

Концепция нового цифрового симулятора-тренажера для специалистов
механизированной добычи нефти с элементами геймификации

Шарипов Тимур Рафаилович¹

¹АНО ВО «Университет Иннополис»

АННОТАЦИЯ

В работе обоснована актуальность создания цифровых симуляторов-тренажеров для специалистов механизированной добычи нефти. Такие тренажеры позволят не только понять причины нежелательных событий (недостаток притока из пласта, повышенное содержание газа на приеме насоса, рост затрубного давления газа из-за разгазирования), но и отработать навыки вывода скважин с установкой электроцентробежного насоса (УЭЦН) на режим. Это достигается управлением частотой насоса и замерами динамического уровня жидкости (ДУ) для обеспечения максимальной добычи нефти. Сформулирована концепция нового решения: комплексирование «три в одном» цифровых двойников (ЦД) скважины, пласта и флюидов на базе авторских инновационных методик расчета. Рассмотрен один из вариантов реализации – проект создания симулятора-тренажера для игры «Выведи скважину с УЭЦН на режим».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Нефтяная скважина, УЭЦН, динамический уровень, пласт, фазовые переходы, разгазирование нефти, цифровой двойник, симулятор-тренажер, геймификация.

Sharipov Timur Rafailevich¹,

A concept for a new digital simulator for mechanized oil production specialists with
gamification elements

¹Innopolis University

ABSTRACT

This paper substantiates the need for digital simulators for mechanized oil production specialists. Such simulators will not only help understand the causes of undesirable events (such as insufficient reservoir inflow, increased gas content at the pump intake, and increased annular gas pressure due to degassing) but also help practice well startup skills with an electric submersible pump (ESP). This is achieved by controlling the pump frequency and measuring the dynamic fluid level (DL) to ensure maximum oil production. A new solution is proposed: a three-in-one integration of digital twins (DTs) of the well, reservoir, and fluids based on innovative calculation methods developed by the author. One implementation option is considered: a project to create a simulator for the game «Bring a Well with an ESP to Operational Level».

KEYWORDS

Oil well, ESP, dynamic level, reservoir, phase transitions, oil degassing, digital twin, simulator, gamification.

Введение (Introduction)

В настоящее время действующий фонд скважин РФ превышает 150 тысяч скважин, принадлежащих свыше 350 недропользователям¹. В последние годы компании смещают акцент с капиталоемкого проектирования разработки на повышение

¹ по данным ЕГРЮЛ и издания РБК

эффективности добычи за счет цифровизации и предиктивной аналитики. Удельные потери от простоя одной нефтяной скважины – около 374 тыс. руб./сутки. Средний простой за три года превышает четверо суток на скважину, в том числе из-за «сухого хода» УЭЦН. Для отрасли в целом это около 74 млрд. руб. ежегодных потерь, которые можно устранить, минимизируя риски по гидравлическим причинам. Один из таких рисков – эффект «сухого хода» УЭЦН, когда ДУ опускается ниже приема насоса или растет доля свободного газа, вызывая перегрев и вибрации.

На практике операторы механизированной добычи следуют внутренним регламентам для пуска УЭЦН и вывода скважин на режим после остановок или геолого-технических мероприятий (ГТМ). Управление зависит от частоты насоса и притока из пласта: при достаточном притоке ДУ в затрубном пространстве сохраняется или увеличивается (желательный сценарий), а при недостаточном – снижается (нежелательный сценарий). На практике ДУ рассчитывается косвенно (по эхометрии или через давление на приеме насоса), в отличие от прямых параметров контроля: давление на приеме насоса, буферное давление, дебиты, напор, температура, вибрация и др. Вывод на режим может растянуться на несколько суток с риском неудачи.

Скважина считается выведенной на режим, если ее параметры стабилизированы по комплексу критериев: дебит и устьевые давления постоянны; установлен максимально допустимый штуцер; ДУ не ниже нормы; результаты нескольких измерений ДУ близки.

Таким образом, актуально снижение простоев действующего фонда скважин РФ от «сухого хода» УЭЦН путем частого и физически достоверного прогнозирования ДУ в затрубном пространстве.

Объектом настоящего исследования являются газожидкостные потоки (ГЖП) в системе «скважина-пласт», описываемые тремя связанными математическими моделями: 1) ЦД пласта [1]; 2) ЦД скважины [2]; ЦД пластовых флюидов (нефть, газ, вода) [1]. Эти ЦД применяются для проектирования и управления добычей углеводородов и являются приоритетами развития согласно исследованию Индустриального центра компетенций (ИЦК) «Нефтегаз, нефтехимия и недропользование»² и Национальных проектов технологического лидерства (НПТЛ) «Проектирование разработки».

Анализ существующих ИТ-решений для моделирования запуска, вывода на режим и эксплуатации скважины с УЭЦН выявил ограничения в полноте использования соответствующих ЦД:

1) Семейство программно-аппаратных тренажеров (APM СУ ПДНГ/SimLab, Zarnitza/Зарница, Альтаир/Финист-М, SEMAC/Кросс-Автоматика) имитируют конструкцию скважины (физически или с помощью виртуальной/дополненной реальности), но не использует ЦД пласта и ЦД пластовых флюидов. Фокус – только ЦД скважины.

2) Семейство симуляторов многофазного потока (OLGA/Schlumberger, LedaFlow /Kongsberg, ALFAsim/ESSS) добавляет ЦД пластовых флюидов внутрь ЦД скважины, но не использует ЦД пласта. Фокус – ЦД «два в одном».

3) Семейство платформ предиктивной аналитики (FUTURES/SERAFIM Ltd, ForeSite/Weatherford, ProductionLink/Baker Hughes) используют ЦД пласта и ЦД скважины, но не использует ЦД пластовых флюидов. Фокус – ЦД «два в одном».

² Так, на конференции byteoilgas_conf-2025 ИЦК представил карту ИТ-ландшафта, где направление ПО для гидравлики в скважинах выделено как «белое пятно».

Методы (Methods)

Для устранения отмеченных выше ограничений у существующих ИТ-решений для моделирования процессов запуска, вывода на режим и эксплуатации скважины с УЭЦН предлагается разработка математических моделей прогнозирования нестационарных режимов работы системы «нефтяная скважина-пласт» с учетом переменного газосодержания нефти.

Большинство исследований нестационарных ГЖП в ЦД скважин [3-7] игнорируют фазовые переходы «нефть-газ» по стволу скважины: разгазирование нефти и растворение газа в нефти. Исключение составляет работа [7], где представлена формализация физико-математической модели многофазных течений в системе «пласт-скважина-УЭЦН» на базе модели «дрейфа фаз» Новака Зубера. Однако авторы ограничились верификацией только на синтетических задачах (гравитационного разделение фаз, задача Сода). Данный подход относится к семейству симуляторов многофазного потока с добавлением ЦД пласта. Опыт применения автором аналогичного подхода [8] показал: численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных затрудняет гарантированный расчет ДУ в широком диапазоне параметров, а также возрастает время самих вычислений. К тому же ДУ приходится рассчитывать косвенно, поскольку определяются профили объемной доли нефти, газа и воды по всей длине ствола скважины.

Влияние фазовых переходов «нефть-газ» на изменение ДУ предлагается оценивать авторской имитационной моделью сегрегации фаз [9], которая описывает как будет вести себя гидравлический режим при чередовании в стволе скважины газовой пробки, недонасыщенной нефти и пластовой нефти. Модель предполагает, что пласт работает на упругом режиме (пластовое давление превышает давление насыщения нефти газом). При снижении давления в стволе выделяется свободный газ, который при определенных условиях может сформировать пробку на устье. В целях упрощения принимается, что одномоментно произошло гравитационное разделение фаз, то есть весь выделившийся газ образовал газовую пробку на устье. При этом под газовой пробкой будет находиться так называемая недонасыщенная нефть, которая разгазировалась до образования пробки, а с забоя будет подниматься насыщенная пластовая нефть. Принципиальная разница между этими типами нефтей состоит в плотности – таким образом динамические профили плотностей нефти/газа позволяют обосновано подойти к расчету забойного давления³.

Для ЦД пласта в статье автора [10] предложен новый метод прогнозирования динамики пластового давления и дебитов вертикальной или наклонно-направленной скважины при заданном забойном давлении в условиях упругого режима фильтрации нефти и воды без использования ресурсоемких гидродинамических симуляторов. Метод основан на соотношениях материального баланса в объеме дренирования пласта и зависимости дебита жидкости от коэффициента продуктивности скважины. Разработаны рекуррентные формулы для последовательного расчета пластового давления и коэффициента продуктивности при переходе между временными интервалами. Показано, что в случае однофазной фильтрации расчет объема дренирования с использованием формулы Чекалюка обеспечивает отклонение результатов по дебиту не более 2%. Приведены результаты расчетов для двухфазной фильтрации системы «нефть-вода», демонстрирующие сходимость и практическую применимость метода для экспресс-анализа разработки нефтяных месторождений.

³ В отличие от распространенной практики, когда ДУ и давление на приеме насоса связаны через одно единственное значение плотности нефти в затрубном пространстве скважины

Таким образом, согласно имеющемуся методическому заданию по отдельности ЦД скважины зависит от притока из пласта, а ЦД пласта зависит от забойного давления. Для нахождения совместного решения построим следующий алгоритм:

- 1) Известны параметры ЦД скважины и ЦД пласта с предыдущего интервала по времени;
- 2) Задается начальное приближение притока жидкости из пласта;
- 3) Вычисляется ДУ и забойное давление согласно ЦД скважины – на основе известного значения притока жидкости из пласта;
- 4) Вычисляется новое значение притока жидкости из пласта по формулам ЦД пласта – на основе рассчитанного значения забойного давления;
- 5) Шаги 3)-4) повторяются до тех пор, пока изменение притока жидкости из пласта не станет меньше заданного достаточно малого значения $\epsilon > 0$;
- 6) Выполняется переход к следующему интервалу по времени и шагу 1).

Порог вхождения в продукты на базе ЦД – сложные графические интерфейсы, длительное обучение, отсутствие «вау-эффекта» – планируется снизить за счет их «упаковки» с использованием игровых механик в неигровом контексте (геймификация [11, 12]). При грамотном применении геймификация имитирует реальную деятельность специалиста, превращая «черный ящик» ЦД в увлекательный процесс с мгновенной обратной связью. Опыт автора по проведению соревнований на базе ЦД [13, 1413] подтверждает: скорость ознакомления с ПО возрастает в разы, первый положительный опыт достигается без длительного обучения, запускается цикл «понимание → вовлечение → удовлетворение результатом → масштабное внедрение».

Совокупность рассмотренных инноваций обеспечивает перспективные конкурентные преимущества нового цифрового симулятора-тренажера для моделирования запуска, вывода на режим и эксплуатации скважин с УЭЦН:

- 1) Повышается физическая достоверность ЦД пластовых флюидов для оперативных инженерных расчетов⁴ (*зависимость газосодержания нефти и плотностей нефти/газа от термобарических условий согласно проверенным корреляционным зависимостям из программного обеспечения VisualPVT [15]*);
- 2) Повышается физическая достоверность ЦД скважины для оперативных инженерных расчетов (*динамические профили газосодержания нефти и плотностей нефти/газа по стволу скважины*);
- 3) Повышается физическая достоверность ЦД пласта для оперативных инженерных расчетов (*изменение коэффициента продуктивности скважины и пластового давления по рекуррентным формулам*);
- 4) Повышается физическая достоверность взаимовлияния ЦД скважины и ЦД пласта для оперативных инженерных расчетов (*итеративное согласование забойного притока*);
- 5) Минимизируется «порог вхождения» за счет геймификации.

Результаты и обсуждения (Results and discussion)

В настоящее время ведется работа по реализации представленной концепции нового цифрового симулятор-тренажера, который относится к автоматизированному рабочему месту (АРМ) специалиста по механизированной добыче.

⁴ Порядок времени расчета на ПК – минуты, а не часы

Основное назначение симулятора-тренажера – прогнозировать изменение во времени ДУ в затрубном пространстве с учетом динамики притока из пласта и переменного газосодержания нефти.

Ключевыми задачами проекта по реализации концепции являются:

- 1) Разработать ЦД пластовых флюидов (выполнено);
- 2) Разработать ЦД скважины (выполнено);
- 3) Разработать ЦД пласта (выполнено);
- 4) Разработать ЦД единой системы «скважина-пласт»;
- 5) Разработать графический интерфейс оператора по добыче нефти;
- 6) Разработать сценарии геймификации для проведения соревнований между специалистами по добыче нефти;
- 7) Разработать многопользовательский вариант симулятора-тренажера (клиент-серверная версия на Рисунке 1);
- 8) Провести промо-мероприятие по демонстрации возможностей симулятора-тренажера на площадке одного из нефтегазовых форумов или выставок.

Что даст разрабатываемый новый цифровой симулятор-тренажер потенциальным пользователям:

- Прогнозирование ДУ с учетом притока из пласта и динамики управления частотой насоса;
- Прогнозирование гидравлических причин «сухого хода» УЭЦН: недостаток притока из пласта, повышенное содержание газа на приеме насоса, рост затрубного давления газа вследствие разгазирования;
- Оптимизация процессов запуска, вывода на режим и эксплуатации скважин с УЭЦН;
- Обучение специалистов по добыче нефти;
- Проведение соревнований между операторами по добыче нефти.

Планируемые к учету в ЦД физические и технологические процессы:

- Влияние частоты насоса на изменение ДУ;
- Влияние динамики притока из пласта;
- Влияние притока от соседних скважин;
- Влияние доли газа на приеме насоса и его естественной сепарации в затрубное пространство;
- Влияние переменного газосодержания и плотности нефти по стволу скважины;
- Влияние фазовых переходов «нефть-газ» (разгазирование нефти и растворение газа в нефти).

Варианты поставки продукта:

- 1) В составе локального приложения под Windows или Linux (в т.ч. отечественные операционные системы Astra Linux и РЕД ОС) для специалиста по добыче.
- 2) В составе клиент-серверного приложения для проведения многопользовательских соревнований по выводу скважины на режим.

Анонс промо игры-соревнования «Выведи скважину с УЭЦН на режим»: *«Современный цех добычи нефти и газа недропользователя (ЦДНГ). Оператор по добыче готовится к запуску, выводу на режим и эксплуатации скважины с установкой электроцентробежного насоса (УЭЦН). На время игры вам предлагается стать*

современным специалистом по добыче нефти и за определенное число ходов – посредством управления частотой насоса и проведения замеров динамического уровня жидкости в скважине – обеспечить максимальную добычу нефти. В процессе игры вы можете столкнуться с рядом неприятных для добычи на месторождениях событий и понять их причины: недостаток притока из пласта, повышенное содержание газа на приеме насоса, рост затрубного давления газа вследствие разгазирования. Игра использует цифровой симулятор тренажер с повышенной физической достоверностью моделирования. Требования к участникам: предварительно зарегистрироваться и иметь возможность принять очное участие. Производственный опыт необязателен. Игровая механика построена таким образом, чтобы участие мог принять любой желающий. Наличие производственного опыта позволит сделать сильный ход. Стань лучшим цифровым оператором по добыче!».

Целевая аудитория – специалисты по механизированной добыче нефти (инженерно-технический персонал, операторы, технологи, геологи, проектировщики, эксперты, инженеры, ученые, преподаватели, студенты) из состава:

- Цеха добычи нефти и газа недропользователей;
- Сервисные нефтегазовые компании, в т.ч. супервайзеры;
- Отраслевые форумы и выставки;
- Отраслевые центры обучения, аттестации и повышения квалификации;
- Нефтегазовые вузы;
- Нефтегазовые ссузы;
- Корпоративные научно-исследовательские и проектные институты недропользователей.

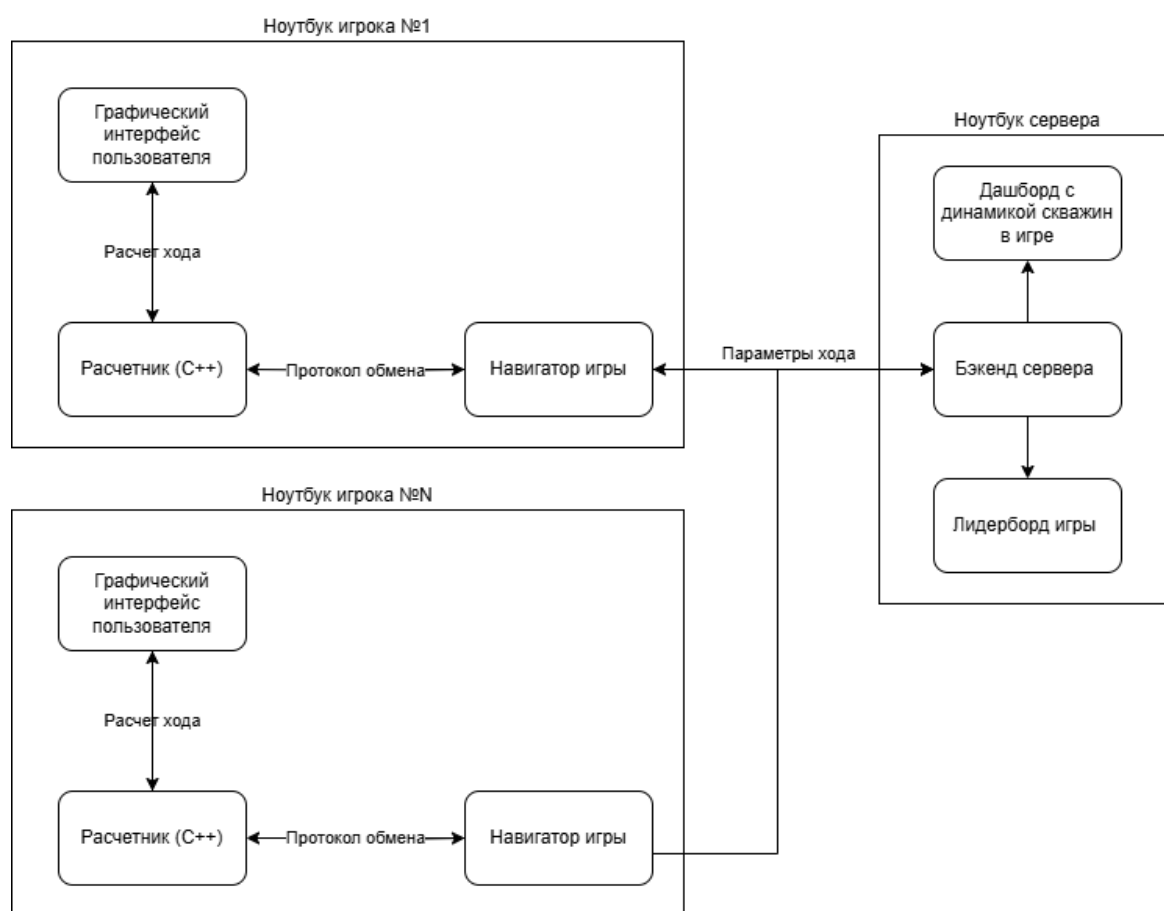


Рисунок 1 Структурная схема симулятора-тренажера

Заключение (Conclusion)

Предложена концепция создания нового АРМ специалиста по механизированной добыче нефтяных скважин с УЭЦН, которая:

- 1) моделирует управление процессом запуска, вывода на режим и эксплуатации скважины с УЭЦН;
- 2) комплексирует «три в одном» ЦД скважины, пласта и флюидов;
- 3) прогнозирует изменение во времени ДУ с учетом динамики притока из пласта и переменного газосодержания нефти по стволу скважины;
- 4) содержит сценарии геймификации для проведения обучений и соревнований между специалистами по добыче нефти.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р 56449-2015. Месторождения газовые, газоконденсатные, нефтегазовые и нефтегазоконденсатные. Программное обеспечение для гидродинамического моделирования месторождений. Основные функциональные и технические требования. Введ. 2015-06-29. – М.: Стандартинформ, 2015. – 36 с.
2. ГОСТ Р 56450-2015. Месторождения газовые, газоконденсатные, нефтегазовые и нефтегазоконденсатные. Программное обеспечение для гидродинамического моделирования систем сбора и подготовки углеводородов. Основные функциональные и технические требования. Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
3. *Уразаков К.Р.* Исследование динамики накопления газа в затрубном пространстве добывающих скважин // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 606-614. – DOI 10.31897/PMI.2021.4.14.
4. *Конопля Д.В.* Возможность планирования работ по выводу скважины на режим // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 7. – С. 114-118.
5. *Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Белашевский С.С., Ведерникова Ю.А.* Модель переходных процессов в скважине с частотно-регулируемым электроцентробежным насосом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 110-120.
6. *Соловьев И.Г., Лапик О.И., Говорков Д.А.* Гидродинамика переходных процессов в скважине, обустроенной электроцентробежным насосом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 50-60.
7. *Ситдинов Р.М., Филиппов Д.Д., Митрушкин Д.А.* Численное моделирование многофазных течений в сопряженной системе «пласт-скважина-УЭЦН» // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 59. 28 с.
8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №RU 2015617579. Программа моделирования динамических потоков в системе пласт-скважина ESPUD / Т.Р. Шарипов, Опубл. 15.07.2015.
9. *Шарипов Т.Р.* Имитационная модель неустойчивых режимов течения в НКТ при разгазировании нефти // Золотухинские чтения. Нефть, газ и энергетика в арктическом регионе: Материалы III Международной научно-практической конференции, Архангельск, 16–18 апреля 2025 года. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2025. – С. 35-40.
10. *Шарипов Т.Р.* Новая методика расчета неустановившегося притока к скважине в условиях упругого режима фильтрации жидкости // Современные технологии в нефтегазовом деле - 2025: сборник трудов международной научно-технической конференции, Октябрьский, 21–22 марта 2025 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2025. – С. 388-393.

11. *Авдеева А.П.* Геймификация: характеристики, тренды, риски // Вестник университета. – 2024. – № 8. – С. 175-184.
12. *Мироненко А.А., Султанов А.Р., Федоров А.Э., Ибрагимова Л.Д.* Практическое использование подходов геймификации и игровых тренажеров по разработке месторождений нефти и газа в обучении взрослых / // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2024. – № 1(147). – С. 71-82.
13. Сайт: Конференция «Цифровые технологии в добыче углеводородов» (5-8 октября 2021г.). URL: <https://events.rn.digital/conf/4> (дата обращения: 16.02.2026).
14. Сайт: Конференция «Цифровые технологии в добыче углеводородов: цифровая прозрачность» (3-7 октября 2022г.). URL: <https://events.rn.digital/conf/ct2022> (дата обращения: 16.02.2026).
15. Сайт: VisualPVT: программа расчета PVT свойств нефти, воды и газа со встроенным редактором корреляционных зависимостей. URL: <http://visual-pvt.com> (дата обращения: 16.02.2026).

REFERENCES:

1. GOST R 56451-2015. Software for hydrodynamic modeling of fields. Basic functional and technical requirements. Introduced 2016-06-29. Moscow: Standartinform, 2015. 36 p.
2. GOST R 56450-2015. Gas, gas condensate, oil-gas and oil-gas-condensate fields. Software for hydrodynamic modeling of hydrocarbon gathering and preparation systems. Basic functional and technical requirements. Introduced 2016-01-01. Moscow: Standartinform, 2015. 14 p.
3. *Urazakov K.R., Belozepov V.V., Latypov B.M.* Investigation of gas accumulation dynamics in the annular space of producing wells // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 250. – P. 606-614.
4. *Konoplya D.V.* Possibility of planning well commissioning works // Oil Industry. – 2008. – No. 7. – P. 114-118.
5. *Solovyev I.G., Govorkov D.A., Belashevsky S.S., Vedernikova Yu.A.* Model of transient processes in a well with a variable-frequency electric submersible pump // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, No. 1. – P. 110-120.
6. *Solovyev I.G., Lapik O.I., Govorkov D.A.* Hydrodynamics of transient processes in a well equipped with an electric submersible pump // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2023. – Vol. 334, No. 11. – P. 50-60.
7. *Sitdikov R.M., Filippov D.D., Mitrushkin D.A.* Numerical modeling of multiphase flows in a coupled «reservoir-well-ESP» system // Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. 2016. No. 59. 28 p.
8. Certificate of state registration of a computer program No. RU 2015617579. Program for modeling dynamic flows in the «reservoir-well» system ESPUD / Sharipov, T.R., Published 15.07.2015.
9. *Sharipov T.R.* Simulation model of unstable flow regimes in tubing during oil degassing // Zolotukhin Readings. Oil, gas and energy in the Arctic region: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Arkhangelsk, April 16-18, 2025. – Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2025. – P. 35-40.
10. *Sharipov T.R.* New method for calculating unsteady inflow to a well under elastic fluid filtration conditions // Modern Technologies in the Oil and Gas Industry - 2025: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Oktyabrsky, March 21-22, 2025. – Ufa: Ufa State Petroleum Technological University, 2025. – P. 388-393.

11. *Avdeeva A.P., Safonova Yu.A.* Gamification: characteristics, trends, risks // *University Herald*. – 2024. – No. 8. – P. 175-184.
12. *Mironenko A.A., Sultanov A.R., Fedorov A.E., Ibragimova L.D.* Practical use of gamification approaches and game simulators for oil and gas field development in adult education // *Problems of Collection, Preparation and Transportation of Oil and Petroleum Products*. – 2024. – No. 1(147). – P. 71-82.
13. Website: Conference «Digital Technologies in Hydrocarbon Production» (October 5-8, 2021). URL: <https://events.rn.digital/conf/4> (accessed: 16.02.2026).
14. Website: Conference «Digital Technologies in Hydrocarbon Production: Digital Transparency» (October 3-7, 2022). URL: <https://events.rn.digital/conf/ct2022> (accessed: 16.02.2026).
15. Website: VisualPVT: program for calculating PVT properties of oil, water and gas with a built-in correlation editor. URL: <http://visual-pvt.com> (accessed: 16.02.2026).