

УДК 622.276
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048
Шифр специальности ВАК: 1.6.11
Обзорная статья

Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта

А.В. Карсаков^{1✉}, П.Н. Зятиков², И.В. Шарф¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

✉ Avk163@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена стратегической задачей развития нефтегазовой отрасли Российской Федерации по цифровой трансформации и интеллектуализации, что позволит сохранить конкурентоспособность отечественных компаний с учетом происходящих макроэкономических и макроэнергетических процессов. Вместе с тем в нормативном, научном и отраслевом поле отсутствует единый терминологический подход к данным понятиям, что и определило цель настоящей работы, которая заключается в развитии научных основ цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли с учетом содержательного и иерархического взгляда на понятийный аппарат. *Целью* настоящего исследования является развитие научных основ цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли с учетом содержательного и иерархического взгляда на понятийный аппарат, используемый в научном и отраслевом поле. Показаны наиболее перспективные и развиваемые технологии, привлекающие пристальное внимание со стороны недропользователей, из чего следует, что в части поиска и разработки месторождений имеется значимый потенциал роста применения интеллектуальных технологий. *Методы и информационная база исследования.* Использованы материалы научных работ, нормативно-правовая база различной юридической силы. Основными методами исследования стали эмпирический, аналитический, экономико-статистический. *Результаты.* Авторами структурированы эффекты от реализации цифровой трансформации и интеллектуализации в нефтегазовом промысле. Предложены авторские дефиниции, обозначено видение содержательных изменений в поступательном движении от обычного промысла к интеллектуальному, включающее в себя дистанционное управление, сбор и обработку данных контрольно-измерительных приборов и систем наблюдения с прохождением алгоритмов верификации, многовариантный прогноз и автоматическое принятие наиболее эффективных решений. Представлено авторское видение встраивания инструментов цифровой трансформации и интеллектуализации в равноуровневое управление интеллектуальным промыслом посредством цифрового куратора и цифрового помощника. Предложена блочная структура интеллектуализации, включающая в себя цифровой промысел, цифровое предприятие и цифровое проектирование, в которой развитие каждого элемента влияет на другие блоки, что в конечном итоге трансформирует всю бизнес-модель. Областью применения работы являются направления разведки и добычи нефти и газа, обустройства месторождений, работ в части процесса проектирования разработки и поверхностной инфраструктуры, а также системный инжиниринг добывающего предприятия.

Ключевые слова: месторождение, цифровизация, интеллектуализация, разработка месторождений, цифровой двойник, цифровое предприятие, база данных, системный инжиниринг, автоматизация, проектная документация

Для цитирования: Карсаков А.В., Зятиков П.Н., Шарф И.В. Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 216–228. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048

Review article

Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence

A.V. Karsakov^{1✉}, P.N. Zyatikov², I.V. Sharf¹

¹ National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

✉ Avk163@tpu.ru

Abstract. Relevance. The strategic problem of oil-and-gas industry development in the Russian Federation in terms of transformation and intelligence that would allow maintaining compatibility of domestic companies taking into account current macroeconomic and macroenergetic processes. In addition, there are no appropriate terms for these issues in legislative, research, and industrial spheres, which defines the purpose of the research. It consists in development of research bases of digitalization and intellectualization for oil-and-gas industry using content and hierarchical approach towards conceptual framework. **Aim.** To develop scientific foundation for digitalization and intellectualization of oil-and-gas industry in terms of content and hierarchical views on conceptual system used in research and industrial sphere. The paper demonstrates the most perspective and developing technologies attracting close attention of subsoil users. This means that there is a significant growth potential of applying artificial intelligence technologies for prospecting and development of oil deposits. **Research methods and information base.** Research works, legal framework of different legal forces. Empirical, analytical, and economic-statistical methods. **Results.** The authors have structured the stated effects of digital transformation and intellectualization implementation in digital industry. The authors suggested the definitions, established the view of content transformations in translation motion from traditional industry towards intellectual one including remote control, data gathering and processing from check-reading instrument and observation systems using verification algorithms, multiple-path forecast and automatic decision logic. The authors presented their view of integrating digital transformation and intellectualization tools into multi-level management of intellectual industry by means of digital curator or digital assistant. They suggested the block-oriented intellectualization structure including digital industry, digital enterprise and digital design. In this structure development of each element influences the other blocks that, in the long run, transforms the whole business model. The spheres of practical application of the research are industry of oil-and-gas prospecting and development, field infrastructure development, operations in engineering and surface infrastructure design as well as system engineering of production industry.

Keywords: field, digitalization, artificial intelligence, reservoir development, digital twin, digital enterprise, database, systems engineering, automatization, project documentation

For citation: Karsakov A.V., Zyatikov P.N., Sharf I.V. Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 216–228. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048

Введение

Современное развитие сегментов геологоразведочных работ (ГРП), добычи, систем сбора и подготовки углеводородов (УВ) нефтегазовой отрасли сопровождается комплексом разноплановых вызовов и угроз, таких как:

- а) санкционное давление, целью которого является запрет на поставку высокотехнологичного оборудования для разработки месторождений УВ, прежде всего с трудноизвлекаемыми запасами (ТриЗ), снижение возможностей использования зарубежных источников финансирования, препятствия в поставочной логистике УВ потребителям из разных стран [1];
- б) рост доли ТриЗ, которые по оценке Минприроды к 2030 г. составят в части нефти ≥ 80 % [2],

- что обусловлено как геолого-промысловыми характеристиками продуктивных пластов месторождений (обводненность, проницаемость, термобарические условия и др.), физико-химическими свойствами нефти, так и труднодоступностью месторождений УВ в географо-климатическом плане, что в свою очередь не позволяет наращивать объемы добычи и влечет рост себестоимости нефти, увеличившейся в 2023 г. в 2,7 раза по сравнению с 2012 г. [3];
- в) ценовые параметры рынка УВ, которые, несмотря на сопоставимый с первым десятилетием XXI в. уровень цен на нефть, повлекли снижение маржи от добычи УВ почти в два раза вследствие роста капитальных и операционных затрат в отрасли [2].

Ключевым направлением преодоления вышеуказанных вызовов, согласно Энергетической стратегии России на период до 2035 г. (далее Стратегия), Указу Президента РФ [4], является цифровая трансформация и интеллектуализация отраслей ТЭК, в результате которых новое качество приобретут все процессы в сфере энергетики [5], что позволит укрепить и сохранить позиции РФ на мировом рынке энергоносителей, а также будет содействовать социально-экономическому развитию страны. Практическим результатом цифровой трансформации и интеллектуализации в среднесрочной перспективе в разведке, разработке и обустройстве месторождений должен стать интеллектуальный промысел, что является базовым фактором ускоренного перехода (модернизационного рывка) к более эффективной, гибкой и устойчивой добывающей деятельности вертикально-интегрированных нефтегазовых компаний (ВИНК), формированию адекватных ответов на вызовы и угрозы рынка УВ и решению проблемных задач в разработке месторождений.

Таким образом, целью настоящего исследования является развитие научных основ цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли с учетом содержательного и иерархического взгляда на понятийный аппарат, используемый в научном и отраслевом поле.

Методы и информационная база исследования

В исследовании использованы материалы научных работ, нормативно-правовая база различной юридической силы. Основными методами исследования стали эмпирический, аналитический, экономико-статистический.

Результаты исследования

Цифровая трансформация: дефиниция и эффекты

Проведенное исследование показало, что в настоящее время ни в законодательных актах федерального уровня, ни в отраслевых программных документах, ни в научном поле не представлены единые определения терминов цифровой трансформации и интеллектуализации, но они рассматриваются с нескольких позиций. Так, цифровая трансформация рассматривается в следующих аспектах.

1. Достижение стратегических ориентиров. В Указе Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» ставится задача технологического лидерства в части цифровой трансформации экономики, что предполагает достижение следующих целевых ориентиров к 2030 г.:

а) использование не менее 80 % базового и прикладного российского программного

обеспечения в системах, обеспечивающих основные производственные и управленческие процессы;

б) 95 %-е использование российского программного обеспечения в государственных корпорациях и компаниях, а также в хозяйственных обществах, в уставном капитале которых доля участия РФ ≥ 50 %, а также в их аффилированных юридических лицах [4].

2. Получение эффектов, таких как:

а) технологические эффекты, носящие системный и локальный характер и позволяющие оптимизировать процессы, повышать производительность и рентабельность производства; в частности, снизить себестоимость добычи нефти на ~ 15 %, сократить внеплановые простои оборудования на 15–20 %, увеличить добычу на 10 % и эффективность использования оборудования на 20–30 %, а также расширить ресурсную базу более чем в три раза [5];

б) экологические эффекты, получаемые за счет снижения негативного воздействия на окружающую среду, что особенно актуально в свете Указа Президента РФ о снижении выбросов парниковых газов к 2030 г. до 70 % от уровня 1990 г. [6];

в) бюджетные эффекты, в частности объем ожидаемых дополнительных доходов государственного бюджета и компаний оценивается в 2,5–3 трлн р. за 15 лет (за период с 2025 по 2040 гг.) ожидаемые [7];

г) социальные эффекты, обуславливающие, с одной стороны, повышение производительности труда и сокращение работников для выполнения определённых функциональных обязанностей, что позволяет перенаправить часть персонала на другие участки производства, с другой стороны, повышение безопасности труда и снижение производственного травматизма [8]; в частности, при онлайн-мониторинге строительства скважины возможна экономия в размере 5 млн р./год [9];

д) мультипликативные эффекты, которые обусловлены задействованием других отраслей национальной экономики для обеспечения инфраструктурных и ИТ-потребностей.

3. Получение конкретных цифровых продуктов, в том числе цифрового ядра и цифрового двойника [5].

Цифровой ядро является результатом моделирования ядра посредством цифровых технологий (ЦТ), благодаря чему формируется упорядоченная база цифровых образов ядер и флюидов, используемая в дальнейшем для решения многих задач при разведке и добыче ТРИЗ. Данное направление в

России только развивается, но является востребованным, так как позволяет проводить опыты с целью разработки методов повышения нефте- и газоотдачи на основе реалистичной трехмерной модели, созданной посредством мультимасштабной объемной микроскопии, что особенно актуально в случае хрупкости пород, низкой проницаемости (например, породы баженовской свиты) и количественного ограничения кернового материала.

Создание цифровых двойников месторождения (ЦДМ) входит в топ-5 востребованных трендов в нефтегазовой отрасли. ЦДМ является виртуальным отображением происходящих процессов в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать и корректировать работу добывающих скважин, оборудования и персонала [10]. Необходимо отличать ЦДМ от цифрового двойника актива (ЦДА). ЦДМ есть отражение системы «пласт – скважина – сеть сбора», т. е. технологическая модель, так как работа ЦДМ направлена на решение вопросов, связанных с добычей УВ. ЦДМ является составной частью ЦДА, так как появляются дополнительные звенья, такие как энергетика, кадровый состав и другие участки основного и вспомогательного производства. ЦДА является бизнес-моделью, так как основные целевые ориентиры определяются экономическими критериями, в частности такими, как объемы получаемой прибыли, показатели экономической эффективности геолого-технических мероприятий (ГТМ) и других инвестиционных проектов в разработке месторождений.

4. Формирование комплекса используемых цифровых технологий.

Согласно Указу Президента РФ, одной из национальных целей является цифровая трансформация [4]. Цифровая трансформация в перечисленных

выше документах, в том числе в утратившей силу с 1.01.2025 г. программе «Цифровая экономика Российской Федерации», и в других НПА не имеет конкретного определения, однако рассматривается с позиции внедрения цифровых технологий (ЦТ).

В соответствии с парадигмой «Индустрия 4.0», являющейся основной темой обсуждения на Всемирном экономическом форуме в Давосе, в научной литературе и в производственном секторе выделяется целый спектр цифровых технологий, ключевыми из которых являются блокчейн, искусственный интеллект, большие данные, интернет вещей, роботы, 3D-печать, расширенная реальность, облачные технологии [11]. Однако имеет место быть отраслевая специфика. Так, согласно [12], из всех ЦТ лидирующие позиции занимает промышленный интернет вещей – 22 % (рис. 1).

Данные направления являются ключевым стратегическим приоритетом нефтегазовых компаний, обуславливающим рост прибыли. В частности, согласно исследованию McKinsey, внедрение ЦТ индустрии 4.0 позволило нарастить выручку в среднем на 122 % [13].

При разработке месторождений УВ применение предиктивной аналитики позволяет предотвратить незапланированные простои вследствие аварий, а также сократить затраты на ремонт на 20–25 %, времени простоя оборудования во время планово-предупредительного (ППР) и капитального ремонта (КР) – на 30–40 %, численности штата ремонтных бригад – на 15–20 %. 3D-печать для создания инструментов и деталей минимизирует простои оборудования на 10–15 %. Аналитика больших данных позволяет оптимизировать производственные процессы и снизить на 20–30 % затраты благодаря анализу информации о состоянии оборудования, логистике и рыночных трендах [14].



Рис. 1. Цифровые тренды Индустрии 4.0 в нефтегазовой отрасли в мире в 2024 г.

Fig. 1. World digital trends of Industry 4.0 in the oil and gas development

Обучение работников на основе дополненной или виртуальной реальности позволяет повысить производительность труда и снизить риски производственного травматизма. В данном примере под искусственным интеллектом понимают алгоритмы вычислений, основанные на нейронных сетях и машинном обучении.

Промышленный интернет вещей (ПИН) – наиболее активно развивающееся направление в нефтегазовых компаниях – представляет собой скоординированную сеть из физических устройств, датчиков с встроенными ИТ-инструментами для автоматического сбора и передачи данных с технологического оборудования с целью последующего анализа данных посредством различных программных продуктов и формирования рекомендаций, в т. ч. с помощью методов машинного обучения.

Архитектура ПИН состоит из трех уровней. Первый уровень является краевым и предполагает встраивание в систему системы интеллектуальных датчиков на различные виды оборудования, задача которых – улавливание изменения различных параметров и последующее их преобразование в цифровой вид. В частности, только на одной скважине может быть до 25 датчиков, передающих информацию об оборотах ротора, ходов насоса, температуры пластовой жидкости в области перфорации продуктивного пласта и др. В настоящее время активизировались НИОКР по разработке средств мониторинга следующего поколения, позволяющих получать и передавать в постоянном режиме информацию, для получения которой ранее требовалась остановка скважины с проведением исследований [15]. Создаются системы многофазного и виртуального измерения расхода [16, 17]. Система датчиков является базовой частью построения ЦДМ [18], что обуславливает критерии их отбора для внедрения, такие как точность и диапазон измерений, рабочая температура, время безотказной работы, размер и вес, защищенность корпуса, стабильность передачи данных. Первый уровень основан на автоматизации добычного промысла, в ходе которого происходит оснащение скважин и технологического оборудования месторождения системами телеметрии [19] и визуального наблюдения [20], с целью передачи цифровых данных с месторождения в режиме реального времени, что требует масштабного развития интернет-инфраструктуры, которая практически отсутствует во многих малонаселенных пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Внедрение технологий интернет-связи 5G (~5 Гбит/с) на всей территории России является среднесрочной задачей, в то время как в Китае активно развивается интернет с передачей данных со скоростью ~10 Гбит/с.

Второй уровень – это облачные сервера, собирающие и хранящие информацию с датчиков, объемы передачи которой достигают 2 Тб/час. Существуют проблемы непосредственно с серверным оборудованием, маршрутизаторами, компьютерами вследствие нарастающих санкций. В настоящее время в нефтегазовой отрасли используются серверы отечественного производства 6,3 %, коммутаторов – 10,2 %, систем хранения данных – 3,6 %, персональных компьютеров – 12,7 %. При том, что, согласно данным Росстата [21], использование информационных и коммуникационных технологий присутствует не во всех организациях (таблица).

Таблица. *Использование информационных и коммуникационных технологий в организациях по виду экономической деятельности «Добыча полезных ископаемых»*

Table. *Use of information and communication technologies in organizations by type of economic activity "Mining"*

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Персональные компьютеры/Personal computers						
90,7	88,5	87,3	73,0	73,4	72,3	73,0
Серверы/Servers						
69,1	65,1	64,8	51,0	45,3	45,0	41,9
Локальные вычислительные сети/Local computer web						
73,3	69,5	69,2	56,3	55,7	53,5	
Глобальные информационные сети/Global information networks						
89,0	86,5	85,8	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Сеть Интернет/Internet						
88,1	86,0	85,3		71,2	70,4	71,9
Фиксированный проводной/беспроводной интернет Fixed wired/wireless internet						
68,6	68,1	67,8	68,7	68,6	68,1	67,8
Мобильный интернет/Mobile internet						
н.д.	н.д.	н.д.	50,6	50,5	49,9	50,5
Организации, имеющие веб-сайт/Business with a web site						
39,7	37,4	40,4	32,0	33,2	32,2	32,4

Третий уровень – это обработка программным обеспечением различных данных, хранящихся на сервере. Нефтегазовые компании более активны в данном направлении. Например, ПАО «НК «Роснефть» создала комплекс корпоративных программных продуктов, таких как «РН-ГЕОСИМ», «Горизонт+», «Сигма» GPT-системы, «РН-СЕЙСМ», «РН-ПЕТРОЛОГ» и др. [22, 23]. Разрабатываются системы по оптимизации добычи с помощью интерпретации промысловой информации методами машинного обучения и искусственного интеллекта [24–27]. 2022 г. ознаменовал собой полномасштабное начало разработки программ цифровой трансформации в нефтегазовых компаниях, включающее такие направления, как цифровое месторождение, собственная платформа цифрового интернета, цифровая цепочка поставок, цифровой завод и др.

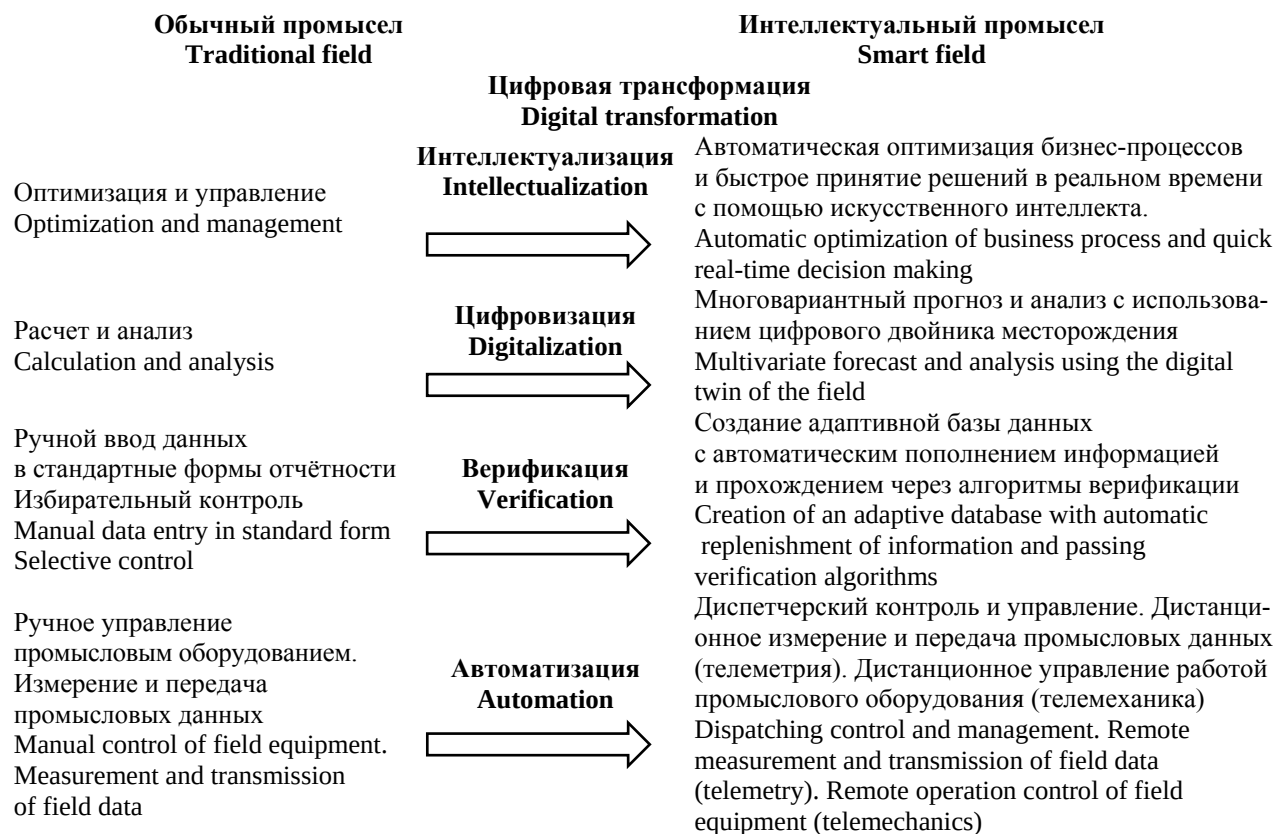


Рис. 2. Этапы цифровой трансформации при переходе к интеллектуальному промыслу
Fig. 2. Stages of digital transformation in the transition to intelligent field

От обычного промысла к интеллектуальному

В течение последних лет в нефтегазовой отрасли часто встречается понятие «умное месторождение» или «интеллектуальное месторождение» как термин, описывающий систему автоматического мониторинга и контроля физических процессов с последующей адаптацией интегральной модели в режиме реального времени [28]. Однако официально не определено, какие месторождения считать «умными». Большинство производств сейчас является во многом автоматизированным, однако ни одно не обходится без участия человека.

Переход к интеллектуальному управлению промыслом, как показано на рис. 2, не только влечет за собой изменение управления технологическим процессом добычи и переработки углеводородов, но и вызывает трансформацию существующих бизнес-процессов нефтегазового предприятия в целом.

Для интеллектуализации промысла необходимо его автоматизировать, что включает в себя дистанционный контроль и управление всеми объектами. Необходимо создать центр данных и обеспечить автоматическую оптимизацию процессов в реальном времени. Переход от традиционных неавтоматизированных промыслов к современным интеллектуальным осуществляется в четыре этапа.

1. Автоматизированный промысел предполагает оснащение системами телеметрии и телемеханики, наличие диспетчерского контроля и оперативное управление (в т. ч. аварийная остановка) отдельными технологическими процессами и оборудованием по заданным алгоритмам.
2. Верифицированный промысел обозначает развитие систем баз данных, в результате чего информация с систем телеметрии автоматически подгружается. Дополнительно необходимо прохождение входящих данных через алгоритмы автоматической верификации на предмет ошибочных значений и зашумленных результатов для их исключения из общей выборки информации.
3. Цифровой промысел предполагает интеграцию оцифрованных данных с базой данных, что обеспечивает возможность анализа текущей ситуации на основе мониторинга постоянно поступающей информации, а также позволяет моделировать все технологические процессы и, следовательно, прогнозировать варианты сценариев за счет расчета параметров всей системы добычи и подготовки УВ, что в совокупности определяет цифровизацию. Управление промыслом реализуется с применением телемеханики на основе результатов расчетов и согласо-

вания оптимального технологического режима между промысловыми подразделениями.

4. Интеллектуальный промысел характеризуется наличием искусственного интеллекта в самом широком смысле, задачей которого является автоматическая оптимизация как текущих, так и долгосрочных условий эксплуатации на основе многовариантных модельных расчетов, принимая во внимание заданные внешние параметры, такие как план добычи, экономические показатели, данные о персонале, оснащение и материально-технические ресурсы. Кроме того, он поддерживает автоматическое управление процессами в реальном времени.

Таким образом, основное отличие «интеллектуального» промысла от традиционного заключается в системе оперативного управления процессами добычи УВ, которая обеспечивает автоматическую оптимизацию производства за счет своевременного выявления возникающих проблем и принятия оптимальных решений в режиме реального времени.

Центральным элементом интеллектуальной системы управления разработкой месторождений УВ выступает программно-аппаратный комплекс [29]. Он гарантирует непрерывную работу ЦДМ для анализа всей необходимой промысловой информации, которая поступает в режиме реального времени посредством автоматизированных систем производства. В результате осуществляется:

- оперативное выявление любых отклонений от проектных параметров;
- определение эффективных управленческих решений на основе многовариантных прогнозных расчетов;
- самостоятельная реализация решений с помощью систем телемеханики (на первых этапах – с разрешения оператора, затем – под контролем оператора).

Управленческий аспект создания интеллектуального промысла

Управленческий аспект интеллектуального промысла необходимо рассматривать с позиций совмещения функциональных обязанностей работников предприятия, искусственного интеллекта (ИИ) и других ЦТ. Оптимальной является трёхуровневая система: на уровне компании, добывающего предприятия (дочернего подразделения) и добычного промысла.

Цифровая трансформация актуализирует формирование центров на разных уровнях, объединяющих специалистов из разных сфер и ИИ. На базе ИИ могут быть созданы цифровой куратор для управления системой каждого уровня и цифровой помощник каждого работника, которые совершенствуются посредством машинного обучения с уче-

том меняющейся ситуации и появления разного рода задач.

Пилотными проектами по реализации интеллектуального промысла выступают два крупных газовых актива, добычу на которых осуществляют дочерние общества ПАО «НК «Роснефть». В процессе реализации пилотных проектов планируется получение опыта оптимизации добычи и интеллектуального управления промыслами в различных условиях. Тиражирование технологии с охватом всех месторождений будет производиться после подтверждения работоспособности систем на этапе опытно-промышленной эксплуатации. По завершении опытно-промышленных испытаний компания получит готовую технологию интеллектуализации газового и газоконденсатного промыслов с подтвержденным эффектом на пилотных проектах и возможностью тиражирования на другие промыслы компании.

В рамках проекта планировалось:

- создание на установке комплексной подготовки газа (УКПГ) высокопроизводительной САУП и организация ее взаимодействия со SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition/ Диспетчерское управление и сбор данных);
- установка на скважинах САР, обеспечивающих поддержание режимов работы скважин, заданных САУП, в т. ч. при сбоях в системах связи с УКПГ;
- применение высокоскоростного интегрированного моделирования и многоуровневой оптимизации;
- использование новых датчиков (дистанционный контроль обводнения скважин, сигнализатор эрозии и др.);
- применение технологий автоматической адаптации моделей и валидации поступающих данных;
- использование модуля экономического анализа в составе оптимизатора;
- формирование модульной концепции, позволяющей постепенно вовлекать в оптимизационный вычислительный цикл дополнительные производственные модули.

Ожидаемые ключевые эффекты следующие:

- а) прирост добычи газа по промыслу на ~3,2 % и конденсата на ~3 %; б) снижение расхода метанола на ~5 %. В рамках крупных месторождений подобный результат может принести значимый экономический эффект.

В настоящее время можно отметить, что работы в данном направлении ведут многие нефтегазодобывающие предприятия, совмещая параллельно разработки в области управления предприятием и системного инжиниринга с интеллектуализацией промысла [30–32]. Впоследствии системы могут оперативно дорабатываться, обеспечивая тем са-

мым ускоренный переход к итоговому интеллектуальному предприятию. Также цифровая трансформация активно внедряется в проектные организации, осуществляющие разработку технической документации, в начальные сегменты – ГРП, мониторинг и проектирование разработки, сопровождение бурения и создание проектной документации по обустройству месторождений [33–39]. Во многих направлениях большое внимание уделяется принципам формирования баз данных и верификации входящей информации [40–43]. Именно в рамках проектной деятельности на этапе работы с промышленной информацией обнаруживаются нефизичные и малодостоверные данные наблюдений или результаты исследований, что требует развития направления разработки механизмов работы с базой на основе стохастических моделей, методов машинного обучения или нейронных сетей с целью контроля входящей в базу информации.

Обсуждение

С учетом освещения практических аспектов цифровой трансформации и интеллектуализации авторами предлагаются дефиниции цифровой трансформации и интеллектуализации с учетом специфики нефтегазовой отрасли. По мнению авторов, цифровую трансформацию в сегменте разведки и добычи можно рассматривать в узком и широком смысле. В узком смысле цифровая трансформация есть цифровизация, т. е. внедрение ЦТ в производственные процессы, что обуславливает изменение производственно-экономических показателей [44] на всех этапах технологической цепочки. Цифровая трансформация в широком смысле ориентирована на достижение стратегической задачи – сохранение конкурентоспособности в условиях усиливающихся по масштабам воздействия вызовов, является изменением существующей бизнес-модели, ориентированной на определенные рынки сбыта, продуктовые корзины, логистические карты, макроэкономические параметры и институциональное окружение. Аналогично может рассматриваться интеллектуализация. В узком смысле как цифровой инструмент для помощи в решении конкретных задач, в широком смысле как управленческая система, наделенная правами принятия и реализации решений.

Авторами выделяются три основных блока, внутри которых происходит цифровая трансформация (рис. 3). Протекающие внутриблоковые процессы являются одновременно параллельными и взаимозависимыми: внедрение и совершенствование самостоятельных технологий в одном блоке даёт толчок к развитию в других, которые в свою очередь открывают возможности к развитию качественно новых систем в целом по отрасли.



Рис. 3. Структура цифровой трансформации нефтегазовой отрасли

Fig. 3. Structure of the digital transformation of the oil and gas industry

Дополнительно стоит отметить типовую схему реализации цифровых проектов в нефтегазовой сфере [45], которая была дополнена по результатам изучения отечественного опыта: сбор информации – формирование базы данных – анализ и верификация данных – разработка цифрового продукта – оценка результатов работы – опробование на иных объектах – тиражирование. Текущие объемы промысловой информации требуют регулярного обновления архитектуры базы данных и ее автоматической экспресс-верификации.

Таким образом, анализ теоретико-практических аспектов в области цифровых процессов в нефтегазовой отрасли позволил авторам предложить следующие дефиниции. Цифровая трансформация нефтегазовой отрасли – это преобразование системы управления нефтегазовой компании и ее дочерних подразделений на основе цифровизации и интеллектуализации для оптимизации технологических процессов с целью сохранения конкурентоспособности компании в быстроменяющихся макроэкономических, макроэнергетических и институциональных условиях на мировом рынке УВ. Интеллектуализация нефтегазовой отрасли – трансформация в управлении нефтегазовой компанией, ее дочерними подразделениями и производственными участками на основе автоматизации и цифровизации всех процессов (производственных, технологических и управленческих) с целью их оптимизации, что позволит снизить операционные и капитальные издержки и улучшить производственно-экономические показатели, что в конечном итоге трансформирует всю бизнес-модель.

Заключение

На основании вышеизложенного можно резюмировать следующее.

1. На основе анализа научного поля и статистической фактуры были выделены эффекты, получаемые от реализации цифровой трансформации и интеллектуализации в разведке и добыче нефтегазовых запасов. Обозначено отсутствие данных дефиниций в нормативно-правовых актах различной юридической силы и в отраслевых регламентах. Одним из результатов исследования являются предложенные определения цифровой трансформации и интеллектуализации, что можно рассматривать как дополнительный вклад в развитие научных основ управления в разведке и добыче углеводородов.
2. Обозначено видение содержательных изменений в цифровой трансформации, отражающих поступательное движение от обычного промысла к интеллектуальному, что является стратегическим ориентиром в существующих и быстро-
меняющихся макроэкономических, макроэнергетических и институциональных условиях.
3. Представлено авторское видение встраивания инструментов цифровой трансформации и интеллектуализации в разноразмерное управление интеллектуальным промыслом посредством цифрового куратора и цифрового помощника.
4. Представлена блочная структура цифровой трансформации отрасли, учитывающая сферы подготовки проектно-технической документации, добычи и управления предприятием.
5. Выделены основные этапы создания цифровых технологий, среди которых отдельно обозначены сегменты формирования базы данных и контроля входящей информации с учетом тенденции к повышению объемов и видов поступающих данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путеводитель по санкциям и ограничениям против Российской Федерации (после 22 февраля 2022 г.). URL: <https://base.garant.ru/57750632/> (дата обращения: 29.01.2025).
2. Итоги международного форума «Российская энергетическая неделя – 2024». URL: https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/658/5j1tdmlw5wh5isv0swfw72j71c93inck/Summary_REW24.pdf?17340923772532115 (дата обращения: 29.01.2025).
3. Себестоимость добычи нефти. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11189> (дата обращения: 29.01.2025).
4. Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84648.html> (дата обращения: 29.01.2025).
5. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения: 29.01.2025).
6. Указ Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (дата обращения: 29.01.2025).
7. Федеральный закон от 30.11.2024 № 419-ФЗ «О федеральном бюджете на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_491969/ (дата обращения: 29.01.2025).
8. Байкова О.В., Громыко Е.О. Эффекты цифровой трансформации в нефтегазовом комплексе // Вестник университета. – 2021. – № 6. – С. 77–81. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-6-77-81.
9. Худаяров Т.А. Рост производительности труда в нефтегазовом комплексе путем использования современных цифровых технологий // Human Progress. – 2021. – Т. 7. – Вып. 3. DOI: 10.34709/IM.173.13. URL: http://progress-human.com/images/2021/Tom7_3/Khudayarov.pdf (дата обращения: 29.01.2025).
10. Цифровые двойники нефтегазового месторождения и актива: что они могут дать отрасли и что нужно, чтобы их создать. URL: <https://www.zyfra.com/ru/news/media/tsifrovye-dvoyniki-neftegazovogo-mestorozhdeniya-i-aktiva-chto-oni-mogut-dat-otrasli-i-chto-nuzhno-chto-by-ikh-sozdat/> (дата обращения: 29.01.2025).
11. Саак А.Э., Пахомов Е.В. Ключевые технологии Индустрии 4.0, Общества 5.0, Экономики 3.0 // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6324> (дата обращения: 29.01.2025).
12. Будущее нефтегазовой отрасли через призму цифровых технологий / С. Ибрагимов, Д. Олимов, Ж. Салиев, Х. Ибрагимов. URL: <https://iais.uz/ru/outputnew/budushee-neftegazovoy-otrasli-cherez-prizmu-tsifrovyyh-tehnologiy> (дата обращения: 29.01.2025).
13. Бекетова О.Н. Стратегирование цифровой трансформации нефтегазовых предприятий // Стратегирование: теория и практика. – 2023. – Т. 3. – № 4. – С. 428–440. DOI: 10.21603/2782-2435-2023-3-4-428-440.
14. Санкова Л.В. Нефтегазовый комплекс на современном этапе: проблемы и перспективы цифровой трансформации // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. – 2021. – № 1 (29). – С. 97–109.
15. Результативность глубинного распределённого оптоволоконного мониторинга работы горизонтальных скважин, оборудованных установками электроцентробежного насоса, в «Газпром нефти» / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Э.Р. Худиев, А.Ю. Губарев, С.А. Скопинов, В.В. Соловьева, Д.Н. Гуляев // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-58-63.
16. Multiphase flow meters targeting oil & gas industries / M. Meribout, A. Azzi, N. Ghendour, N. Kharoua, L. Khezzer, E. AlHosani // Measurement. – 2020. – Vol. 165. – 108111. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108111.
17. Bikmukhametov T., Jaschke J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 184. – 106487. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106487.
18. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, micro-porous and meso-porous media // Transport in Porous Media. – 2020. – Vol. 132. – P. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.

19. Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сафарова Е.А. Строительство цифрового месторождения с использованием оптоволоконных технологий // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 11. – С. 20–26.
20. Kon T.E. The importance of the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the oil and gas industry // Petroleum Science and Engineering. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 63–69. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.11.
21. Информационные и телекоммуникационные технологии. URL: https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ege2023_21.pdf?ysclid=m6ywu8wv1fr934859128 (дата обращения: 29.01.2025).
22. Единая информационная система геолого-геофизических данных – основа мультисциплинарного подхода к разведке и добыче углеводородов / О.Б. Кузьмичев, Р.К. Газизов, С.В. Власов, М.С. Антонов // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 2. – С. 8–13. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-2-8-13.
23. Новые инструменты ПАО «НК «Роснефть» для повышения эффективности проектирования: искусственный интеллект / Д.Г. Дидичин, В.А. Павлов, Н.О. Вахрушева, О.А. Филимонова // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 11. – С. 50–55. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-11-50-55.
24. Predictive model for bottomhole pressure based on machine learning / P. Spesivtsev, K. Sinok, I. Sofronov, A. Zimina, A. Umnov, R. Yarillin, D. Vetrov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 166. – P. 825–841. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.046.
25. Intelligent logging lithological interpretation with convolution neural networks / L. Zhu, H. Li, Zh. Yang, Ch. Li, Y. Ao // Petrophysics. – 2018. – Vol. 59. – P. 799–810. DOI: 10.30632/PJV59N6-2018a5.
26. Research on the application of Bayesian machine learning in reservoir prediction / Zh. Fu, K. Chen, J. Liao, L. Long, D. Peng // Petroleum Science and Engineering. – 2023. – Vol. 7 (2). – P. 35–42. DOI: 10.11648/j.pse.20230702.12.
27. Umana U.K., Okon A.N., Agwu O.E. Simplified neural network-based models for oil flow rate prediction // Petroleum Science and Engineering. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 70–99. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.12.
28. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев, Л.В. Массель, Д.А. Новиков, А.Н. Райков, С.М. Сендеров, В.А. Стенников // Проблемы управления. – 2019. – № 1. – С. 2–14. DOI: 10.25728/ru.2019.1.1.
29. A big data analytics approach to develop industrial symbioses in large cities / B. Song, Y. Zhiquan, L.S.Ch. Jonathan, D.K. Jiewei, D. Kurlle, F. Cerdas, Ch. Herrmann // Procedia CIRP 29. – 2015. – P. 450–455. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.066.
30. Бенчмаркинг – инструмент системной работы по повышению эффективности (потенциала) в «Газпром нефти» / А.Ф. Можиль, Н.З. Базылева, И.В. Янина, Ф.А. Герасимов, П.В. Козловский, А.В. Перов // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 6–11. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-6-11.
31. Project Gradient – a tool for comparative Analysis and Potential Search / N. Bazyleva, A. Mozhchil, L. Pashkevich, I. Yanina, O. Skudar, M. Pislegin, F. Gerasimov, P. Kozlovskii // Petroleum Technology Conference. – Riyadh, Saudi Arabia, 2022. DOI: 10.2523/IPTC-22447-MS.
32. Evaluating the cost efficiency of systems engineering in oil and gas projects / I. Glukhikh, A. Mozhchil, M. Prisaev, O. Azrykulov, K. Nonieva // Applied system innovation. – 2020. – № 3 (3). – 39. DOI: 10.3390/asi3030039.
33. Ольнева Т.В., Орешникова М.Ю. Применение нейронных сетей для идентификации палеоканалов и генерации их концептуальных моделей // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 17–19. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-17-19.
34. Методы Data Mining как система поддержки принятия решений в условиях ограничения данных / В.А. Маркин, Л.В. Маркина, В.Р. Байрамов, М.Ю. Лобанок // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 5. – С. 138–142. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-5-138-142.
35. Применение методов машинного обучения для петрофизической интерпретации сложнопостроенного геологического разреза / М.А. Басыров, А.В. Сергейчев, И.Д. Латыпов, Э.И. Уразметова, А.А. Астафьев, А.В. Марков, А.Н. Воронина, Г.Г. Елкибаева, А.Э. Федоров // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 3. – С. 20–25. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-20-25.
36. Методика подбора аналогов моделей PVT пластового флюида и экспресс-оценка параметров PVT для новых активов / В.В. Ким, Н.О. Матрошилов, К.А. Печко, А.А. Афанасьев, М.В. Симонов // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 36–39. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-36-39.
37. A predictive model for steady-state multiphase pipe flow machine learning on lab data / E.A. Kanin, A.A. Osipov, A.L. Vainshtein, E.V. Burnaev // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 180. – P. 727–746. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.05.055.
38. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications / N. Voropai, V. Stennikov, S. Senderov, E. Barakhtenko, O. Voitov, A. Ustinov // Journal of Energy Engineering. – 2017. – Vol. 143. – № 5. – P. 1–11. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443.
39. Scale effect on the reservoir permeability and porosity over a wide range of void structure (example of the Tedinskoye oil field) / I. Putilov, A. Yuriev, N. Popov, D. Chizov // Arctic Environmental Research. – 2019. – Vol. 19. – № 3. – P. 93–98. DOI: 10/3897/issn2541-8416.2019.19.3.93.
40. Experience with Using Data Analysis Technologies in identification of lost production zones / O. Nadezhdin, D. Efimov, L. Minikeeva, A. Markov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 2018. DOI: 10.2018/191597-18RPTC-MS.
41. Application of machine learning in integrated modeling of the oil and gas fields / K. Pechko, A. Afanasyev, N. Brovin, E. Belonogov, M. Simonov // Third EAGE Digitalization Conference and Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. – P. 1–4. DOI: 10.3997/2214-4609.202332061.
42. Okon A.N., Effiong A.J., Daniel D.D. Explicit neural network-based models for bubble point pressure and oil formation volume factor prediction // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48. – P. 9221–9257. DOI: 10.1007/s13369-022-07240-3.
43. Al-Fakih A., Kaka S. Application of artificial intelligence in static formation temperature estimation // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48. – P. 16791–16804. DOI: 10.1007/s13369-023-08096-x.

44. Анисимова Я.А., Плотников В.А. Перспективы цифровой трансформации в нефтяной промышленности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2022. – Т. 12. – № 5. – С. 106–119. DOI: 10.21869/2223-1552-2022-12-5-106-119.
45. Анализ перспектив развития цифровых технологий нефтегазовых месторождений / С.Г. Мухаметдинова, А.И. Коршунов, Н.О. Вахрушева, Т.Н. Иванова // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 11. – С. 34–41.

Информация об авторах

Александр Владиславович Карсаков, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Avk163@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5804-2460>

Павел Николаевич Зятиков, доктор технических наук, профессор физико-технического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. zpavel@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3926-3206>

Ирина Валерьевна Шарф, доктор экономических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Irina_sharf@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1333-1234>

Поступила в редакцию: 10.03.2025

Поступила после рецензирования: 20.03.2025

Принята к публикации: 10.04.2025

REFERENCES

1. *Guide to sanctions and restrictions against the Russian Federation (after February 22, 2022)*. (In Russ.) Available at: <https://base.garant.ru/57750632/> (accessed 29 January 2025).
2. *Results of the international forum «Russian Energy Week – 2024»*. (In Russ.) Available at: https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/658/5j1tdmlw5wh5isv0swfw72j71c93inck/Summary_REW24.pdf?17340923772532115 (accessed 29 January 2025).
3. *Cost of oil production*. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/11189> (accessed 29 January 2025).
4. *Decree of the President of the Russian Federation dated 05/07/2024 No. 309 «On the national development goals of the Russian Federation for the period until 2030 and for the future until 2036»*. (In Russ.) Available at: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84648.html> (accessed 29 January 2025).
5. *Order of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020 No. 1523-r «On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035»*. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (accessed 29 January 2025).
6. *Decree of the President of the Russian Federation of November 4, 2020 No. 666 «On reducing greenhouse gas emissions»*. (In Russ.) Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (accessed 29 January 2025).
7. *Federal Law of November 30, 2024 N 419-FZ «On the federal budget for 2025 and for the planning period of 2026 and 2027»*. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_491969/ (accessed 29 January 2025).
8. Baykova O.V., Gromyko E.O. Effects of digital transformation in the oil and gas complex. *Vestnik universiteta*, 2021, no. 6, pp. 77–81. (In Russ.) DOI: 10.26425/1816-4277-2021-6-77-81.
9. Khudayarov T. Labor productivity in the oil and gas field with the use of modern digital technologies. *Human Progress*, 2021, vol. 7, Iss. 3. (In Russ.) DOI: 10.34709/IM.173.13. Available at: http://progress-human.com/images/2021/Tom7_3/Khudayarov.pdf. (accessed 29 January 2025).
10. *Digital twins of oil and gas fields and assets: what they can give to the industry and what is needed to create them*. (In Russ.) Available at: <https://www.zyfra.com/ru/news/media/tsifrovye-dvoyniki-neftegazovogo-mestorozhdeniya-i-aktiva-chto-oni-mogut-dat-otrasli-i-chto-nuzhno-chtoby-ikh-sozdat/> (accessed 29 January 2025).
11. Saak A.E., Pakhomov E.V. Key technologies of Industry 4.0, Society 5.0, Economy 3.0. *Engineering journal of Don*, 2020, no. 2. (In Russ.) Available at: <http://wwwv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6324> (accessed 29 January 2025).
12. Ibragimova S., Olimov D., Saliev Zh., Ibragimov Kh. *The future of the oil and gas industry through the prism of digital technologies*. (In Russ.) Available at: <https://iais.uz/ru/outputnew/buduschee-neftegazovoy-otrasli-cherez-prizmu-tsifrovyyh-tehnologiy> (accessed 29 January 2025).
13. Beketova O.N. Strategizing the digital transformation of oil and gas enterprises. *Strategizing: Theory and Practice*, 2023, vol. 3, no. 4, pp. 428–440. (In Russ.) DOI: 10.21603/2782-2435-2023-3-4-428-440.
14. Sankova L.V. The oil and gas industry nowadays: Digital transformation problems and prospects. *Actual problems of Economics and Management*, 2021, no. 1, pp. 97–109. (In Russ.)
15. Ipatov A.I., Kremensky M.I., Khudiev E.R., Gubarev A.Yu., Skopinov S.A., Solovieva V.V., Gulyaev D.N. The effectiveness of downhole distributed fiber-optic monitoring of ESP horizontal wells production in the Gazprom Neft. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 58–63. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-58-63.
16. Meribout M., Azzi A., Ghendour N., Kharoua N., Khezzer L., AlHosani E. Multiphase Flow Meters Targeting Oil & Gas Industries. *Measurement*, 2020, vol. 165, 108111. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108111.
17. Bikmukhametov T., Jaschke J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 184, 106487. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106487.

18. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, micro-porous and meso-porous media. *Transport in Porous Media*, 2020, vol. 132, pp. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.
19. Eremin N.A., Stolyarov V.E., Safarova E.A. Construction of a digital field based on the use of fiber-optic technologies. *Neft. Gas. Novatsii*, 2022, no. 11, pp. 20–26. (In Russ.)
20. Kon T.E. The importance of the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the oil and gas industry. *Petroleum Science and Engineering*, 2024, vol. 8 (2), pp. 63–69. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.11.
21. *Information and telecommunication technologies*. (In Russ.) Available at: https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ege2023_21.pdf?ysclid=m6yw8wv1fr934859128 (accessed 29 January 2025).
22. Kuzmichev O.B., Gazizov R.K., Vlasov S.V., Antonov M.S. The unified information system of geological and geophysical data is the basis of a multidisciplinary approach to the exploration and production of hydrocarbons. *Oil Industry Journal*, 2024, no. 2, pp. 8–13. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-2-8-13.
23. Didichin D.G., Pavlov V.A., Vahrusheva N.O., Filimonova O.A. New tools of Rosneft Oil Company to improve the efficiency of design: artificial intelligence. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 11, pp. 50–55. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-11-50-55.
24. Spesivtsev P., Sinok K., Sofronov I., Zimina A., Umnov A., Yarillin R., Vetrov D. Predictive model for bottomhole pressure based on machine learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 825–841. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.046.
25. Zhu L., Li H., Yang Zh., Li Ch., Ao Y. Intelligent logging lithological interpretation with convolution neural networks. *Petrophysics*, 2018, vol. 59, pp. 799–810. DOI: 10.30632/PJV59N6-2018a5.
26. Fu Zh., Chen K., Liao J., Long L., Peng D. Research on the Application of Bayesian Machine Learning in Reservoir Prediction. *Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 7 (2), pp. 35–42. DOI: 10.11648/j.pse.20230702.12.
27. Umana U.K., Okon A.N., Agwu O.E. Simplified Neural Network-Based Models for Oil Flow Rate Prediction. *Petroleum Science and Engineering*, 2024, vol. 8 (2), pp. 70–99. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.12.
28. Voropaj N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P., Massel' L.V., Novikov D.A., Rajkov A.N., Senderov S.M., Stennikov V.A. Problems of digital energy development in Russia. *Control Sciences*, 2019, no. 1, pp. 2–14. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2019.1.1.
29. Bin S., Zhiqian Y., Jonathan L.S.C., Jiewei D.K., Kurle D., Cerdas F., Herrmann Ch. A big data analytics approach to develop industrial symbioses in large cities. *Procedia CIRP* 29, 2015, pp. 450–455. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.066.
30. Mozhchil A.F., Bazyleva N.Z., Yanina I.V., Gerasimov F.A., Kozlovsky P.V., Perov A.V. Benchmarking as a tool for systematic work on improving the efficiency (potential) at Gazprom Neft. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 6–11. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-6-11.
31. Bazyleva N., Mozhchil A., Pashkevich L., Yanina I., Skudar O., Pislegin M., Gerasimov F., Kozlovskii P. Project Gradient – a tool for comparative analysis and potential search. *Petroleum Technology Conference*. Riyadh, Saudi Arabia, 2022. DOI: 10.2523/IPTC-22447-MS.
32. Glukhikh I., Mozhchil A., Prisaev M., Azrykulov O., Nonieva K. Evaluating the Cost Efficiency of Systems Engineering in Oil and Gas Projects. *Applied system innovation*, 2020, no. 3 (3), 39. DOI: 10.3390/asi3030039.
33. Olneva T.V., Oreshkova M.Yu. Application of neural networks to identify paleochannels and generate their conceptual models. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 17–19. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-17-19.
34. Markin V.A., Markina L.V., Bayramov V.R., Lobanok M.Yu. Data Mining methods as a decision support system under conditions of data limitation. *Oil Industry Journal*, 2024, no. 5, pp. 138–142. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-5-138-142.
35. Basyrov M.A., Sergeichev A.V., Latypov I.D., Urazmetova E.I., Astafiev A.A., Markov A.V., Voronina A.N., Elkibaeva G.G., Fedorov A.E. Application of machine learning methods for the petrophysical interpretation of complex geological section. *Oil Industry Journal*, 2024, no. 3, pp. 20–25. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-20-25.
36. Kim V.V., Matroshilov N.O., Pechko K.A., Afanasev A.A., Simonov M.V. Methodology for selecting analogs of reservoir fluid PVT models and rapid estimation of PVT parameters for new assets. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 36–39. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-36-39.
37. Kanin E.A., Osipov A.A., Vainshtein A.L., Burnaev E.V. A predictive model for steady-state multiphase pipe flow machine learning on lab data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 727–746. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.05.055.
38. Voropai N., Stennikov V., Senderov S., Barakhtenko E., Voitov O., Ustinov A. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications. *Journal of Energy Engineering*, 2017, vol. 143, no. 5, pp. 1–11. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443.
39. Putilov I., Yuriev A., Popov N., Chizov D. Scale effect on the reservoir permeability and porosity over a wide range of void structure (example of the Tedinskoye oil field). *Arctic Environmental Research*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 93–98. DOI: 10/3897/issn2541-8416.2019.19.3.93.
40. Nadezhdin O., Efimov D., Minikeeva L., Markov A. Experience with using data analysis technologies in identification of lost production zones. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2018. DOI: 10.2018/191597-18RPTC-MS.
41. Pechko K., Afanasyev A., Brovin N., Belonogov E., Simonov M. Application of machine learning in integrated modeling of the oil and gas fields. *Third EAGE Digitalization Conference and Exhibition*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. pp. 1–4. DOI: 10.3997/2214-4609.202332061.
42. Okon A.N., Effiong A.J., Daniel D.D. Explicit neural network-based models for bubble point pressure and oil formation volume factor prediction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 9221–9257. DOI: 10.1007/s13369-022-07240-3.
43. Al-Fakih A., Kaka S. Application of artificial intelligence in static formation temperature estimation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 16791–16804. DOI: 10.1007/s13369-023-08096-x.
44. Anisimova Ya.A., Plotnikov V.A. Prospects and prerequisites for digital transformation in the oil industry. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*, 2022, vol. 12, no. 5, pp. 106–119. (In Russ.) DOI: 10.21869/2223-1552-2022-12-5-106-119.
45. Mukhametdinova S.G., Korshunov A.I., Vakhrusheva N.O., Ivanova T.N. Analysis of the digital oil and gas development prospects. *Neft. Gas. Novatsii*, 2022, no. 11, pp. 34–41. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander V. Karsakov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Avk163@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5804-2460>

Pavel N. Zyatikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. zpavel@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3926-3206>

Irina V. Sharf, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Irina_sharf@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1333-1234>

Received: 10.03.2025

Revised: 20.03.2025

Accepted: 10.04.2025