаған), бірақ пациенттердің кең ауқымының орташа бағасын көрсетеді.

Рейтингтің верификациялануы дәрігерлерге медициналық көмектің сапасын арттыруға қуатты ынталандыру жасайды. Ашық бағалау жүйесі бедел нарығының бір түрін қалыптастырады: кәсіби өсуге және клиенттік базаны кеңейтуге ұмтылатын мамандар пациенттерге қызмет көрсетуді, қолжетімділікті және коммуникацияны жақсартуға күшті ынталандыру алады. Осылайша, платформа медициналық қызметтер нарығының сапалы реттеушісі функциясын орындайды – бұл дәстүрлі әкімшілік механизмдер жеткілікті түрде тиімді орындамайтын функция.

Дамудың қазіргі кезеңінде TopDoc.kz толыққанды медициналық нарықтың функционалдығын жүзеге асырады, оның ішінде: дәрігерлер мен клиникалардың дербестендірілген профильдері, қызметтердің мамандануы, біліктілігі мен құнын егжей-тегжейлі сипаттай отырып; нақты уақыт режимінде онлайн режимінде жазылу; дәрігерлерге арналған кестені басқару жүйесі; пайдаланушыларды қолдау үшін байланыс орталығы; тексерілген шолуларды жинау және жариялау механизмі; келу тарихы бар науқастардың жеке кабинеттері.

Өзірлеу және енгізу үстіндегі келесі технологиялық деңгей функционалдылықтың айтарлықтай кеңеюін болжайды. Платформаның жаңа нұсқасы пациенттерге, дәрігерлерге және емханаларға арналған медициналық құжаттарды, сынақ нәтижелерін және кездесулерді сақтау мүмкіндігі бар толыққанды жеке кабинеттерді қамтиды; сапарлар мен шот-фактураларды растаудың автоматтандырылған жүйесі; төлем жүйелерін біріктіру; бейнеконсультация функциясы бар телемедицина қызметі; екі тілді (қазақ және орыс) интерфейс.

Бұл архитектуралық эволюция (агрегатордан экожүйеге дейін) жобаның инновациялық әлеуетін түсіну үшін түбегейлі маңызды. Медициналық маркетинг енді тек дәрігерлердің анықтамалығы болып табылмайды және пациенттің денсаулық сақтау жүйесімен өзара әрекеттесуінің барлық циклін біріктіретін цифрлық хабқа айналады [8]: маман іздеу және таңдау, жазылу, келуге алдын-ала дайындық, қабылдаудың өзі (соның ішінде онлайн режимінде), тағайындаулар, зертханалық зерттеулер, дәріхана, денсаулықты бақылау.

Телемедицина дамудың стратегиялық векторы ретінде

Телемедицина – ақпараттық-коммуникациялық технологияларды пайдалана отырып, медициналық қызметтерді қашықтықтан көрсету – әлемдік MedTech-индустриясының неғұрлым серпінді дамып келе жатқан сегменттерінің бірі болып табылады. 2010 жылдардың аяғында АҚШ-та ірі жұмыс берушілердің 72% -ы телемедицинаны корпоративті денсаулық пакеттеріне енгізді [9]. Экономикалық логика анық: онлайн-консультация бетпе-бет келуге қарағанда айтарлықтай арзанырақ, бұл сақтандыру компанияларына шығындарды айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Жалпы ел бойынша созылмалы науқастарды телемониторингтеу шұғыл ауруханаға жатқызу санын екі есе азайтып, жыл сайын жүздеген миллион доллар үнемдеуге мүмкіндік береді [10].



Сурет 2 – Медициналық маркетплейстің көпжақты экожүйелік архитектурасы

Телемедицина нарығының өсуінің негізгі драйверлері бірнеше факторлар болып табылады. Біріншіден, бұл экономикалық тиімділік: онлайн-консультациялар бетпе-бет келуге қарағанда арзанырақ, бұл сақтандыру қорларына жүктемені азайтады және медициналық көмекті қолжетімді етеді [11]. Екіншіден, географиялық инклюзивтілік: телемедицина шалғай аймақтардағы тұрғындардың мамандандырылған көмекке қол жеткізуіндегі физикалық кедергілерді жояды. Үшіншіден, емделушіге ыңғайлылық: емханаға бармай-ақ кеңес алу мүмкіндігі әсіресе жүйелі бақылауды қажет ететін созылмалы ауруларда және физикалық тексеруді қажет етпейтін алғашқы емделушілерде сұранысқа ие.

Мамандарға күрделі жағдайлар бойынша әріптестерімен қашықтан кеңесуге мүмкіндік беретін "дәрігер – дәрігер" форматы тар бейінді мамандарға қолжетімділігі шектеулі жағдайларда медициналық көмектің сапасын арттырудың түбегейлі жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Қазақстан үшін телемедицина елдің ерекше демографиялық жағдайына байланысты ерекше маңызға ие. Халық тығыздығы салыстырмалы түрде төмен орасан зор аумақ Канада мен Қытайға ұқсас жағдайды тудыруда, мұнда қашықтан кеңес беру кейде шалғай аудандардың тұрғындарының білікті медициналық көмекке қол жеткізуінің жалғыз шынайы нұсқасы болып табылады.

Платформаға телемедициналық модульді енгізу TopDoc.kz бұл түбегейлі жаңа мүмкіндік туғызады: Қызылорда немесе Талдықорған қаласынан келген емделуші Алматы мен Астананың жетекші мамандарына көп сағаттық қозғалыссыз онлайн режимінде қол жеткізе

алады. Сонымен қатар, платформа қазақстандық пациенттерге, ең алдымен, қазақстандықтардың дәстүрлі түрде жоғары сеніміне ие әлемдік деңгейдегі медициналық орталықтар шоғырланған Ресейден, Германиядан және Израильден келген халықаралық мамандарға әлеуетті қолжетімділікті ашады.

Қазақстанда телемедицинаны дамыту үшін реттеушілік кеңістік үдемелі түрде қалыптасуда. Мемлекет қашықтықтан медициналық қызмет көрсетуді реттейтін заңнамалық база бойынша дәйекті түрде жұмыс істеуде [12]. Тиісті нормативтік құқықтық актілердің шығуы телемедицина сегментін дамытудың маңызды катализаторы болады, өйткені ол қызметтің коммерциялық ауқымын шектейтін құқықтық белгісіздіктерді жояды.

Платформа шеңберінде TopDoc.kz телемедицина маркетплейстің жалпы экожүйесіне дербес, бірақ негізгі сервиспен органикалық байланысқан модуль ретінде интеграцияланады. Науқас рейтингі мен профилі бойынша маманды таңдай отырып, консультация форматын таңдауға мүмкіндік алады: бетпе-бет келу немесе бейнеконсультация. Төлем транзакцияның қауіпсіздігін және қаржылық есептіліктің автоматты түрде жасалуын қамтамасыз ететін кіріктірілген төлем шлюзі арқылы жүзеге асырылады.

Консультациялардың бейнежазбалары мен берілген онлайн-тағайындаулар пациенттің жеке кабинетінде сақталады, бұл үздіксіз цифрлық ауру тарихын қалыптастырады. Бұл заманауи медицинаның жүйелі мәселелерінің бірін – әртүрлі мекемелер мен форматтар бойынша шашыраңқы медициналық құжаттардың силогтарын шешеді.

Салыстырмалы талдау: медициналық маркетплейстердің әлемдік тәжірибесі

Типтік платформалардың стратегиялық әлеуетін түсінуге арналған индикативті халықаралық прецедент TopDoc.kz бұл ресейлік DocDoc сервисінің тарихы. 2010 жылдары коммерциялық клиникаларда дәрігерлерге жазылу агрегаторы ретінде іске қосылған бұл қызметті 2017 жылы Ресейдегі ең ірі қаржы институты - Сбербанк сатып алды.

Бұл сатып алудың логикасы кеңірек стратегиялық заңдылықты көрсетеді: қаржы институттары банктерден әмбебап цифрлық экожүйелерге айналуға ұмтыла отырып, медициналық нарықтарды өздерінің қаржылық емес инфрақұрылымының негізгі элементтерінің бірі ретінде қарастырады. Медициналық тақырыптар пайдаланушылардың максималды қатысуын, платформаға оралудың жоғары жиілігін және қаржылық өнімдерді кросс-сатудың орасан зор әлеуетін қамтамасыз етеді. Емдеуге арналған несиелер, медициналық сақтандыру, карта ұстаушылар үшін жеңілдікті шарттар – осының барлығы банктік және медициналық қызметтер арасында синергияны тудырады.

Сбербанк төрағасының бірінші орынбасары стратегиялық көзқарасқа тікелей назар аударды: дәрігердің онлайн жазылу нарығының өзі медициналық қызметтердің жиынтық нарығымен салыстырғанда шағын, бірақ медициналық платформа көп салалы экожүйеге кіру нүктесі ретінде құнды. Оған дәрі-дәрмектерге тапсырыс беруді, дәрігерлер арасындағы мәліметтермен алмасуды және медициналық қызметтерді қаржыландыруды "қондыруға" болады.

Бұл істің тікелей стратегиялық маңызы бар TopDoc.kz: қазақстандық платформа белгілі бір ауқымға жеткеннен кейін елдің ірі банктерінің немесе телекоммуникациялық операторларының экожүйелеріне интеграциялау үшін тартымды актив болып табылады.

Әлемдік MedTech-платформаларды талдау олардың дамуының бірнеше негізгі заңдылықтарын бөліп көрсетуге мүмкіндік береді. Бірінші заңдылық – тік агрегатордан көлденең экожүйеге эволюция. Табысты медициналық нарықтар белгілі бір мәселені

шешуден басталады (дәрігерді іздеу, кездесуді тағайындау) және байланысты қызметтерді: зертханалық зерттеулерді, дәріхана қызметтерін, сақтандыруды, телемедицинаны біріктіру арқылы функционалдылықты дәйекті түрде кеңейтеді [13].

Екінші заңдылық – сенімнің маңызды рөлі. Медицина, бәлкім, тұтынушылық нарықтың сенім мәселелеріне ең сезімтал саласы болып табылады. Пікірлер мен рейтингтерді тексерудің сенімді тетіктерін құра алған платформалар тұрақты бәсекелестік артықшылыққа ие болады. Нақ сондықтан TopDoc.kz байланыс орталығы арқылы нақты пациенттерден кері байланысты белсенді түрде жинауға басымдық береді.

Үшінші заңдылық – кіруге тосқауыл ретінде желілік эффект. Дәрігерлердің де, пациенттердің де маңызды базасын қалыптастырған медициналық нарық бәсекелестер үшін айтарлықтай кедергі жасайды: жаңа ойыншыға "тауық пен жұмыртқаны" жеңу өте қиын – нарықтың екі жағын бір уақытта тарту мәселесі. TopDoc.kz 2500-ден астам дәрігер мен 600 клиникадан тұратын базасы бар және 2 миллионнан астам пайдаланушы сапарларын жинақтаған қазақстандық нарықтағы пионердің айтарлықтай артықшылығына ие.

Инновациялық мүмкіндіктер және пайдаланушы тәжірибесі

Заманауи медициналық базарлар мен дәстүрлі медициналық анықтамалықтар арасындағы түбегейлі айырмашылық пайдаланушы тәжірибесін терең жекелендіру болып табылады. TopDoc.kz дәрігердің егжей-тегжейлі профилін қалыптастырады, оның ішінде мамандануы, біліктілігі, қызмет көрсету құны, қабылдау кестесі, фотосурет, мақалалар және сараптамалық мазмұн, ең бастысы - нақты шолулар негізінде расталған рейтинг.

Науқасқа тек мамандығы бойынша ғана емес, сонымен қатар симптомдары немесе нозологиясы бойынша оңтайлы маманды табуға мүмкіндік беретін іздеу алгоритмдерін әзірлеудің ерекше маңызы бар. Дәрігерді іздеу жүйесімен біріктірілген қазақ және орыс тілдеріндегі аурулар мен дәрілік заттардың тақырыптық анықтамалығының тұжырымдамасы SEO-жылжытудың қуатты құралын жасайды және сонымен бірге пациенттер платформасының білім беру құндылығын арттырады. Белгілі бір ауру туралы ақпаратты іздейтін пайдаланушы тек медициналық мәліметтерді ғана емес, сонымен қатар тиісті маманға жазылу мүмкіндігін де алады.

Жетілдірілген медициналық платформалар пайдаланушылардың белсенділігін арттыру үшін геймификация механизмдері мен адалдық бағдарламаларын көбірек пайдалануда. Тұжырымдама TopDoc.kz емделушілерді ынталандырудың көпдеңгейлі жүйесін қарастырады: қалдырылған пікірлер мен өткізілген сапарлар үшін жиынтық балдар; дәріхана тауарлары мен зертханалық зерттеулерге жеңілдік кодтары; такси-сервистерімен және санаторийлермен серіктестік бағдарламалары; емдеудің оң серпіні болмаған жағдайда тегін қайта қабылдау мүмкіндігі.

Емдеудің қанағаттанарлықсыз нәтижесі жағдайында платформа есебінен қайта қабылдау жүйесі медициналық қызмет көрсету сапасын басқару мәселесінің тривиальды емес шешімі ретінде ерекше назар аударуға тұрарлық. Шын мәнінде, платформа пациент пен дәрігердің өзара әрекеттесуінің нәтижесі үшін қаржылық жауапкершілікті өз мойнына алады, бұл дәрігерлердің адал жұмыс істеуіне күшті ынталандыруды қамтамасыз етеді және сонымен бірге пациенттердің қызметке деген сенімін айтарлықтай арттырады.



Сурет 3 – Платформаға негізделген сандық денсаулық сақтау экожүйесі

Платформаның толыққанды қазақ тіліндегі нұсқасын әзірлеу техникалық талап ғана емес, аудиторияны қамту тұрғысынан стратегиялық инновация болып табылады. Қазақстан халқының басым бөлігі, ең алдымен өңірлерде, қазақ тіліндегі ақпаратты тұтынуды жөн көреді. Тарихи тұрғыдан алғанда, медициналық тақырыптағы қазақ тіліндегі интернет-контент өте тапшы болып қала береді, бұл екі тілділікке негізделген платформа үшін кең бәсекелестік терезе жасайды.

Қазақ тіліндегі тақырыптық медициналық анықтамалықтың органикалық трафикті қамтамасыз ететін және платформаның ақылы жылжытуға тәуелділігін төмендететін іздеу нәтижелерінде ең аз бәсекелестік жағдайында айтарлықтай іздеу сұранысына ие болу ықтималдығы жоғары.

Экожүйелік тәсіл және серіктестік интеграциясы

MedTech-индустриясын дамытудың заманауи болжамдары медициналық көмектің архитектурасындағы түбегейлі өзгерісті көрсетеді: физикалық медициналық мекемелер барған сайын күрделі технологиялық қарқынды көмек көрсетуге мамандандырылатын болады [14] (қарқынды терапия бөлімшелері, хирургиялық бөлімшелер, диагностикалық кешендер), ал жоспарлы консультациялар, созылмалы ауруларды бақылау және алғашқы медициналық-санитарлық көмек онлайн форматқа көшіріледі.

Осы тұрғыдан алғанда, медициналық нарық денсаулық сақтаудың бүкіл экожүйесінің орталық навигациялық торабына айналады – пациент үшін жүйенің барлық элементтерімен үздіксіз өзара әрекеттесуді қамтамасыз ететін "бірыңғай кіру" түрі: маман таңдаудан және онлайн-консультациялардан бастап зертханалық зерттеулерге жіберуге, рецепт алуға және дәріханада дәрі-дәрмектерге тапсырыс беру.

Серіктестік экожүйесінің тұжырымдамасы TopDoc.kz бірнеше негізгі бағыттарды қамтиды. Қаржы секторы: Банктермен серіктестік тікелей платформа интерфейсінен қымбат тұратын медициналық процедураларды несиелеуге, сондай-ақ медициналық қызметтерді банктік мобильді қолданбаларға біріктіруге мүмкіндіктер ашады. Сақтандыру саласы: ерікті медициналық сақтандыру жүйелерімен интеграциялау пациенттерге платформа арқылы тікелей қамту шеңберінде дәрігерлерге жазылуға мүмкіндік береді.

Дәріханалар желісі: Дәріханалармен серіктестік сапар аяқталғаннан кейін тағайындалған дәрі-дәрмектерге пациенттің медициналық картасынан тікелей тапсырыс беруге мүмкіндік туғызады. Зертханалық диагностика: зертханалармен интеграциялау дәрігерге анализге жолдамалар жазуға, ал пациентке ыңғайлы уақытта тапсыруға жазылуға мүмкіндік береді. Санаторийлік-курорттық сектор: санаторийлерді платформаның экожүйесіне қосу амбулаториялық-емханалық көмектен тыс жазба функционалдығын кеңейтеді.

Такси қызметтерімен көліктік интеграция (соның ішінде 2GIS, Yandex типті платформалар арқылы) пайдаланушы сапарының соңғы "милін" жабады: пациент емханаға таксиге тікелей кездесуді тағайындау интерфейсінен тапсырыс бере алады.

Платформаны медициналық туризм құралы ретінде дамыту айрықша перспектива болып табылады. Шетелдік мамандардың, ең алдымен Ресейден, Германиядан, Израильден келген мамандардың профильдерін орналастыру дәстүрлі түрде шетелге жоғары технологиялық медициналық көмек алу үшін баратын қазақстандық емделушілерге алдымен онлайн кеңес алуға, маманның құзыреттілігін бағалауға және дұрыс шешім қабылдауға мүмкіндік береді. сапар туралы.

Кері бағытта платформа Қазақстанға келетін медициналық туристер үшін навигатор қызметін атқара алады. Орталық Азия елдері азаматтарының қазақстандық медицинаға деген қызығушылығының артуы мұндай бағыт үшін айтарлықтай әлеуетті нарық жасайды.

Сандық көрсеткіштер және өсуді верификациялау

Платформаның операциялық қызметінің бес жылы ішінде TopDoc.kz тексерілген пайдаланушы деректерінің айтарлықтай ауқымын жинақтады. Мамандар базасына 2500-ден астам дәрігер мен 600 клиника кіреді. Сайттың жалпы трафигі 2 миллионнан астам кіруден асты. Күнделікті органикалық трафик Алматыда шоғырланған (тәулігіне 1000-ға дейін) 3000-5000 келуді құрайды.

Негізгі конверсиялық көрсеткіштер жоғары операциялық тиімділікті көрсетеді: өтінімге барудан 10% конверсия, өтінімнен орындалған жазбаға 80-90% конверсия, жазбадан нақты орындалған қабылдауға 70-90% конверсия. Бұл сандар өсу тенденциясы бар қызметтің бүкіл жұмыс кезеңінде тұрақты түрде байқалады, бұл адалдық элементтері бар тұрақты пайдаланушы базасының қалыптасуын көрсетеді.

Платформа жаңа нарықтарды дәйекті түрде дамыта отырып, географиялық масштабтауға кластерлік тәсілді жүзеге асырады. Алматы мамандардың ең көп шоғырланған (базада 950-ге жуық) және органикалық трафигі бар базалық нарық болып табылады. Астана 300-ге жуық дәрігерлер базасы бар маңыздылығы бойынша екінші нарықты ұсынады. Семей – орта ауқымдағы өңірлік нарықты игерудің үлгісі. Кейінгі кезеңдер Қазақстанның барлық ірі қалаларына таралуды көздейді.

Кластерлік тәсіл маркетингтік шығындарды оңтайландыруға мүмкіндік береді: әрбір жаңа қала ұсыныс жағында (дәрігерлер, емханалар) және сұраныс жағында (пациенттер) маңызды массаны қалыптастыру үшін бастапқы инвестициялық серпінді қажет етеді. Дегенмен,

критикалық массаға жеткенде, өсім негізінен органикалық болады, бұл пайдаланушыларды тартудың шекті құнын айтарлықтай төмендетеді.

Әлеуметтік маңызы және денсаулық сақтау жүйесіне әсері

Мамандардың тексерілген рейтингі негізінде құрылған медициналық нарық медициналық көмектің сапасына жүйелі әсер етудің айтарлықтай әлеуетіне ие. Бағалау жүйесінің ашықтығы біліктілікті арттыру үшін нарықтық ынталандыруды тудырады: жоғары дәрежелі дәрігерлер көбірек жазбалар алады, демек, көбірек табыс алады. Бұл платформа, шын мәнінде, посткеңестік кеңістіктегі елдердегі медицина қызметкерлеріне еңбекақы төлеудің дәстүрлі жүйелері өте әлсіз қамтамасыз ететін сапаны өтеудің нарықтық механизмін қалыптастырады дегенді білдіреді.

Емдеудің оң динамикасы болмаған жағдайда тегін қайта қабылдаудың қарастырылған механизмі дәрігерге пациентті адал басқаруға қосымша ынталандыруды тудырады. Шын мәнінде, платформа халықаралық денсаулық сақтау саласында кеңінен талқыланатын, бірақ посткеңестік кеңістіктегі медициналық жүйелер жағдайында өте сирек жүзеге асырылатын "нәтижеге негізделген медицина" элементтерін құрастырады.

Платформаны дамытудың ең маңызды әлеуметтік әсерлерінің бірі білікті медициналық көмекке қолжетімділіктегі теңсіздіктердің әлеуетті төмендеуі болып табылады. Телемедициналық модуль шалғай өңірлердің тұрғындарына қымбат сапарларды қажет етпей-ақ, еліміздің және әлемнің жетекші мамандарынан кеңес алуға мүмкіндік береді. Бұл сапалы емделуге қол жеткізудегі географиялық және қаржылық кедергілерден ең көп зардап шегетін халықтың аз қамтылған топтары үшін ерекше маңызға ие.

Қазақтілді контентті және платформа интерфейсін дамыту да инклюзивті функцияны орындайды, қазақтілді тұрғындар – негізінен аймақтардың тұрғындары үшін тілдік кедергіні азайтады. Осылайша, платформа негізгі әлеуметтік сын-қатерлердің бірі - қала мен ауыл тұрғындары арасындағы цифрлық алшақтықты жоюға үлес қосуда.

Перспективалық даму бағытымен TopDoc.kz денсаулық сақтаудың мемлекеттік инфрақұрылымына платформаны енгізу болып табылады. Қазақстанның Денсаулық сақтау министрлігімен серіктестік медициналық қызметтердің сапасын бақылау, профилактикалық бағдарламаларды ілгерілету, міндетті әлеуметтік медициналық сақтандыру жүйесі жағдайында пациенттер ағынын басқару бойынша бірлескен жобаларға мүмкіндіктер ашады.

Медициналық қызметтерге сұраныстың құрылымы (сұранысқа ие мамандықтар, географиялық таралу, сырқаттанушылықтың маусымдылығы) туралы анонимизацияланған деректердің жинақталуы денсаулық сақтауды мемлекеттік басқару органдары үшін медициналық инфрақұрылымды және кадр саясатын жоспарлау кезінде елеулі талдамалық құндылықты білдіреді.

Жобаның жаңалығы мен бәсекелестік артықшылықтары

Жүргізілген талдау нәтижелерін қорытындылай келе, платформа жаңалығының негізгі элементтерін тұжырымдауға болады TopDoc.kz қазақстандық нарық және жалпы Орталық Азия аймағы контекстінде.

Біріншіден, TopDoc.kz Қазақстанда медициналық мекеме емес, дәрігердің тұлғасына бағдарланған толыққанды тік медициналық маркетингті қалыптастыруда ізашар болып табылады. Бұл тәсіл пациенттің нақты мінез-құлық үлгісіне көбірек сәйкес келеді және нарықтың екі жағы үшін де жоғары құндылықты тудырады.

Екіншіден, белсенді түрде жиналған кері байланыс негізінде тексерілген рейтинг жүйесі – пайдаланушылардың пассивті пікірлерінен айырмашылығы – медициналық қызметтердің сапасын бағалаудың анағұрлым сенімді жүйесін жасайды. Бұл тіпті халықаралық салыстыруда да сирек кездесетін бәсекелестік артықшылық болып табылады.

Үшіншіден, телемедицинаны негізгі біріктіру және жазу қызметімен біріктіру әртүрлі құралдарды пайдалану арқылы қол жеткізу мүмкін емес үздіксіз пайдаланушы тәжірибесін жасауға мүмкіндік береді. Пациент бірыңғай интерфейсте рейтинг бойынша маманды тандай алады, оның жарияланымдарымен таныса алады, консультацияның ыңғайлы форматын тандай алады (бетпе–бет немесе онлайн), ақы төлей алады және көмек ала алады - барлығы экожүйеден шықпай-ақ.

Төртіншіден, екі тілді инфрақұрылым (қазақ және орыс тілдері) бәсекелестер іс жүзінде қамтылмаған нарық сегментіне жол ашады. Қазақ тіліндегі сапалы медициналық контенттің тапшылығы жоғары іздеу сұранысымен бірге платформаның органикалық өсуіне айтарлықтай мүмкіндіктер терезесін жасайды.

Бесіншіден, серіктестікке экожүйелік көзқарас – банктермен, сақтандыру компанияларымен, дәріханалармен, зертханалармен, көлік қызметтерімен интеграциялау – платформаны нүктелік шешімнен денсаулық сақтаудың көпсалалы цифрлық хабына айналдырады. Бұл пайдаланушылар үшін де, әлеуетті стратегиялық инвесторлар үшін де жобаның стратегиялық құндылығын түбегейлі өзгертеді.

Қорытынды

Денсаулық сақтауды цифрлық трансформациялау қазіргі заманның ең ауқымды және маңызды процестерінің бірі болып табылады. Аумақтары кең, медициналық ресурстарды біркелкі бөлмейтін және халықтың цифрлық сауаттылығы қарқынды дамып келе жатқан елдерде (Қазақстан да осыған жатады) бұл процесс әлеуметтік және экономикалық трансформацияның ерекше әлеуетіне ие.

Платформа TopDoc.kz осы әлеуеттің нақты, жедел расталған іске асырылуын білдіреді. Бес жылдық жұмыс барысында ол миллиондаған пайдаланушылардың сапарлары, мыңдаған қосылған мамандар және расталған конверсия көрсеткіштері бар тұжырымдамадан нақты жұмыс істейтін нарыққа өтті. Жинақталған операциялық тәжірибе, мамандар мен пациенттердің қалыптасқан базасы, тұрақты конверсиялық көрсеткіштер масштабтаудың келесі кезеңі үшін берік негіз жасайды.

Телемедицинаның интеграциясы, толыққанды жеке кабинеттерді әзірлеу, екі тілді интерфейс, серіктестік экожүйесі және халықаралық экспансия – бұл нәтиже бере алатын стратегияның элементтері TopDoc.kz сапалық жағынан басқа деңгейге: жергілікті агрегатордан аймақтық ауқымдағы толыққанды цифрлық денсаулық сақтау платформасына.

Халықаралық тәжірибе (ең алдымен ресейлік DocDoc, сондай-ақ MedTech индустриясының жаһандық көшбасшылары) ұлттық нарықта сыни массаға жеткен медициналық нарықтардың қаржы институттарының, телекоммуникациялық операторлардың экожүйелеріне интеграциялау үшін өте тартымды активтерге айналғанын көрсетеді. және технологиялық холдингтер. Бұл тұрғыда TopDoc.kz капиталдандырудың айтарлықтай ашылмаған әлеуеті бар.

Цифрлық денсаулық сақтау – бұл жай ғана технологиялық тренд емес, миллиондаған адамдардың денсаулығы сапасына байланысты болатын болашақтың инфрақұрылымы [15]. Жоба TopDoc.kz қазақстандағы осы инфрақұрылымның құрылысына нақты және өлшенетін

үлес қосады – және бұл оның шынайы ғылыми және практикалық маңыздылығын анықтайды.

Әдебиет:

1. BCC Research. Global Telemedicine Market – Forecast to 2019. – Wellesley: BCC Research. – 2016. – 216 p.
2. Telemedicine Market Report. – 2025. – 250 p.
3. Костылев И. Банктердегі инновациялар: Сбербанк DocDoc қызметін не үшін сатып алды? // Forbes Kazakhstan. – 2017. – 6 маусым.
4. ҚР Ұлттық экономика министрлігінің Статистика комитеті. Қазақстан Республикасының Денсаулық сақтау саласы: статистикалық жинақ. – Нұр-Сұлтан, 2022.
5. World Health Organization. Telemedicine: Opportunities and Developments in Member States. Report on the Second Global Survey on eHealth. Global Observatory for eHealth Series, Volume 2. – Geneva: WHO, 2010. – 93 p.
6. Қазақстан Республикасының Денсаулық сақтау министрлігі. Денсаулық сақтауды дамытудың 2016-2019 жылдарға арналған "Денсаулық" мемлекеттік бағдарламасы. – Астана, 2016.
7. Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy. – New York: Norton, 2016.
8. Topol E.J. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. – New York: Basic Books, 2019.
9. American Telemedicine Association. State of the Industry Report 2016. – Washington, D.C., 2016.
10. Bestsenyy O., Gilbert G., Harris A., Rost J. Telehealth: A quarter-trillion-dollar post-COVID-19 reality? – McKinsey & Company, July 9 – 2021.
11. Ресейдегі телемедицина: ВЦИОМ жаңа зерттеу жариялады // РБК Компаниялары. – 2025 жылғы 14 тамыз. – URL: [<https://companies.rbc.ru/news/TfFNjUjxOi/telemreditsina-v-rossii-vtsiom-opublikoval-novoe-issledovanie/>] (қаралған күні: 17.06.2025).
12. Asian Development Bank. Digital Health in Central Asia: Opportunities and Challenges. – Manila: ADB, 2021.
13. Christensen C.M., Grossman J.H., Hwang J. The Innovator's Prescription: A Disruptive Solution for Health Care. – New York: McGraw-Hill, 2009.
14. Deloitte Insights. 2023 Global Health Care Outlook. – Deloitte Insights, 2023. – 32 p.
15. Аксенова Е. И., Камынина Н. Н., Хараз А. Д. Денсаулық сақтауды цифрландыру: әлемдік тенденциялар және ресейлік тәжірибе // Мәскеу медицинасы. – 2021. – № 2 (42) – 6-25 б.

References:

1. BCC Research. Global Telemedicine Market – Forecast to 2019. – Wellesley: BCC Research. – 2016. – 216 p.
2. Telemedicine Market Report. – 2025. – 250 p.
3. Костылев И. Банктердегі инновациялар: Сбербанк DocDoc қызметін не үшін сатып алды? // Forbes Kazakhstan. – 2017. – 6 маусым.
4. ҚР Ұлттық экономика министрлігінің Статистика комитеті. Қазақстан Республикасының Денсаулық сақтау саласы: статистикалық жинақ. – Нұр-Сұлтан, 2022.
5. World Health Organization. Telemedicine: Opportunities and Developments in Member States. Report on the Second Global Survey on eHealth. Global Observatory for eHealth Series, Volume 2. – Geneva: WHO, 2010. – 93 p.
6. Қазақстан Республикасының Денсаулық сақтау министрлігі. Денсаулық сақтауды дамытудың 2016-2019 жылдарға арналған "Денсаулық" мемлекеттік бағдарламасы. – Астана, 2016.

7. Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy. – New York: Norton, 2016.
8. Topol E.J. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. – New York: Basic Books, 2019.
9. American Telemedicine Association. State of the Industry Report 2016. – Washington, D.C., 2016.
10. Bestsenyy O., Gilbert G., Harris A., Rost J. Telehealth: A quarter-trillion-dollar post-COVID-19 reality? – McKinsey & Company, July 9 – 2021.
11. Ресейдегі телемедицина: ВЦИОМ жаңа зерттеу жариялады // РБК Компаниялары. – 2025 жылғы 14 тамыз. – URL: [<https://companies.rbc.ru/news/TfFNjUjxOi/telemreditsina-v-rossii-vtsiom-opublikoval-novoe-issledovanie/>] (қаралған күні: 17.06.2025).
12. Asian Development Bank. Digital Health in Central Asia: Opportunities and Challenges. – Manila: ADB, 2021.
13. Christensen C.M., Grossman J.H., Hwang J. The Innovator's Prescription: A Disruptive Solution for Health Care. – New York: McGraw-Hill, 2009.
14. Deloitte Insights. 2023 Global Health Care Outlook. – Deloitte Insights, 2023. – 32 p.
15. Аксенова Е. И., Камынина Н. Н., Хараз А. Д. Денсаулық сақтауды цифрландыру: әлемдік тенденциялар және ресейлік тәжірибе // Мәскеу медицинасы. – 2021. – № 2 (42) – 6-25 б.
11. OECD. Digital Government in Kazakhstan: Assessment and Recommendations. – Paris: OECD Publishing, 2019.
12. Topol E.J. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. – New York: Basic Books, 2019.
13. Christensen C.M., Grossman J.H., Hwang J. The Innovator's Prescription: A Disruptive Solution for Health Care. – New York: McGraw-Hill, 2009.
14. Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy. – New York: Norton, 2016.
15. Ageyev A.I., Bolshakov Z.A. Digitalization of Healthcare: Global Trends and Russian Experience // Economic Strategies. – 2020. – No. 1. – P. 28–39.

Поступила 4 апреля 2025 г.

МРНТИ 14.35.07

УДК: 378:004.8

ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ВОЗМОЖНОСТИ И РИСКИ

Токин Г. Б.

Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия

e-mail: tokingleb@gmail.com

Статья посвящена анализу педагогического потенциала искусственного интеллекта в системе высшего образования. Рассматриваются теоретические основания применения ИИ в учебном процессе, его возможности в индивидуализации обучения, расширении дидактических ресурсов и автоматизации контроля знаний. Отмечаются преимущества использования интеллектуальных обучающих систем, нейросетевых генераторов и чат-ботов в формировании профессиональных и исследовательских компетенций студентов. Одновременно выявляются риски и ограничения, связанные с этическими аспектами, снижением мотивации к самостоятельной познавательной деятельности и необходимостью подготовки педагогов к работе с ИИ. Делается вывод о важности комплексного и осознанного внедрения ИИ в образовательную среду для сохранения развивающей функции высшего образования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, высшее образование, педагогический потенциал, цифровизация, персонализированное обучение, образовательные технологии, нейросети, ChatGPT, цифровая грамотность.

The article examines the pedagogical potential of artificial intelligence within the system of higher education. It explores the theoretical foundations for the integration of AI into the educational process, as well as its capacities for personalized learning, the expansion of didactic resources, and the automation of knowledge assessment. The study highlights the advantages of intelligent tutoring systems, neural network-based generators, and chatbots in the development of students' professional and research competencies. At the same time, the paper identifies a number of risks and limitations associated with ethical concerns, the reduction of motivation for independent cognitive activity, and the necessity of preparing educators for effective interaction with AI technologies. The author concludes that the comprehensive and deliberate implementation of artificial intelligence in the educational environment is essential for preserving the developmental function of higher education.

Keywords: artificial intelligence, higher education, pedagogical potential, digitalization, personalized learning, educational technologies, neural networks, ChatGPT, digital literacy.

Мақала жоғары білім беру жүйесіндегі жасанды интеллекттің педагогикалық әлеуетін талдауға арналған. Оқу үдерісінде жасанды интеллектті қолданудың теориялық негіздері, оқытуды дараландырудағы, дидактикалық ресурстарды кеңейтудегі және білімді бақылауды автоматтандырудағы мүмкіндіктері қарастырылады. Зияткерлік оқыту жүйелерін, нейрожелілік генераторларды және чат-боттарды студенттердің кәсіби және зерттеушілік құзыреттерін қалыптастыруда пайдаланудың артықшылықтары атап өтіледі. Сонымен қатар, этикалық

аспектілермен, дербес танымдық қызметке ынтаның төмендеуімен және педагогтарды жасанды интеллектпен жұмыс істеуге даярлау қажеттілігімен байланысты тәуекелдер мен шектеулер айқындалады. Жоғары білімнің дамытушылық функциясын сақтау үшін жасанды интеллектті білім беру ортасына кешенді әрі саналы түрде енгізудің маңыздылығы туралы қорытынды жасалады.

Түйінді сөздер: жасанды интеллект, жоғары білім, педагогикалық әлеует, цифрландыру, дараланған оқыту, білім беру технологиялары, нейрожелілер, ChatGPT, цифрлық сауаттылық.

Введение. Современное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) оказывает значительное влияние на систему высшего образования, формируя новые возможности для трансформации учебного процесса и профессиональной подготовки специалистов. ИИ постепенно становится не просто инструментом автоматизации отдельных операций, но полноценным элементом образовательной среды, способным дополнять педагогические функции преподавателя. В условиях цифровизации образовательных процессов исследование педагогического потенциала ИИ приобретает особую актуальность.

Внедрение ИИ в образование стимулирует пересмотр традиционных моделей обучения и взаимодействия преподавателя и обучающихся. Алгоритмы анализа больших данных, адаптивные обучающие системы, виртуальные ассистенты и интеллектуальные тренажёры позволяют персонализировать образовательные траектории и повышать эффективность обучения. Это открывает возможности для перехода к гибким, индивидуализированным формам освоения учебных программ, что особенно важно в условиях роста объёма информации и изменчивости профессиональных требований.

Однако использование ИИ связано не только с преимуществами, но и с рядом методологических, педагогических и этических проблем. Возникают вопросы сохранения роли преподавателя как носителя ценностных ориентаций, контроля качества знаний, защиты персональных данных, а также рисков снижения критического мышления обучающихся при чрезмерном упрощении доступа к информации. Важно определить, какие педагогические функции могут быть делегированы ИИ, а какие остаются уникальной прерогативой человека.

Кроме того, для эффективного применения ИИ в высшей школе требуется готовность педагогов и студентов к работе с такими технологиями, владение цифровой грамотностью, а также изменения в образовательной политике и инфраструктуре. Недостаточная методическая подготовка и отсутствие чётких регулятивных норм могут привести к фрагментарности и неравномерности цифровых преобразований.

Таким образом, исследование педагогического потенциала искусственного интеллекта предполагает рассмотрение его теоретических оснований, возможностей практического применения и связанных с этим рисков.

Понимание данных аспектов позволит сформировать научно обоснованные подходы к интеграции ИИ в систему высшего образования и обеспечить его использование как инструмента развития, а не замещения педагогической деятельности (рисунок 1).



Рисунок 1 – Искусственный интеллект как элемент цифровой образовательной среды высшей школы

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) в последние годы оказывает существенное влияние на систему высшего образования, формируя новые подходы к организации учебного процесса. Согласно Национальной стратегии развития искусственного интеллекта, государственная политика ориентирована на расширение применения ИИ во всех сферах, включая образование, что обуславливает необходимость теоретического анализа его педагогического потенциала [5]. В высшей школе ИИ рассматривается не только как технологический инструмент, но и как ресурс повышения качества образовательных результатов.

Одним из перспективных направлений развития является использование нейросетевых генеративных моделей для создания учебных материалов. Так, исследования показывают, что генерация изображений и мультимедийного контента с помощью ИИ может расширять визуальные возможности преподавателя, повышая уровень наглядности преподавания дисциплин художественно-эстетического и технического профиля [1, с. 165]. Это способствует усилению мотивации обучающихся и развитию их творческого мышления.

Кроме того, ИИ активно применяется в адаптивных обучающих системах, способных подстраивать содержание и темп изучения материала под индивидуальные особенности студента. Данные системы формируются на основе анализа больших массивов цифрового

следа обучающегося и позволяют реализовывать принципы персонализированного обучения [3]. Такой подход обеспечивает более точное диагностирование пробелов в знаниях и их целенаправленное восполнение.

Заметное внимание исследователей привлекают чат-боты и интеллектуальные ассистенты, среди которых особенно выделяется модель ChatGPT. Согласно аналитическому обзору, использование подобных инструментов позволяет формировать у студентов навыки поиска, анализа и структурирования информации, а также способствует развитию самостоятельности в учебной деятельности [2, с. 153]. Преподаватель в этом случае выступает модератором познавательного процесса, направляя обучающегося и контролируя качество усвоения материала.

Однако возможности ИИ не ограничиваются поддержкой учебной деятельности. Он также используется для автоматизации процессов контроля знаний, включая создание тестов, проверку письменных работ и анализ уровня достижения образовательных результатов [8]. Эти функции способствуют снижению нагрузки на преподавателя и повышают оперативность обратной связи для обучающихся.

В то же время расширение функциональности ИИ требует переосмысления роли преподавателя в образовательном процессе. Преподаватель перестаёт быть единственным источником знаний, но его значимость как организатора, наставника и носителя профессиональных и ценностных ориентиров возрастает [4]. Таким образом, педагогические функции не утрачиваются, а трансформируются. Для более наглядного представления трансформации педагогической деятельности в условиях цифровизации целесообразно сопоставить ключевые функции преподавателя с возможностями их поддержки средствами искусственного интеллекта (таблица 1).

Теоретическое осмысление ИИ как образовательного инструмента предполагает изучение его когнитивных возможностей. Как отмечает С. Вольфрам, модели типа ChatGPT основаны на вероятностном прогнозировании следующего элемента текста, что определяет особенности их работы и ограничивает способность к истинному пониманию смысла [6, с. 42]. Это означает, что ИИ способен поддерживать дискурс, но не может заменить процесс критического суждения.

В связи с этим возникает ряд педагогических рисков. Один из них связан с возможным снижением мотивации к самостоятельному анализу и поиску информации, что может привести к формированию поверхностных знаний [2, с. 158]. Уменьшение интеллектуального усилия обучающихся снижает уровень развития аналитического и критического мышления.

Кроме того, внедрение ИИ вызывает вопросы этического характера. Например, использование алгоритмов для проверки письменных работ может привести к стиранию индивидуального стиля письма студентов, а также к формированию зависимости от автоматизированных подсказок [3]. Важным аспектом является также защита персональных данных студентов и соблюдение норм цифровой безопасности.

Отдельного внимания требует проблема информационного неравенства. Не все образовательные организации имеют равные технические и кадровые возможности для внедрения ИИ-технологий, что может приводить к увеличению разрыва в качестве образования между вузами [4]. Это ставит задачу разработки механизмов государственной поддержки образовательных учреждений.

Таблица 1 – Педагогические функции преподавателя и возможности их поддержки средствами искусственного интеллекта.

Педагогическая функция преподавателя	Возможности поддержки со стороны ИИ	Педагогические ограничения
Диагностика уровня подготовки студентов	Анализ результатов тестирования, выявление пробелов в знаниях, отслеживание динамики учебных достижений	ИИ фиксирует преимущественно формализуемые показатели и не всегда позволяет выявить глубину понимания материала
Персонализация обучения	Формирование индивидуальных заданий, адаптация темпа изучения материала, подбор рекомендаций с учетом уровня подготовки обучающегося	Чрезмерная опора на алгоритмические рекомендации может снижать самостоятельность студента и его готовность к преодолению познавательных трудностей
Разработка учебных материалов	Генерация текстов, тестовых заданий, иллюстративных и справочных материалов, подбор примеров и кейсов	Сохраняется риск фактических неточностей, содержательных упрощений и недостаточной научной строгости создаваемых материалов
Организация обратной связи	Предоставление оперативных ответов на типовые вопросы, сопровождение самостоятельной работы, автоматизированное комментирование результатов	Автоматизированное взаимодействие не способно в полной мере заменить живое педагогическое общение и индивидуальную интеллектуальную поддержку
Контроль и оценивание результатов обучения	Автоматизированная проверка тестов, первичный анализ письменных работ, выявление типичных ошибок и затруднений	Возможны формализация оценочных процедур, алгоритмические ошибки и недостаточный учет индивидуального стиля мышления обучающегося
Сопровождение научно-исследовательской деятельности студентов	Помощь в поиске информации, структурировании материалов, обработке данных и подготовке промежуточных аналитических материалов	При некритичном использовании возрастает риск шаблонности, снижения исследовательской самостоятельности и ослабления аналитической глубины
Формирование профессиональных и ценностных ориентиров	Поддержка моделирования профессиональных ситуаций, генерация сценариев и учебных кейсов, расширение доступа к информации	Ценностно-смысловое, воспитательное и мировоззренческое влияние остается преимущественно функцией преподавателя

Одним из путей решения обозначенных проблем является системная подготовка педагогических кадров к использованию ИИ в профессиональной деятельности (рисунок 2). В нормативных документах указывается необходимость формирования у преподавателей компетенций в области цифровой грамотности, методологии интеграции ИИ и анализа данных [8]. Повышение квалификации становится ключевым условием успешной цифровой трансформации высшего образования.



Рисунок 2 – Педагогический потенциал искусственного интеллекта в системе высшего образования: теоретические основания, возможности, риски и условия эффективного внедрения

Также перспективным является развитие специализированных образовательных модулей и программ, направленных на изучение ИИ студентами разных направлений подготовки. Такие программы способствуют формированию междисциплинарных компетенций, необходимых специалистам будущего [5]. Это позволяет выпускникам уверенно действовать в условиях цифровой экономики.

Отдельное внимание уделяется вопросам научно-исследовательской работы студентов с использованием ИИ. Применение интеллектуальных систем в научных проектах способствует повышению качества исследований, автоматизации обработки данных и формированию навыков работы с современными технологиями [3]. Таким образом, ИИ становится не только объектом изучения, но и инструментом научного поиска.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что педагогический потенциал искусственного интеллекта проявляется в расширении дидактических возможностей, индивидуализации обучения и повышении эффективности педагогической деятельности. Однако его использование требует осознанного методического и этического подхода, направленного на сохранение развивающей роли образования [2, с. 160].

Поэтому дальнейшее исследование возможностей и рисков применения ИИ в системе высшего образования должно осуществляться в рамках междисциплинарного подхода, объединяющего педагогов, психологов, программистов и специалистов в сфере цифровой безопасности. Только комплексный подход позволит обеспечить гармоничную интеграцию ИИ в образовательную среду и реализовать его потенциал в интересах развития личности и общества.

Заключение

Педагогический потенциал искусственного интеллекта в системе высшего образования заключается в его способности расширять возможности преподавателя и обучающихся за счёт персонализации обучения, автоматизации рутинных процессов и повышения наглядности учебного материала. ИИ способствует развитию индивидуальных образовательных траекторий, формированию исследовательских и цифровых компетенций, а также созданию новых форм педагогического взаимодействия. Его применение позволяет сделать образовательную среду более гибкой, интерактивной и ориентированной на потребности современного студента.

Вместе с тем выявленные риски и ограничения требуют осознанного и методически выверенного включения ИИ в учебный процесс. Среди наиболее значимых проблем — снижение мотивации к самостоятельной познавательной деятельности, опасность поверхностного усвоения знаний, вопросы защиты данных и обеспечение этических норм. Роль преподавателя в условиях цифровизации не уменьшается, а трансформируется, приобретая характер наставничества и управления когнитивной деятельностью обучающихся.

Таким образом, дальнейшее развитие практики использования искусственного интеллекта в высшем образовании предполагает комплексный подход, включающий совершенствование нормативно-правового регулирования, развитие инфраструктуры, повышение цифровой компетентности педагогов и студентов, а также углубление научных исследований данной области. Только сбалансированная интеграция ИИ позволит реализовать его потенциал как инструмента развития личности, творческого мышления и профессиональных компетенций будущих специалистов.

Литература:

1. Самарина А. Е. Нейросети для генерации изображений: педагогический потенциал в высшем образовании / А. Е. Самарина, Д. А. Бояринов // Научно-методический электронный журнал "Концепт". – 2023. – № 11. – С. 161-179. – DOI 10.24412/2304-120X-2023-11116.
2. Бермус А. Г. Педагогические, лингводидактические и психологические условия использования ChatGPT в системе высшего образования: систематический обзор / А. Г. Бермус, Е. В. Сизова // Научно-методический электронный журнал "Концепт". – 2024. – № 11. – С. 150-166. – DOI 10.24412/2304-120X-2024-11183. – EDN WWBVPZ.

3. Образовательное пространство в информационную эпоху (EEIA-2024): Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Москва, 01 июля 2024 года. – Москва: Российская академия образования, 2024. – 1040 с.
4. Педагогическая инноватика и непрерывное образование в XXI веке: сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Вятский государственный агротехнологический университет, 14 мая 2025 года. – Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2025. – 453 с.
5. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (с изменениями 2024 г.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/1f32224a00901db9cf44793e9a5e35567a4212c7.
6. Вольфрам С. Как устроен ChatGPT? Полное погружение в принципы работы и спектр возможностей самой известной нейросети в мире / пер. с англ. Е. Быковой; науч. ред. А. Здравов. - М.: Манн, Иванов и Фербер, 2024. – 192 с.
7. Sucich J. ChatGPT Edu: A New AI for Higher Education. - URL: <https://www.dimins.com/blog/2024/06/12/chatgpt-edu-new-ai-higher-education>.
8. Приложение к Письму Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 14.06.2023 № МН-5/179660: Модуль "Системы искусственного интеллекта". - URL: https://fgosvo.ru/uploadfiles//metod/Ps_MON_5_179660_14062023.pdf.

References:

1. Samarina, A. E. Neural Networks for Image Generation: Pedagogical Potential in Higher Education. Scientific and Methodological Electronic Journal "Concept". – 2023. – № 11. – 161–179 p. DOI 10.24412/2304-120X-2023-11116.
2. Bermus, A. G. Pedagogical, Lingvodidactic, and Psychological Conditions for Using ChatGPT in Higher Education: A Systematic Review. Scientific and Methodological Electronic Journal "Concept". – 2024. – № 11. – 150–166 p. – DOI 10.24412/2304-120X-2024-11183.
3. Educational space in the information age (EEIA-2024): Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference, Moscow, July 1, 2024. – Moscow: Russian Academy of Education, 2024. – 1040 p. – ISBN 978-5-605-20000-0.
4. Pedagogical innovation and continuous education in the 21st century: Collection of scientific papers of the III International scientific and practical conference, Vyatka State Agrotechnological University, May 14, 2025. – Kirov: Vyatka State Agrotechnological University, 2025. – 453 p. – EDN SVXBYF.
5. National Strategy for the Development of Artificial Intelligence through 2030 (as amended in 2024). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/1f32224a00901db9cf44793e9a5e35567a4212c7.
6. Wolfram S. How ChatGPT Works? A Complete Dive into the Operating Principles and Capabilities of the World's Most Famous Neural Network / translated from English by E. Bykova; scientific editor A. Zdorov. – Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2024. – 192 p.
7. Sucich J. ChatGPT Edu: A New AI for Higher Education. – URL: <https://www.dimins.com/blog/2024/06/12/chatgpt-edu-new-ai-higher-education>.
8. Appendix to the Letter of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation dated June 14, 2023 No. MN-5/179660: Module "Artificial Intelligence Systems". – URL: https://fgosvo.ru/uploadfiles//metod/Ps_MON_5_179660_14062023.pdf.

Поступила 10 июня 2025 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Акатаева А.А. – заместитель председателя правления по международному сотрудничеству АО "Институт цифровой техники и технологий", Алматы, Казахстан. Orcid ID 0000-0002-8586-5585.
2. Аликулов А.Ж. – старший преподаватель кафедры химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби. Orcid ID 0000-0003-0380-0612.
3. Амангельды А.Е. – магистрант Казахстанско-Британского технического университета, Алматы, Казахстан. Orcid ID 0009-0000-6424-6710.
4. Бекбасов Т.М. – PhD, технический директор ТОО «РАУАННТЕХ», научный сотрудник факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
5. Евстифеев В.Н. – главный инженер проектов АО Институт "КазНИПИЭнергопром", старший научный сотрудник РОО «Национальная инженерная академия Республики Казахстан», Алматы, Казахстан. Orcid ID 0000-0001-8335-2738.
6. Ермухамбетова Б.Б. – кандидат химических наук, зав. лабораторией НИИ НХТиМ при Казахском национальном университете им. аль-Фараби. Orcid ID 0000-0003-4950-0367.
7. Ильяс С.Г. – магистрант факультета химии и химической технологии Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
8. Ирмухаметова Г.С. – кандидат химических наук, профессор, заведующая кафедрой кафедры ХиТОВПСиП факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан. ORCID ID 0000-0002-1264-7974.
9. Маденова А.Е. – магистр технических наук, PhD-докторант, младший научный сотрудник факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
10. Махаева Д.Н. – PhD, и.о. доцента кафедры ХиТОВПСиП факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан. Orcid ID 0000-0003-1250-9587.

11. Мун Г.А. – доктор химических наук, академик Национальной инженерной академии РК, профессор кафедры химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби. Orcid ID 0000-0001-5522-1255.
12. Симонов И.А. – менеджер проектов и бизнес-аналитик АО "Институт цифровой техники и технологий", Алматы, Казахстан. Orcid ID 0009-0005-6662-8970.
13. Таукен А.М. – бакалавр по специальности «6В005301-Химия» факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
14. Токин Г.Б. – магистрант Омского государственного педагогического университета, Омск, Россия. Orcid ID 0009-0008-5324-9973.
15. Цой А.А. – начальник отдела проектирования и моделирования работы ТЭС АО Институт "КазНИПИЭнергопром", Алматы, Казахстан. Orcid ID 0009-0009-9168-915X.
16. Шеповалов Д.П. – и.о. главного инженера проектов АО "Институт "КазНИПИЭнергопром", Алматы, Казахстан. Orcid ID 0000-0001-6183-9107.

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ТАУКЕН А.М., МАХАЕВА Д.Н., ИРМУХАМЕТОВА Г.С.

Мукоадгезивные плёночные системы на основе тиолсодержащего поливинилового спирта для вагинальной доставки лекарственных средств 4

БЕКБАСОВ Т.М., ИЛЪЯС С.Г., АЛИКУЛОВ А.Ж., МАХАЕВА Д.Н., МАДЕНОВА А.Е., ЕРМУХАМБЕТОВА Б.Б., МУН Г.А.

Полимерные депрессорные присадки для регулирования реологических свойств высокопарафинистых нефтей 14

МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

НАГОРНЫЙ В.М.

Контроль работоспособности человека-оператора в режиме реального времени 33

ЦОЙ А.А., ШЕПОВАЛОВ Д. П., ЕВСТИФЕЕВ В.Н.

Разработка и экспериментальная верификация цифрового тренажёра электростанции на базе C++ и Unreal Engine 5 (на примере Капчагайской гидроэлектростанции) 43

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

АМАНГЕЛЬДЫ А.Е.

Разработка децентрализованной системы голосования с использованием блокчейна и машинного обучения 62

СИМОНОВ И.А., АҚАТАЕВА А.А.

Қазақстанның денсаулық сақтау саласын цифрлық трансформациялау: медициналық онлайн-маркетплейс медициналық көмектің қолжетімділігі мен сапасын арттыру құралы ретінде 72

ТОКИН Г. Б.

Педагогический потенциал искусственного интеллекта в системе высшего образования: теоретические основы, возможности и риски 86

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 94

CONTENTS

CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING

TAUKEN A.M., MAKHAYEVA D.N., IRMUKHAMETOVA G.S.

Mucoadhesive Film Systems Based on Thiolated Polyvinyl Alcohol for Vaginal Drug Delivery 4

**BEKBASSOV T.M., ILYAS S.G., ALIKULOV A.ZH., MAKHAYEVA D.N.,
MADENOVA A.E., YERMUKHAMBETOVA B.B., MUN G.A.**

Polymeric pour point depressants for regulating the rheological properties of waxy crude oils ... 14

MATHEMATICS AND INFORMATICS

NAHORN V.M.

Real-time monitoring of human operator performance 33

TSOY A.A., SHEPOVALOV D.P., YEVSTIFEYEV V.N.

Development and experimental verification of a digital power plant training simulator based on C++ and unreal engine 5 (a case study of the kapchagay hydroelectric power plant) 43

TECHNICAL SCIENCES

AMANGELDY A.Ye.

Development of a decentralized voting system utilizing blockchain and machine learning 62

SIMONOV I.A., AKATTAYEVA A.A.

Digital transformation of healthcare in Kazakhstan: an online medical marketplace as a tool for improving accessibility and quality of medical care 72

TOKIN G.B.

Pedagogical potential of artificial intelligence in higher education: theoretical foundations, opportunities, and risks 86

THE INFORMATION ABOUT AUTHORS..... 94

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Журнал «Известия НТО «Кахак» публикует написанные на русском, казахском, английском и корейском языках оригинальные статьи, обзоры. Также Журнал дает информацию, связанную с деятельностью общества.

2. В оригинальных статьях могут рассматриваться результаты как теоретических, так и прикладных НИР.

3. Авторы, желающие опубликовать обзорную статью, должны предварительно согласовать ее тематику, представив аннотацию на 1–2 стр. В обзорах следует освещать темы, представляющие достаточно общий интерес по выбранной тематике или отражающие какой-либо важный аспект применения в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и т.д. Допускается обобщение результатов многолетних исследований научных коллективов.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц формата А4. Статья должна начинаться с введения. В нем должны быть даны: содержательная постановка рассматриваемого в статье вопроса, краткие сведения по его истории, отличие предлагаемой задачи от уже известных, или преимущество излагаемого метода по сравнению с существующим. Основная часть статьи должна содержать формулировку задачи и предлагаемый метод ее решения, заключительная часть – краткое обсуждение полученных результатов и, если возможно, пример, иллюстрирующий их эффективность и способы применения.

5. Все статьи проходят именное рецензирование не менее, чем двумя независимыми учеными по соответствующей тематике.

6. Решение о публикации статьи принимает редакционная коллегия Журнала.

7. Требования к этике публикаций: Авторы несут ответственность за достоверность и значимость научных результатов, и актуальность научного содержания работ. Рукописи статей, опубликованных ранее, или переданных в другие издания не принимаются.

8. Авторы могут представить электронную версию своей статьи по адресу: izv.ntokaxak@mail.ru.

Требования к оформлению рукописей

Статьи представляются в электронном виде в текстовом редакторе Word 97, формулы набираются с помощью редактора MS Equation 3.0 (2.0) или ChemDraw.

Шрифт Times New Roman 12 pt. Межстрочный интервал 1,15. Поля: верхнее – 2,0 см, нижнее – 2,0 см, левое – 2,0 см, правое – 2,0 см. Абзац – красная строка – 0,5 см.

Текст статьи должен начинаться с указания:

с левой стороны – **индексов МРНТИ и УДК**, соответствующих заявленной теме, *ниже* приводятся:

через строку указывается **заглавие статьи** (прописными буквами, шрифт – полужирный, выравнивание текста по центру, кегль 14 pt). Название должно максимально полно и точно описывать содержание статьи, включать ключевые слова, отражающие направление и/или основной результат исследования, но в то же время быть коротким и ясным и не содержать сокращений.

– фамилии и инициалы авторов (выравнивание текста по центру, шрифт – полужирный, кегль 12 pt),

– название организации и ее местонахождение,

- e-mail авторов (выравнивание текста по центру, курсив, кегль 12 pt),
- резюме (краткое изложение содержания статьи, дающее представление о теме и структуре текста, а также основных результатах, **7–10 предложений**, (выравнивание текста по центру, курсив, кегль 11 pt),
- ключевые слова, обеспечивающие полное раскрытие содержания статьи (**7–10 слов**) выравнивание текста по ширине, курсив, кегль 11 pt),
- текст статьи (выравнивание текста по ширине, курсив, кегль 12 pt),
- список литературы,
- Ф.И.О. авторов, название статьи, резюме, ключевые слова на трех языках (на казахском, английском и русском).

Рисунки должны быть представлены в отдельном файле.

Статья представляется в **doc**или **docx** формате, а также идентичная копия в **pdf**формате, на электронный адрес журнала, в отдельных файлах дублируются рисунки, таблицы, графики, схемы, а также приводятся сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, служебный адрес, место работы, должность, контактные телефоны, e-mail и OrcidID).

Ссылки на литературные источники в тексте приводятся после цитаты в квадратных скобках. Библиографический список оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание: общие требования и правила составления».

Компьютерный набор и макетирование Ли У.П.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Курмангазы, 40 (Дом Дружбы), офис 34
Тел. 8(727)-272-67-74

Подписано в печать 20.06.2025
Печать трафаретная. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 1.
Тираж 500 экз.

Отпечатано в «PrintExpress. Издательство и полиграфия»
Алматы, ул. Байтурсынова, 85
Тел. 8(727)-292-10-95, 8(727)-292-14-28