

УДК 622.24

*Сайфуллина Азалия Рустамовна,
студент, кафедры автоматизированных систем управления
Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа,*

*Сулейманова Алла Маратовна, кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных систем управления
Уфимский университет науки и технологий
г. Уфа*

РЕИНЖИНИРИНГ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LWD

Аннотация: В статье представлен инновационный подход к управлению траекторией направленного бурения посредством глубокого реинжиниринга бизнес-процесса. Ключевыми элементами предложенного решения являются низколатентный байпас-канал для прямой передачи команд на забойное оборудование и замкнутый контур автоматического управления на основе искусственного интеллекта (ИИ). Проведен сравнительный анализ традиционного человеко-зависимого процесса и предлагаемой автономной системы. Доказано, что предлагаемый подход позволяет преодолеть системные недостатки текущей модели – высокую латентность, дискретность и субъективность управления, – что ведет к значительному повышению точности и экономической эффективности строительства скважин.

Ключевые слова: реинжиниринг бизнес-процессов, направленное бурение, искусственный интеллект, автономные системы, байпас-канал, LWD, управление траекторией, оптимизация.

REENGINEERING OF THE DIRECTIONAL DRILLING TRAJECTORY CONTROL PROCESS BASED ON LWD DATA

Abstract: This article presents an innovative approach to directional drilling trajectory management through deep business process reengineering. Key elements of the proposed solution include a low-latency bypass channel for direct command transmission to downhole equipment and a closed-loop automatic control system based on artificial intelligence (AI). A comparative analysis of the traditional human-dependent process and the proposed autonomous system is conducted. It is demonstrated that the proposed approach overcomes the systemic shortcomings of the current model—high latency, discreteness, and subjectivity of control—leading to a significant increase in the accuracy and cost-effectiveness of well construction.

Keywords: business process reengineering, directional drilling, artificial intelligence, autonomous systems, bypass channel, LWD, trajectory management, optimization.

ТЕРМИНОЛОГИЯ

Категория бурения и геологии:

Направленное бурение – технология бурения скважин с отклонением от вертикали по заданной пространственной траектории для достижения целевых пластов.

Управление траекторией – процесс корректировки пространственного положения бурового долота в режиме реального времени для следования по заданному проекту.

Геонавигация – управление траекторией бурения на основе интерпретации геологических данных (LWD) в реальном времени для оптимального вскрытия продуктивного пласта.

Зенитный угол – угол отклонения ствола скважины от вертикали.

Азимутальный угол – угол направления ствола скважины в горизонтальной плоскости относительно севера.

Каротаж в реальном времени (LWD, Logging While Drilling) – технология получения и передачи геофизических данных о свойствах породы и положении инструмента непосредственно в процессе бурения.

Отклонитель – забойное устройство, позволяющее изменять направление бурения без подъёма колонны.

Категория автоматизации БП:

Реинжиниринг процесса – радикальное перепроектирование бизнес-процесса для достижения максимальной эффективности.

Автономная система – система, способная выполнять задачи и принимать решения в изменяющейся среде без непосредственного вмешательства человека.

Чёрный ящик – модель ИИ, внутренняя логика которой непрозрачна для пользователя.

Категория связи и управления:

Байпас-канал – технологический канал (обычно гидравлический) для прямой автоматической передачи управляющих команд с поверхности к забойному оборудованию, минуя ручной ввод.

Нисходящая связь – передача команд и параметров с наземного оборудования на забойные системы.

Латентность – задержка во времени между возникновением события (например, отклонения) и выполнением корректирующего воздействия.

Замкнутый цифровой контур – автоматическая система, где управляющие воздействия вырабатываются на основе непрерывного анализа данных с датчиков без разрывов в информационной цепи.

Детерминированная передача – передача данных с гарантированным временем доставки и предсказуемой производительностью.

Категория экономики:

Удельная стоимость проходки – ключевой экономический показатель, отражающий затраты на бурение одного метра скважины.

Конечная нефтеотдача пласта – доля извлекаемых запасов нефти от общих геологических запасов в пласте.

Дебит – объём нефти, поступающий из скважины в единицу времени.

Введение

Нефтяная отрасль – это мощный рычаг влияния на экономику всей страны, поскольку любые ходы внутри нефтегазовых компаний – решения многомиллионной ценностью, а ошибки могут исчисляться колоссальными цифрами бюджета.

Геологи и экономисты ломают голову над тем, как извлечь максимум нефти из недр с минимальными затратами. Этот поиск может напоминать сборку пазла в разных комнатах, в реалиях же нефтяной организации речь идет об отделах: одна команда работает с геологическими данными, другая – с экономическими расчетами. Информация передается с задержками, а версии данных путаются.

В условиях высокой волатильности рынка у компании больше нет роскоши тратить месяцы на разработку единственного плана, который может оказаться неэффективным на стадии бурения, по этой же причине есть необходимость переосмыслить управление бурением [1].

Фокус данной работы сосредоточен на достаточно узком участке этой работы – процессе управления траекторией направленного бурения. Каждый неверно пробуренный метр – это финансовые потери и недополученная нефть. Мы рассматриваем не простую автоматизацию рутины, а реинжиниринг этого процесса через внедрение автономной системы на основе искусственного интеллекта, работающей с данными каротажа в реальном времени (LWD).

Переход от ручной, фрагментированной геонавигации к замкнутой системе не просто вопрос возможности. Ведь ликвидация человеческого звена в передаче команд, заменяемого ИИ не только ускоряет процесс, но и снижает стоимость каждого метра проходки.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для задач управления траекторией направленного бурения предложено использование байпас-канала в качестве основного канала нисходящей связи. Переход на байпас-управление снижает латентность контура, что важно для внедрения алгоритмов ИИ – тех, что сегодня не реализуемы, но завтра смогут выжать из пласта максимум нефти.

Главная цель этого исследования – доказать, что такой подход возможен и целесообразен.

Текущий процесс

Существующий процесс управления траекторией представляет собой человеко-зависимую и итерационную последовательность операций. Архитектура в системе определения траектории движения долота – от начальных точек, будь то данные с буровой установки или сигналы с датчиков LWD, до конечных, в виде достижения целевой точки, – всё строится вокруг человеческих решений и ресурсов; именно в этом случае система является несовершенной и чересчур “централизованной на человеке” [2, 3].

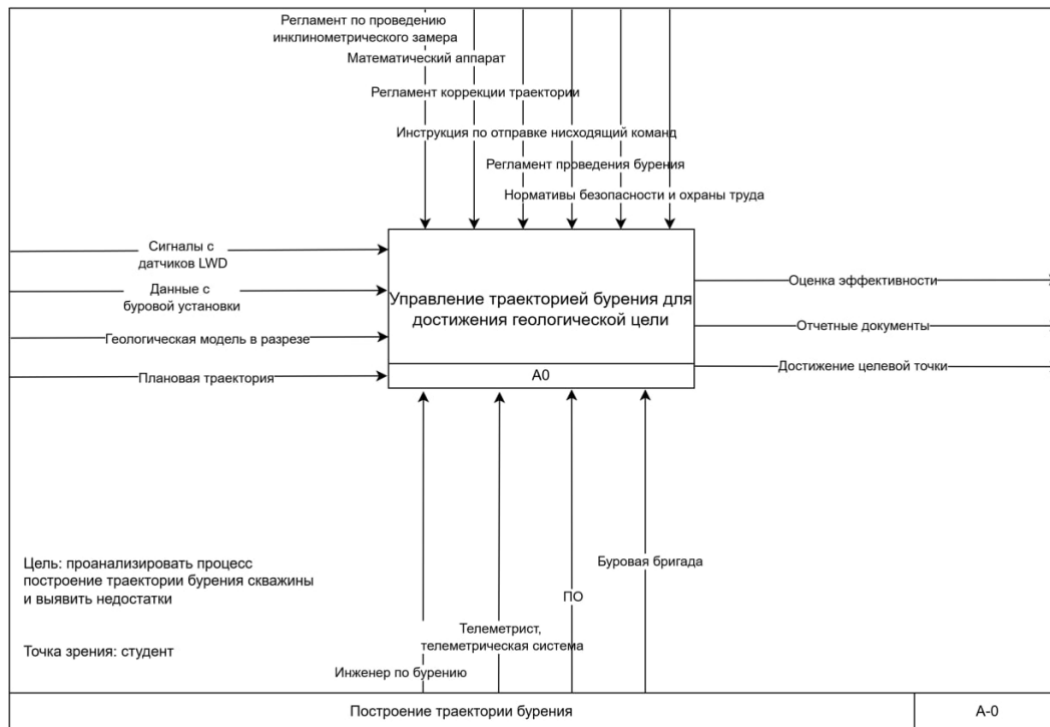


Рисунок 1. Контекстная диаграмма текущего процесса

Для наглядности продемонстрирована декомпозиция блока А-0, чтоб на его примере рассмотреть из чего состоит нынешний процесс.

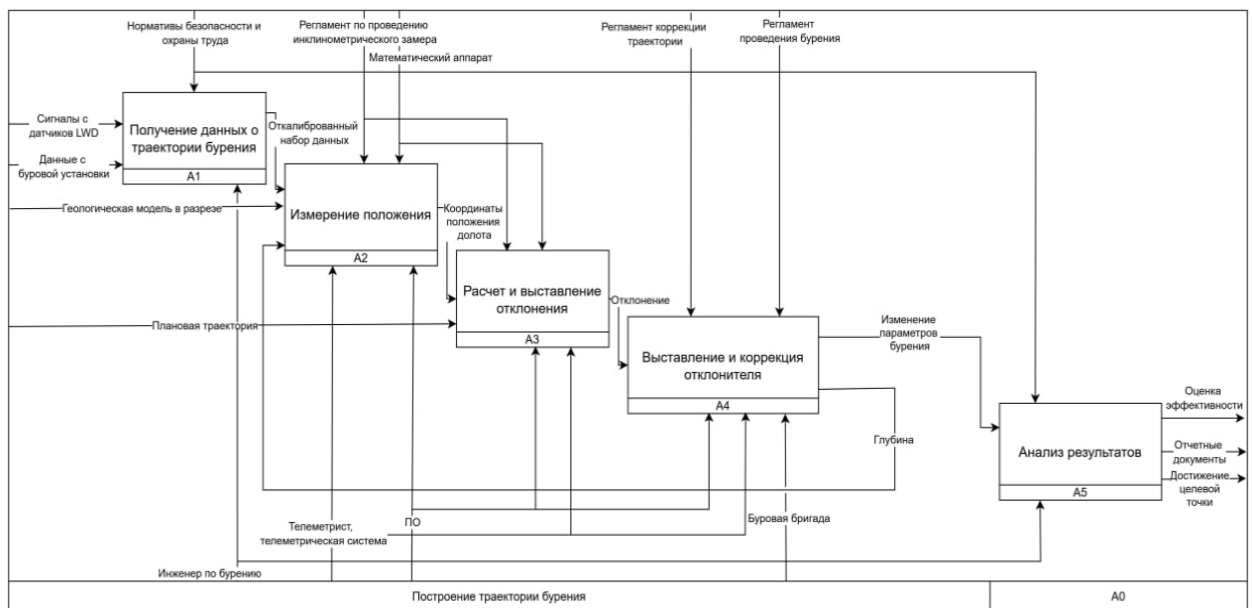


Рисунок 2. Функциональная модель процесса “as is”

Модель наглядно демонстрирует линейный, разорванный характер процесса с ручным контролем на каждом этапе [3].

A1: Получение данных о траектории бурения. На вход (слева) поступают потоки: сигналы с датчиков LWD (сырые данные о положении и свойствах породы) и данные с буровой установки (технические параметры). Функция

выполняется телеметристом и телеметрической системой (механизм, снизу). Управляющим воздействием (сверху) выступают регламенты проведения работ. Выходом (справа) является откалиброванный, верифицированный набор данных, который передаётся на следующий этап [4].

A2: Измерение положения. Функция принимает калиброванные данные и, используя геологическую модель в разрезе и плановую траекторию, определяет текущие зенитный и азимутальный углы и фактическое положение ствола относительно цели. Выходом являются рассчитанные параметры положения, которые фиксируются в системе.

A3: Расчёт и выставление отклонения. На этом этапе на основе текущего положения и плана происходит принятие решения о необходимости коррекции. Управление осуществляется регламентами коррекции траектории и техническими ограничениями (глубина как параметр, влияющий на сложность манёвра). Ключевой механизм – инженер по бурению, который производит расчёт и согласование требуемого отклонения. Выходом является санкционированная команда на изменение [4].

A4: Выставление и коррекция отклонителя. Функция отвечает за физическое исполнение решения. Буровая бригада, которая получает команду и вручную вносит изменения в параметры системы управления направленным бурением. На выходе фактически изменённые параметры бурения, приводящие к коррекции траектории.

A5: Анализ результатов. Финальная функция служит для оценки эффективности принятых мер. Данная функция замыкает цикл, так как её результаты (оценка) влияют на принятие решений в следующих итерациях.

Проблемы текущего процесса

Ключевые характеристики текущего процесса (AS-IS):

- Высокая латентность: Полный цикл от обнаружения отклонения до реализации коррекции занимает от 30 минут до часа.
- Дискретность управления: Решения принимаются не непрерывно, а в отдельные моменты времени, что приводит к траектории с резкими скачками.

- Субъективность: Качество траектории напрямую зависит от человеческого фактора.

В итоге, текущий процесс, несмотря на использование качественных измерительных технологий (LWD), сохраняет архаичную архитектуру, где цифровые данные служат лишь информационной поддержкой для принятия решений человеком. Это создает фундаментальные ограничения для повышения точности, скорости и, как следствие, экономической эффективности строительства скважин. Основным образом нам необходимо искоренить разрозненность и узкие места, по сути зависимые от человеческого фактора. Обоснование для реинжиниринга будет рассмотрено в следующем разделе [5].

Предлагаемый процесс

Суть исправленного процесса можно донести с помощью декомпозиции модели уже после реинжиниринга.

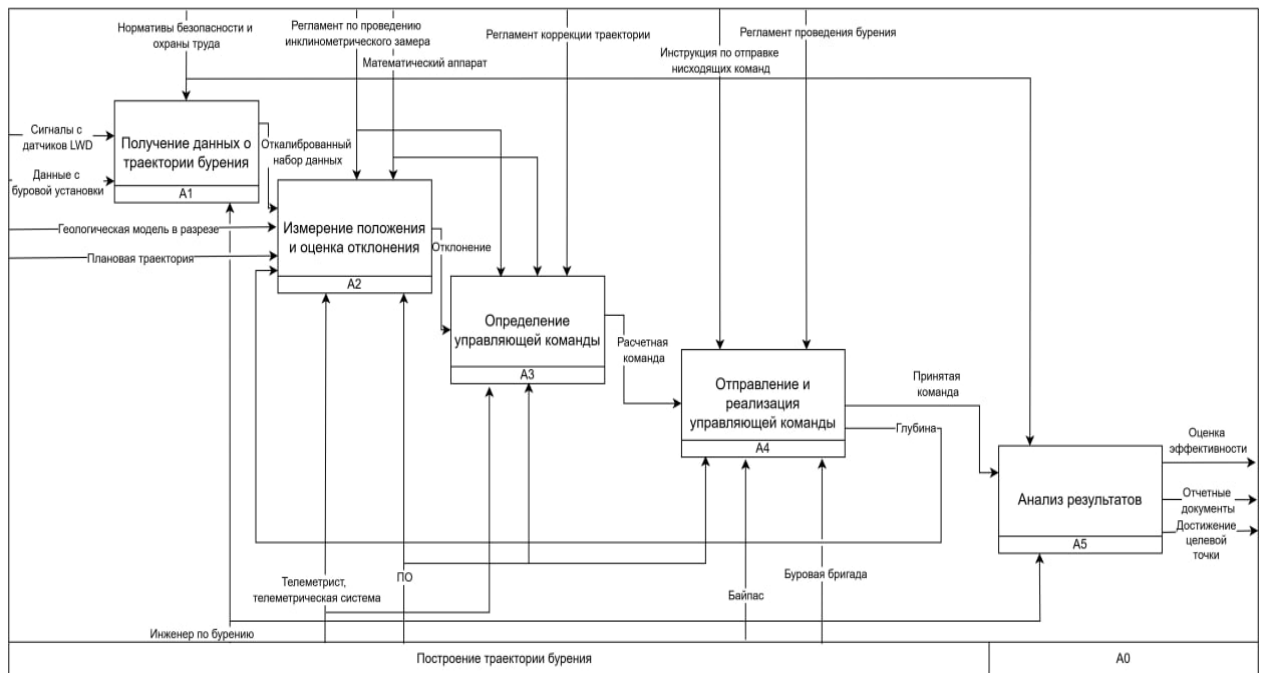


Рисунок 3. Функциональная модель процесса “to be”

Реинжиниринг процесса направлен на преодоление системных недостатков, выявленных в модели AS-IS. Предлагаемая архитектура (Рис. 3) представляет собой систему, где ключевые интеллектуальные функции переданы от человека техническим системам. Важным технологическим элементом, обеспечивающим наибольшую эффективность, выступает система

автоматической передачи команд через байпас-канал, исключая ручное звено [5, 6].

Функциональная архитектура реинжинирингового процесса (Рис. 3):

A1: Получение и первичная обработка данных. Функция аналогична AS-IS, но с акцентом на бесшовную интеграцию потоков.

A2: Измерение положения и оценка отклонения. Это первый принципиально новый блок. Принимая калиброванные данные, прогнозная ИИ-модель в реальном времени не только вычисляет текущие углы, но и оценивает вектор отклонения от целевой траектории, прогнозируя его развитие на несколько метров вперёд.

A3: Определение оптимальной управляющей команды (ИИ-контроллер). Ядро системы. На основе оценки от A2 и в соответствии с заданной целевой функцией (например, “максимизировать время в пласте при минимальной кривизне”), ИИ-контроллер рассчитывает оптимальную управляющую команду (Δ Зенит, Δ Азимут). Процесс управляется регламентом коррекции траектории, переведённым в цифровые ограничения алгоритма. Критически важной частью механизма является модуль объяснимого ИИ (XAI), генерирующий обоснование решения для супервайзера [6].

A4: Формирование и автоматическая отправка команды. Ключевой блок, реализующий основное преимущество реинжиниринга. Принятая ИИ-команда автоматически преобразуется в низкоуровневый сигнал [6]. Управление осуществляется инструкцией по отправке нисходящих команд. Механизм кардинально изменён: вместо буровой бригады используется байпас-система, которая напрямую, без человеческого посредничества, передаёт команду.

A5: Оперативный контроль и анализ эффективности. Контур замыкается.

Было:

Телеметрист смотрит на данные с датчиков (каротаж) и решает, куда повернуть долото. Он командует бурильщику и траектория меняется.

Стало:

Искусственный интеллект в режиме реального времени, смотрит на те же

данные с датчиков, сам понимает, где находится долото и куда его надо вести, и сам отдаёт команды оборудованию (через автоматический клапан-байпас). Долото поворачивает сразу, без посредников.

Внедрение ИИ в программу для управления бурением нельзя считать полной переделкой системы, это именно что добавление к ней некоторых полезных функций. Это означает, что в ПО интегрируются специализированные ИИ-модели, которые взаимодействуют с ней через определённые интерфейсы (API) [6]. Для этого в существующей программе необходимы доработки, среди которых функция, что анализирует поток информации с датчиков в скважине и буровой установки и готовит их для анализа ИИ. Также нужно доработать интерфейс для удобной работы с ИИ. И в конечном счёте, когда оператор подтверждает рекомендацию ИИ, программа должна сама, без ручного ввода, отправить точную команду на буровое оборудование. Это делается через специальный автоматический клапан (байпас), который мгновенно приводит команду в действие.

Таким образом, ИИ становится подключаемым интеллектуальным ядром, которое усиливает аналитические функции существующего ПО. Оператор (телеметрист) не устраняется из контура, а переходит в роль супервайзера: он задаёт цели, контролирует решения ИИ и имеет право на вмешательство.

Принципиальные отличия модели TO-BE от AS-IS:

1. Консолидация и автоматизация интеллектуальных функций. Блоки AS-IS “Измерение положения” (ручное) и “Расчёт отклонения” (ручное) объединены в A2, где механизмом является ИИ.
2. Ликвидация критического разрыва. Блоки AS-IS “Расчёт отклонения” и “Выставление коррекции”, связанные ручной передачей, заменены на непрерывную цифровую цепочку от A3 к A4. Ключевую роль играет байпас как механизм A4, обеспечивающий мгновенную, детерминированную передачу.
3. Изменение роли человека. Телеметрист смещается в сторону контроля инфраструктуры данных (A1).

4. Переход от реактивного к оптимизирующему управлению. Процесс управляется не просто планом, а целевой функцией. ИИ-контроллер в А3 не компенсирует отклонение, а рассчитывает оптимальный путь его предотвращения, используя прогноз от А2.

Байпас-система в данном контексте – это технология автоматической передачи управляющих команд от поверхностного оборудования к забойному инструменту по гидравлическому каналу, минуя ручное кодирование и передачу сигналов человеком. В результате получаем: байпас ликвидирует ключевой разрыв традиционного процесса – этап ручной передачи и ввода команд человеком-оператором, – что снижает латентность данного участка контура с десятков минут до единиц секунд и полностью исключает характерные для него ошибки.

В ходе анализа можно выделить, что модель ТО-ВЕ представляет собой переход от линейной, последовательности операций к динамической и самонастраивающейся. Внедрение байпас-системы же выступает не просто техническим усовершенствованием, а важнейшим аспектом новой архитектуры, делающим возможной реализацию алгоритмов ИИ и обеспечивающим снижение латентности всего процесса. Это создаёт предпосылки для качественного скачка в точности построения траектории и экономической эффективности бурения [7].

Преимущества и недостатки предлагаемого процесса

В качестве простейшего варианта будет рассматриваться несколько таблиц сравнения характеристик по некоторым из аспектов процесса, включая временные и функциональные.

Таблица 1. Сравнительная таблица функциональных характеристик до и после

Аспект	Без Байпаса	С Байпасом	Суть
Исполнитель	Бурильщик	Автоматический клапан	Замена человеческого звена на автоматическое устройство.

Скорость	Зависит от человека, около 30 минут	Скорость звука в жидкости, секунды	Снижение задержки на порядок.
Надежность	Маленькая, высокий риск ошибки	Высокая	Исключение человеческого фактора в критическом звене.
Тип сигнала	Дискретный	Более частотный и сложный	Открывается возможность для передачи более сложных команд и корректировок чаще.
Связь с ИИ	Прямая интеграция невозможна	Возможность управления клапаном через ИИ	Решение ИИ сразу становится физическим действием.

Таблица 2. Сравнение временных характеристик

	Сейчас	В будущем
Среднее время отправки команды	15 минут	1 минута
Процент ошибок	14,7	0,1
Количество команд	Около 30 за скважину	Около 30 за скважину
Итог	8,6 часов за скважину	1,92 часа за скважину

Вывод: Байпас сам по себе не строит траекторию. Он является критически важным «проводником», который позволяет системе управления (ИИ) реализовывать свои расчёты с такой точностью и скоростью, что качественно меняет результат - построенная траектория становится гладкой, точной и оптимальной, а не компромиссной и ступенчатой. Также стоит отметить важное потенциальное улучшение – путь к сложным алгоритмам ИИ начнёт открываться для остальных работ в процессе [7].

Среди минусов можно подчеркнуть высокие начальные инвестиции на разработку/обучение модели, интеграцию с оборудованием; “Чёрный ящик” и вытекающее недоверие к ИИ, откуда и появляются киберриски, связанные с уязвимостью цифровой системы; и всё еще остаются вопросы юридической ответственности: кто виноват в аварии по вине ИИ?

Заключение

Реинжиниринг превращает построение траектории из догонки долотом уходящего пласта в ведение долота по оптимальному пути с опережающей тонкой коррекцией. Это качественно иной результат: более длинная, гладкая и точная скважина, дающая больший дебит. Практическая реализация предложенной модели позволит перейти от компромиссного профиля скважин к оптимальным траекториям, что напрямую приведёт к значительному повышению экономической эффективности строительства сложных скважин. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на адаптации алгоритмов ИИ к конкретным геологическим условиям и разработке отраслевых стандартов для автономных систем бурения.

Литература

1. Хаммер, М. Реинжиниринг корпорации: манифест революции в бизнесе / М. Хаммер, Дж. Чампи. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 288 с.
2. Вахромеева, М. П. Реинжиниринг бизнес-процессов : учеб. пособие / М. П. Вахромеева. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 192 с.
3. Демушкина К. М., Кузьмин А. В. Анализ возможностей инструментов реализации технологии Process Mining // Известия Самарского научного центра РАН – 2023. – №4. – С. 114–120.
4. Bourgoyne, A. T. Applied drilling engineering / A. T. Bourgoyne, K. K. Millheim, M. E. Chenevert, F. S. Young. – Richardson, TX : Society of Petroleum Engineers, 1991. – 502 p.
5. Крылов, А. В. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в сложных технических объектах / А. В. Крылов, М. Ю. Охтилев, В. А. Соболевский, Б. В. Соколов, В. А. Ушаков. – СПб. : Политехника, 2020. – 384 с.
6. Halsey, G. W. Real-time drilling optimization using downhole measurements and machine learning algorithms / G. W. Halsey, G. Hareland, R. Nygaard // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 177. – P. 837–848.

7. Aadnoy, B. S. *Advanced Drilling and Well Technology* / B. S. Aadnoy, L. Cooper, S. Miska. – Houston : Gulf Professional Publishing, 2009. – 890 p.