

УДК 004.896

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-132-145

## ЗНАННЯ ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В МОДЕЛЮВАННІ ТРЕНАЖЕРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Л.О. Потеряйло\* В.В. Процюк, К.І. Кравців

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; [milapoteraiilo@gmail.com](mailto:milapoteraiilo@gmail.com)

У статті представлено результати досліджень у галузі симуляції процесів буріння із застосуванням сучасного комп'ютерного моделювання. Визначено основні параметри процесу буріння як теоретичні міркування, спрямовані на введення понять, пов'язаних із імітаційним моделюванням та комп'ютерним моделюванням в бурінні. Здійснено аналіз моделей, що використовують при симуляції процесів буріння. Висвітлено базові характеристики при моделюванні тренажера, що забезпечує цілісне сприйняття технологічних процесів, а також будь-яку ступінь їх деталізації. Висвітлено основні методи моделювання, що використовуються при розробці автоматизованих систем управління і тренажерів промислових установок, шляхи розробки їх математичного забезпечення і деякі аспекти створення ефективних програмно-комп'ютерних комплексів. Далі проведено огляд сутності технологічних тренажерів, з технічної точки зору висвітлено сучасний стан тренажерних систем для навчання операторів технологічних процесів. Наведено відмінності тренажерів від інших засобів навчання та специфіку тренажерів для технічних процесів. Коротко описано характерні особливості та перспективи тренажеробудування в різних галузях. Визначено обов'язкові складові частини тренажерів і критерії якості тренажерів. Проведено дослідження існуючих технічних рішень систем класу «Бурові тренажери». Зроблено висновки щодо практичних аспектів використання сучасних інженерних рішень симуляторів буріння. Визначено переваги в результаті використання тренажерів в різних видах оперативно-тактичних вправ, як основна форма вдосконалення оптимізації управління процесу буріння як для задач виробничих так і задач навчання. Особливий акцент зроблено на симуляторі Drillsimm5000, що використовується в процесі підготовки спеціалістів напряму буріння в Івано-Франківському технічному національному університеті нафти і газу. З позицій різних служб підприємства, зацікавлених в придбанні тренажерів, проаналізовано потенційні вигоди комп'ютерного тренінгу та завдання, які необхідно вирішити для успішної реалізації тренажерів, наведено проблеми, пов'язані з їх реалізацією.

**Ключові слова:** параметризація буріння, модель, прецедент, база знань, комп'ютерне моделювання, бурові тренажери.

В статье представлены результаты исследований в области симуляции процессов бурения с применением современного компьютерного моделирования. Определены основные параметры процесса бурения как теоретические рассуждения, направленные на введение понятий, связанных с имитационным моделированием и компьютерным моделированием в бурении. Осуществлен анализ моделей, использующих при симуляции процессов бурения. Освещены базовые характеристики при моделировании тренажера, что обеспечивает целостное восприятие технологических процессов, а также любую степень их детализации. Приведены основные методы моделирования, используемые при разработке автоматизированных систем управления и тренажеров промышленных установок, пути разработки их математического обеспечения и некоторые аспекты создания эффективных программно-компьютерных комплексов. Далее проведен обзор сущности технологических тренажеров, с технической точки зрения освещено современное состояние тренажерных систем для обучения операторов технологических процессов. Приведены отличия тренажеров от других средств обучения и специфику тренажеров для технических процессов. Коротко описаны характерные особенности и перспективы тренажеростроения в различных отраслях. Определены обязательные составные части тренажеров и критерии качества тренажеров. Проведено исследование существующих технических решений систем класса «Буровые тренажеры». Сделаны выводы относительно практических аспектов использования современных инженерных решений симуляторов бурения. Определены преимущества в результате использования тренажеров в различных видах оперативно-тактических упражнений, как основная форма совершенствования оптимизации управления бурения как для задач производственных, так и задач обучения. Особый акцент сделан на симуляторе Drillsimm5000, используемый в процессе подготовки специалистов направления бурения в Ивано-Франковском техническом национальном

университете нефти и газа. С позиций различных служб предприятия, заинтересованных в приобретении тренажеров, проанализированы потенциальные выгоды компьютерного тренинга и задачи, которые необходимо решить для успешной реализации тренажеров, приведены проблемы, связанные с их реализацией.

**Ключевые слова:** параметризация бурения; модель; прецедент; база знаний; компьютерное моделирование.

*Presents the results of research in the field of simulation of drilling processes using modern computer modeling. The main parameters of the drilling process are determined as theoretical considerations aimed at introducing concepts related to simulation modeling and computer modeling in drilling. The analysis of the models used in the simulation of drilling processes is carried out. The basic characteristics of the simulator modeling are highlighted, which provides a holistic perception of technological processes, as well as any degree of their detailing. The main methods of modeling used in the development of automated control systems and simulators of industrial installations, ways of developing their software and some aspects of creating effective software and computer systems are presented. Further, a review of the essence of technological simulators is carried out, from a technical point of view, the current state of training systems for training operators of technological processes is highlighted. The differences between simulators and other teaching aids and the specifics of simulators for technical processes are presented. The characteristic features and prospects of simulator building in various industries are briefly described. The compulsory components of the simulators and the quality criteria of the simulators are determined. A study of the existing technical solutions for systems of the "Drilling simulators" class was carried out. Conclusions are made regarding the practical aspects of using modern engineering solutions for drilling simulators. The advantages are determined as a result of using simulators in various types of operational-tactical exercises, as the main form of improving the optimization of drilling control both for production tasks and training tasks. Particular emphasis is placed on the Drillsimm5000 simulator, which is used in the training of drilling specialists at the Ivano-Frankivsk Technical National University of Oil and Gas. From the standpoint of various services of the enterprise interested in purchasing simulators, the potential benefits of computer training and the tasks that need to be solved for the successful implementation of simulators are analyzed, problems associated with their implementation are presented.*

**Key words:** parameterization of drilling, model, precedent, knowledge base, computer modeling, drilling simulators.

## **Вступ**

Використання сучасних методів керування процесом буріння нафтових і газових свердловин, які ґрунтуються на використанні сучасних ІТ-технологій, забезпечує зниження до 25% витрат на спорудження свердловини [16].

Бурова техніка - це область застосування, в якій систематичне зберігання та ситуаційне повторне використання минулого конкретного досвіду забезпечують значну підтримку бурового персоналу на різних рівнях. Пошук оптимального проектного рішення передбачає розгляд безлічі варіантів розробки, і на практиці фахівці спираються на минулий досвід, вибираючи об'єкти-аналоги з готовими рішеннями, які застосовуються до нового об'єкту. При цьому високий ступінь невизначеності інформації про процеси і об'єкти нових родовищ обумовлює те, що кінцевий результат залежить від досвіду, інтуїції і суб'єктивних переваг фахівця. Цей результат не є гарантовано кращими серед можливих, а на його пошук потрібні істотні витрати часу.

Симулятор призначений для імітації дій фахівців, які безпосередньо виконують бурові роботи та відповідають за їх проведення, моделювання об'єктів, відображення предметів в реальному чи гіпотетичному стані. Це дозволяє проведення експериментів із використанням моделей конкретних фрагментів реальності, що зменшують інформаційну ентропію, що характеризує сучасні ситуації прийняття рішень.[22]

Мета дослідження охарактеризувати існуючі інженерні рішення, що використовують знання орієнтовані методи для симуляції технологічних процесів, з'ясувати, які можливі переваги використання міркувань на основі конкретних випадків (СВР) може надати нафтогазовій галузі буріння при прийнятті рішень.

## **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**

Більшість опублікованих праць та літератури співвідносить наступні аспекти параметризації, що враховуються при прийнятті

рішень у процесі буріння свердловин на нафту і газ:

- геологічна будова родовища
- його розташування в просторі і пов'язані з ним рельєфні умови;
- кількість та якість корисних копалин
- прогнозовані умови експлуатації родовища (факторам, їх зумовлюють) [13].

Технологічними елементами буріння є параметри режиму буріння (осьова сила на долото, швидкість його обертання, кількість та якість промивальної рідини), які можна цілеспрямовано змінювати з метою досягнення необхідних показників у кожному рейсі долота з урахуванням обмежень, встановлених геологотехнічним нарядом на свердловину [21].

На основі комплексної геолого-технологічної інформації алгоритм прогнозування дозволяє приймати рішення про вибір оптимальних значень режимних параметрів, при яких забезпечуються максимум швидкості буріння і мінімум вартості 1 м проходки [28].

Основою формування моделювання процесу буріння вважається встановлення В.С.Федоровим залежності механічної швидкості буріння  $V$  від навантаження на долото  $G$  і частоти його обертання  $n$ . В.С. Федоровим отримана емпірична залежність

$$V = a n^x G^y,$$

де  $x$ ,  $a$ ,  $y$  – коефіцієнти, які враховують характеристики гірського масиву і спосіб буріння; за даними Л.І. Штурмана при турбінному бурінні в породах Каширської світи  $x = 0,7$ ;  $y = 1,1$ ;  $a = 0,0024$ .

Із відомих типів моделей (концептуальних, фізичних, математичних) широке застосування у практиці буріння отримали математичні моделі, які у формалізованому вигляді встановлюють кількісні і якісні співвідношення між фізичними процесами, що відбуваються в механічній, гідродинамічній, електричній підсистемах бурової установки як складного технологічного комплексу, що функціонує за умов невизначеності. Основним процесом, який об'єктом формалізації за допомогою технологічних моделей, є процес взаємодії долота з гірською породою на вибої свердловини [12].

Моделювання швидкості проникнення (ROP) на бурове долото має важливе значення для оптимізації процесу буріння [6,11].

В практиці розглядають два різні підходи до прогнозування швидкості проникнення: підхід моделювання, заснований на фізиці та на основі даних.

Моделі, керовані даними, побудовані за допомогою алгоритмів машинного навчання, використовують для вимірювання швидкості проникнення використання вимірюваних поверхневих входних функцій - вага-долото, обертів і швидкість потоку.

На основі результатів цих симуляцій було зроблено висновок, що керовані даними моделі є більш точними та забезпечують кращу відповідність, ніж традиційні моделі. Моделі, керовані даними, працюють краще із середньою помилкою 12% та покращують прогноз корисності пристосування швидкості проникнення від 0,12 до 0,84 [4].

База знань користувача про параметри процесу буріння є основою для визначення методів реалізації технологічного симулятора автоматизованого управління процесом буріння свердловин, що дає змогу визначити необхідні керувальні дії.

У роботі [8] представлений метод зв'язку кількох свердловинних параметрів за допомогою алгоритмів машинного навчання.

В роботі [24] розглядається метод виведення рішення по прецедентам, як інструмент підтримки прийняття рішень при проектуванні та моделюванні родовищ нафти і газу. Пропонований підхід дозволяє мінімізувати вплив людського фактору, об'єктивізувати процес прийняття рішення, оскільки передбачає використання суворо формалізованої процедури з кількісним обґрунтуванням схожості порівнюваних об'єктів і розглядом всіх доступних в базі прецедентів. Останнє є ще однією перевагою використання CBR-системи, так як при традиційному підході людського ресурсу, як правило, не вистачає, щоб зробити вичерпний пошук і аналіз всіх можливих аналогів для прийняття рішень. На даний момент вже існує уявлення про родовища вуглеводнів як про прецедент. Інструмент підтримки прийняття рішень у вигляді CBR-системи і бази родовищ-прецедентів може бути задіяний на всіх стадіях проектування розробки

родовищ, де необхідний вибір об'єкта-аналога, а не тільки при моделюванні.

Протягом багатьох років використання штучного інтелекту призвело до значних оптимізацій проектування та обчислень у світовій галузі розвідки та видобутку нафти, і його застосування лише продовжує зростати з появою сучасних технологій буріння та виробництва [2].

Тому кілька досліджень [1,3,7] в останні роки пропонують використовувати моделі, керовані даними, із поля штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації ROP, запобігання ускладнень і аварійних ситуацій в процесі будівництва нафтових і газових свердловин.

### **Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми**

Для того щоб мати можливість будувати точні прогнози видобутку, аналізувати і моделювати поточний стан свердловини важливо зберігати і накопичувати всю отриману інформацію про стан свердловин і параметрах буріння з перших метрів проходки і до закінчення буріння. Однак рішення даної задачі ускладнене через відсутність стандартних механізмів уніфікації технічної взаємодії між різними рішеннями, що в свою чергу перешкоджає формуванню єдиного інформаційного середовища симуляції процесів буріння.

Практика буріння нафтогазових свердловин показує, що основна причина невизначеності в ситуаціях прийняття рішень є наслідком невиконання інформаційних вимог повноти даних про технологічні процеси, що компенсується припущеннями чи гіпотезами на основі знань, досвіду та інтуїції. Тому оператор технічного процесу не повністю контролює хід технологічних процесів і перебуває у ситуаціях невизначеності та ризику, під тиском постійного дефіциту даних повинен висувати гіпотези про оцінку поточних та майбутніх подій.

В даний час сучасні комп'ютерні тренажери для навчання операторів знаходяться в процесі розвитку. Існує ряд проблем, істотно загальмовують їх розвиток. Перш за все, це пов'язано з великою кількістю різних компаній-розробників комп'ютерних тренажерів, жорстко конкурують між собою і тримають в суворій

секретності позитивні і негативні результати своєї діяльності.

Проблема точності в комп'ютерному тренінгу зазвичай викликає найбільші дискусії. Саме поняття «точність» передбачає наявність дотримання вищенаведених вимог.

Повнота моделі - включення в модель абсолютно всієї технологічної схеми, значно здорожує тренажер і знижуючи швидкість моделювання, може мало що додавати до її цінності для тренінгу. Технологічні лінії, не задіяні при нормальному функціонуванні, пуску або зупинці, можуть не моделюватися. Резервне або паралельно працююче обладнання може моделюватися спрощено, деякі елементи обладнання можуть при моделюванні об'єднуватися в «пакети».

Зв'язність - необхідно забезпечити розрахунок всієї моделюється технологічної схеми, так щоб зміни на будь-якому її ділянці відбилися на всій схемі відповідно до реальних фізико-хімічними процесами, що протікають в моделюється об'єкті. Штучна ізольованість окремих частин ТП, ще властива деяким вітчизняним розробкам і є наслідком об'єктивної складності реалізації КТ, неприпустима. [19]

Одночасно виникає і проблема «старіння» комп'ютерних тренажерних комплексів, яка полягає в параметричних і структурних змінах технологічного процесу.

До основних проблем створення віртуальних тренажерів класу «Бурові тренажери»- імітатори будівництва свердловин можна віднести: складність або відсутність математичних моделей, які описують ті чи інші процеси буріння.

Поставлена задача має значний простір вирішення. Проте, безумовно комплектність проблеми є суттєвим бар'єром для її вирішення. Поява саме класу певних систем, систем на основі знань дає можливість використання саме минулого досвіду для побудови нових ефективних рішень. Тому, серед підходів менеджменту знань слід виділяти ефективність підходу кейс-базованих міркувань та інформаційно-пошукових задач на основі обмежень [27].

### **Формулювання цілей статті**

Метою статті є огляд загальних принципів побудови тренажеру на знання базованих технологіях побудови бурових тренажерів, а також методичного та програмного забезпечення для навчання оперативного і диспетчерського персоналу об'єктів процесу буріння НГС.

Проведення аналізу існуючих тренажерних систем, тенденцій їх розвитку і загальних складових програмно-технічних тренажерних комплексів, з позиції концептуальних моделей, методів навчання оперативного і диспетчерського персоналу, програмно-технічного забезпечення тренажерного комплексу для навчання персоналу, що задіяні в технічних процесах буріння НГС.

З'ясувати в процесі синтезу знань суттєвих зв'язків між реальними технічними процесами і імітаційним моделюванням та комп'ютерним моделюванням в бурінні та виявити загальні закономірності, з метою поширення результатів дослідження на майбутню розробку знання базованої системи без повторення всього обсягу досліджень. В основу досліджень та для реалізації завдань дослідження покладено методи системного аналізу.

### **Висвітлення основного матеріалу дослідження**

Технологічно спорудження свердловин пов'язане із цілою низкою задач, серед яких найважливіша – забезпечення успішного їх буріння із попаданням вибою у визначене коло допуску. Проблеми, що виникають при її вирішенні, як правило, спричинені недостатньою інформативністю щодо гірничо-геологічних даних під час проектування профілю свердловини та неточністю виконання робіт при їх спорудженні. При проектуванні та організації зв'язків бази прецедентів, на основі яких симулятором буде моделюватись технологічні процеси буріння слід брати до уваги фактори, які ускладнюють процес буріння.

Модель є центральним змістовним вузлом симулятора, який проектується з метою отримання навичок управління модельованими технічними процесами.

В обчислювальному плані симулятор являє собою програмний модуль, що забезпечує при кожному зверненні до нього прорахунок нового

стану технологічного процесу, що моделюється, з урахуванням динамічної пам'яті об'єкта і всіх впливів, вироблених учасниками тренінгу (операторами і інструктором) з моменту попереднього розрахунку. При цьому крім чималої кількості «вимірюваних» змінних (витрат, температур, тисків, рівнів і ін.) прораховується і величезне число «внутрішніх» змінних.

Використання в процесі розробки технологій геоданих є першим кроком для створення цифрового двійника, симулятора процесів буріння і організації експлуатації нафтогазової свердловини. Невід'ємною частиною при цьому є проведення геолого-технологічних досліджень, які з урахуванням сучасних можливостей і обладнання об'єднують різні напрямки: приладовий контроль буріння на основі інформаційно-вимірювальних систем; газовий каротаж; експресні петрофізичні дослідження.

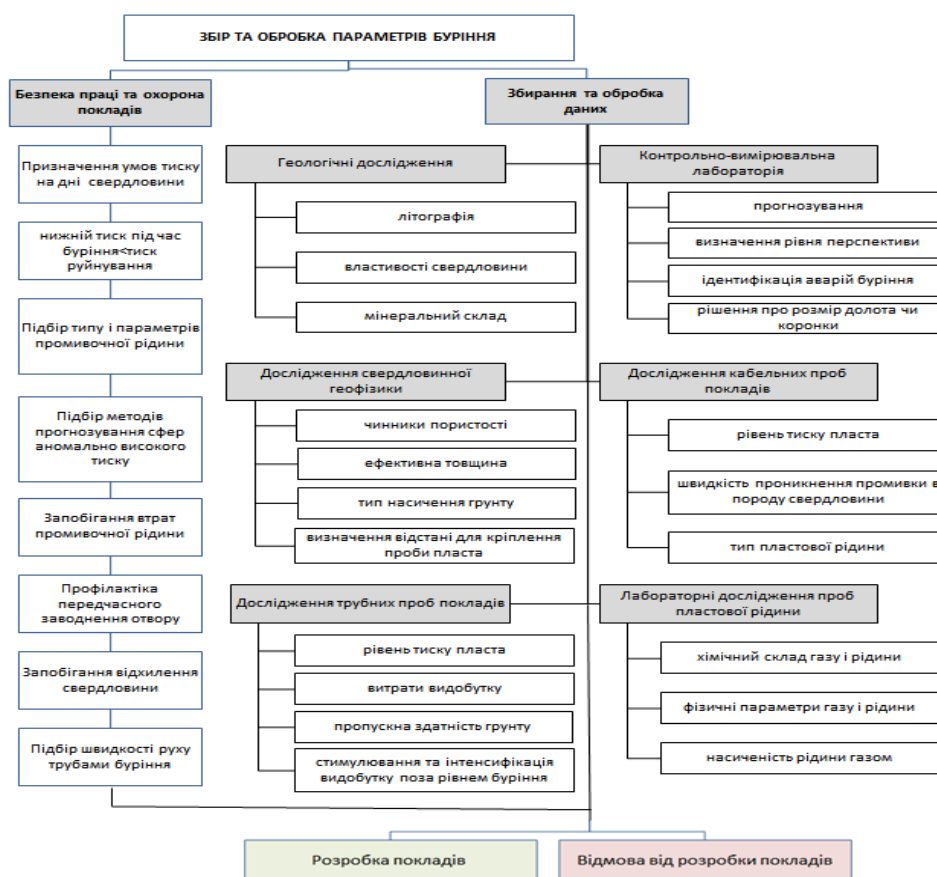
Елементи інтегрованого управління вуглеводневими пластами з урахуванням використовуваних технологій, джерел даних, дослідницьких інструментів та складу групи управління наведено на рис.1. Блок-схема представляє питання, що стосуються техніки та технології розробки родовища вуглеводнів та елементів прийняття рішень, рекомендованих під час аналізу продуктивності нафтогазоносних пластів, а також визначення можливості стимулювання видобутку, або для відмови від розробки пласта або всієї розвідувальної свердловини. [10]. Типова система, що описує поведінку технологічної установки, що моделюється, може налічувати кілька тисяч рівнянь, але сучасні обчислювальні системи цілком справляються з таким обчислювальним навантаженням.

Структурно в тренажерній моделі можна виділити власне фізико-хімічну модель, що описує рівноважну динаміку, гідравліку, кінетику, збереження балансів та ін. аспекти функціонування технологічних процесів, і модель системи керування, що розташовується між фізичним об'єктом і оператором і включає в себе вимірювальні прилади, систему сигналізації і блокувань, базові регулятори, системи логічного управління, вдосконалені контролери та ін.

Фізико-хімічна модель щоразу унікальна і тому може бути створена і модифікована тільки розробником тренажера, а модель системи керування практично для всіх технологічних процесів складається зі стандартних елементів і більш відкрита для користувача як в разі повної емуляції, так і при часткової або повної симуляції.

скрізь, де цього вимагає будова технологічного процесу. Ця умова, часто вимагає від розробника тренажера значних зусиль, буває дуже жорсткою в спеціалізованих системах. В стандартних тренажерах деякі неважливі зв'язки можуть бути проігноровані.

- забезпечувати задану статичну і



**Рисунок 1 - Проблеми буріння в продуктивному горизонті**

Виходячи з цілей навчання тренажерні моделі можна розділити на стандартні, що відображають поведінку цілого класу технологічних процесів або окремих поширених технологічних вузлів і апаратів, і спеціалізовані, що описують функціонування конкретних технологічних установок.

Отже, моделі тренажерів повинні мати наступні властивості:

- повноти, тобто надавати навчаючому всю істотну інформацію про хід технологічного процесу і всі основні точки управління.
- зв'язності, подія, внесена на одній ділянці технологічної схеми, має проявитися

динамічну точність. В стандартних моделях точність задається щодо деяких усереднених технологічних режимів і, як правило, зводиться до правильного напрямку і порядку змін значень параметрів. У спеціалізованих моделях потрібно наблизитися до відомих з практики або експертно оцінених, статичних і динамічних режимів.

В результаті проведених аналітичних узагальнень і оцінки визначено обов'язкові складові частини тренажерів. Виокремлюються такі компоненти тренажерів - модель технологічних процесів, інформаційна модель і модель навчання.

1. Будь-який тренажер містить імітацію реального об'єкта, оскільки тренажер створюється саме тому, що реальний об'єкт

неможливо, небезпечно чи дорого використовувати для навчання. Симулятор об'єкта називають тренажерною моделлю об'єкта.

2. У будь-якому тренажері взаємодія учня з моделлю об'єкта здійснюється за допомогою спеціального середовища - інформаційною моделлю. З допомогою якої здійснюється вплив на тренажерну модель і отримується інформація про її стан. У сучасних термінах інформаційна модель являє собою інтерфейс.

3. Тренажерна модель, забезпечена інформаційною моделлю є лише імітатором реального об'єкта з можливістю маніпулювання. Імітатор стає тренажером з появою правил, методів, рекомендованого складу тренувальних вправ та інших атрибутів навчання. Все це є моделлю навчання.

Таким чином, для кожної предметної області, буріння зокрема, можна виділити кілька основних випадків, які також можна трактувати як типові, найпоширеніші. На рівні бази знань ми отримуємо деяке ядро бази знань, яке буде інформаційною основою тренажера.

Виходячи з даної проблеми (технологічна проблема в галузі буріння нафтових і газових свердловин), слід використовувати відповідну методологію міркувань, щоб мати змогу знайти минулі подібні випадки з метою багаторазового або модифікованого її використання для нового рішення з врахуванням поточних проблем (наприклад, вибір режиму буріння: вимушений, оптимальний, раціональний тощо) [9].

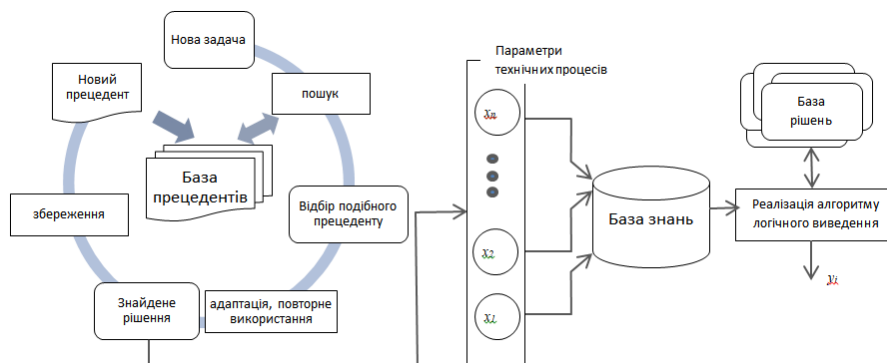
Технологічний цикл управління процесом видобутку формується інформаційним циклом «Вимірювання - Корекція - Контроль - Прогноз - Вплив». Однак, прецеденти, не завжди використовуються ефективно для аналізу процесів через відсутність добре організованих даних, де існує величезний потенціал

## Рисунок 2 - Схема алгоритма прийняття рішень на основі CBR

перетворення даних у знання.

Організація та вдосконалення даних мають стати важливими компонентами при проектуванні тренажера. Схема алгоритма прийняття рішень на основі CBR наведено на рис.2.

Знання слід організувати навколо найбільш важливих об'єктів предметної області. Всі знання, що характеризують деяку сутність, зв'язуються і подаються вигляді окремого об'єкту. Якщо системі потрібна інформація про деяку сутність, то вона спочатку шукає об'єкт, що її описує, а потім вже всередині об'єкту шукає інформацію про дану сутність. В об'єктах, в свою чергу, виділяють два типи зв'язків між елементами – зовнішні і внутрішні. Внутрішні зв'язки об'єднують елементи в єдиний об'єкт і утворюють його структуру. Зовнішні зв'язки відображають залежності, що існують між об'єктами в предметній області. Зовнішні зв'язки поділяють на логічні і асоціативні. Логічні зв'язки виражають семантичні відношення між елементами знань. Асоціативні зв'язки забезпечують взаємозв'язки, що прискорюють пошук релевантних знань. Кожен виділений об'єкт предметної області володіє певними характеристиками та властивостями. Наприклад в бурінні, для об'єкту «родовище» типовими атрибутами є глибина залягання, вік, літологія тощо. Атрибути набувають конкретних значень [15]. Симуляція розглядається як з'єднувальна ланка між знаннями, що містяться в активованих наборах даних, і здатністю до швидкого вивчення попередньо отриманих ідей та експертного досвіду стосовно наведених статистичних оцінок даних [26].



Загальна структура комп'ютерного тренажеру з технічної точки зору, являє собою програмно-апаратний комплекс і включає в себе:

- станцію, що моделюється, на якій вирішується система алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують модель технологічного процесу;
- станції учнів, на яких реалізовано інформаційну модель;
- робочу станцію інструктора навчання, з допомогою якої інструктор організує і відстежує хід тренінгу.

При цьому станція, що моделюється, як правило, поєднується на одній обчислювальній системі з інструкторською, оскільки характеристики сучасних обчислювальних систем дозволяють в багатозадачному режимі одночасно розраховувати кілька тренажерних моделей і реалізовувати інструкторські функції.

При всій важливості технічних складових тренажерів очевидно, що ці цілі недосяжні, якщо основа тренажера - модель технологічного процесу - не буде адекватною і не відобразить актуального стану реального технічного процесу. [23]

Більшість серйозних тренажерних систем є складними програмно-апаратними комплексами. Вимоги до сучасних тренажерних систем та комплексам в даний час досить жорсткі і перекрити всі наявні потреби засобами однієї лише комп'ютерної графіки неможливо. Об'єктами тренінгу є відтворення динаміки модельованого об'єкта, імітація роботи засобів вимірювання і управління об'єктом, і відтворення апаратної частини людино-машинного інтерфейсу.

Сучасні тренажерні системи мають загальні вимоги, структуру та закономірності проектування. В той же час спостерігається і безліч відмінностей, які обумовлені сферою застосування, аналіз яких дозволяє виявити особливості тренажерів для операторів технологічних процесів і виробити обґрунтовані критерії оцінки їх якості.

Технологічні тренажери з'явилися в потенційно небезпечних сферах. Це пов'язано з великим ризиком для життя і безпеки людей та жорсткими вимогами законодавства в галузі підготовки і сертифікації працівників в цих галузях. Тренажери знаходять все більше

застосування в авіації, судноводінні, енергетиці, збройних силах, медицині, космонавтиці і тих областях, де проведення фізичного навчання пов'язане з зазначеними труднощами.

В морських тренажерах центральне місце відводиться моделі морської обстановки, що забезпечує учня ключовою зоровою інформацією (зміна берегової лінії, зустрічні судна, сигнали навігаційного обладнання та ін.). У тренажерах для високоманеврових морських засобів, в автомобільних і авіаційних тренажерах особлива увага відведена моделюванню швидкоплинного навколишнього оточення і відчуттів оператора (лінія горизонту, звуки, вібрація, положення тіла, перевантаження, зусилля на органах управління і ін.). В енергетичних тренажерах (особливо в таких як тренажери оперативних перемикачів) людина часто виступає як диспетчер, для якого візуальна інформація є радше засобом актуалізації знань про структуру процесу, ніж показаннями приладів. Вважається, що до 80% поточної інформації отримується диспетчером з додаткових джерел (телефонія, телеметрія, електронна пошта і т.п.), тому модель об'єкта диспетчеризації також відображає таку специфіку.

Основною цільовою функцією оптимізації буріння є швидкість проникнення обчислена з використанням параметрів буріння як вхідних даних. Однак, успішною моделлю тренажера можна вважати, використання якого призведе до оптимізації таких параметрів буріння як мінімізація відхилення від запланованої траєкторії свердловини та максимізація коефіцієнту корисної дії.

Сьогодні моделі тренажерів класу «Бурові тренажери» варіюються від звичайних портативних і повномасштабних тренажерів-симуляторів буріння і управління свердловиною до новітніх моделей з кібер-кріслом, доповнюються опціями за індивідуальними вимогами.

Як приклад простих рішень мобільний додаток «Wellcontrol», що працює в середовищі операційної системи IOS, містить мнемосхему гідравлічної лінії бурової установки. Анімаційне супровід, що створює ефект присутності, візуалізує зміну технологічного процесу в залежності від обраних команд оператора. Тренажер компанії «Learn to drill» призначений



для навчання основам ліквідації газонафтоводопроводів. Інтерфейс тренажера розроблений таким чином, що оператор бачить статус виконання операцій, параметри яких він може регулювати. Процес управління технологічними процесами супроводжується анімацією, елементи управління аналогічні контролерам, що застосовуються на виробництві [20].

В даний час за кордоном розвиваються кілька тренажерних платформ, розроблених і підтримуваних основними світовими виробниками комп'ютерних тренажерних комплексів (КТК) (ABB Simeon, Inc., Honeywell, Inc., CAE Link, Inc. і ряд інших).

До найбільш відомих симуляційних систем, що добре себе зарекомендували, можна віднести тренажери наступних виробників: комплекс віртуальних тренажерів «Слайд Майстер 1.18», «АМТ-231» (ЗАТ «Автоматизація Моніторингу Технологій»), DART (КСА DEUTAG), DrilSim20, DrillSim5000 [17].

Комплекс віртуальних тренажерів «Слайд Майстер 1.18» складається з 4 симуляторів процесів, що застосовуються в ході підготовки до буріння і безпосередньо буріння:

- тренажер КНБК (компоновки низу бурильної колони);
- тренажер Міра Інструменту;
- тренажер Буріння похило-спрямованого буріння (відповідно до варіанту);
- тренажер Буріння похило-спрямованого буріння вибір профілю.

Апаратно-програмний комплекс тренажера складається з пультів і постів управління обладнанням для проведення свердловин, персонального комп'ютера і програмного забезпечення.

Тренажер імітує в реальному і прискореному масштабах часу технологічні процеси провідки свердловин: поглиблення, спускопідйому, цементування, ліквідації нафтогазопроводів.

Програмне забезпечення тренажера містить засоби проектування навчальних завдань з будь-якими початковими умовами виконання провідки свердловин: характеристиками продуктивного пласта, конструкцією свердловини, набором устаткування і інструменту, технологій виконання основних операцій, нестандартними ситуаціями.

При імітації технологічних процесів на екран монітора виводяться: числові характеристики умов імітованого процесу, графіки найважливіших контрольованих технологічних параметрів, а також анімації, що відображають в реальному часі роботу обладнання, інструменту та стан свердловини. Імітація роботи обладнання супроводжується звуком. Тренажер дозволяє учням побачити приховані від прямого спостереження процеси, що відбуваються в свердловині, спостерігати процеси виникнення і розвитку ускладнень і аварійних ситуацій. Він дає можливість учнем перевірити і порівняти різні варіанти вирішення технологічних задач.

Тренажер DART (Drilling and Advanced Rig Training) обладнаний екранами для відтворення 3D-графіки, звуковими колонками, віртуальними люльками бурильника, пультом керування. Тренажер DART дозволяє відпрацьовувати навички буріння і різні сценарії в режимі реального часу для конкретного випадку із застосуванням технології візуального внутрішньосвердловинного моделювання та тим самим оптимізувати процес навчання.

В системі DART використовується програмне забезпечення, яке інтегрує і відтворює свердловинні умови. Імітація основних технологічних процесів проводиться учнем із застосуванням ЕОМ, при цьому робота бурового обладнання і сама свердловина візуалізуються на декількох екранах, завдяки високоякісній 3D графіці і імітації процесу в режимі реального часу

Можливості тренажера DART наступні:

- забезпечує реалістичні практичні рішення в процесі навчання і підготовки бурових бригад до початку роботи на новій буровій установці або початку нового проекту з буріння;
- дозволяє пробурити віртуальну свердловину по заданих проектним параметрам і виявити потенційні проблеми;
- сприяє підвищенню ефективності когось комунікація та згуртованості бурових бригад.

Даний вид тренажера головним чином застосовується для перевірки навичок членів бурової вахти, а саме бурильників і виключно для ілюстрації роботи бурового персоналу або

підготовки бурильників в рамках підвищення кваліфікації.

При створенні даного тренажера був застосований типовий підхід «від меншого до більшого» в системі «бурильник - робоче місце - умови праці». Але з огляду на ступінь оригінальності умов буріння на кожній реальній свердловині, говорити про універсальність DART не доводиться.

Цей підхід краще розкриває причинно-наслідковий зв'язок між виконуваними операціями і отриманим результатом. Одним з головних недоліків є можливість працювати на тренажері всього лише одного або двох-трьох операторів.

Нараді з вищенаведеними інженерними рішеннями у світі, в таких країнах як Угорщина, Данія, Голландія, Польща, Японія, Росія, Франція, США, Туреччина, Китай, Іран та інших тренувальні центри для сертифікації та підготовки працівників, що замагаються розробкою родовищ використовують тренажер DrillSim5000, виробник Англія.

Тренажер DrillSim5000 забезпечений подібно сучасному обладнанню бурової установки.

Склад тренажера:

- робоче місце бурильника (блоки управління обладнанням та реєстраційних приладів);
- пульт управління противикидним обладнанням (ПВО);
- пульт управління гідравлічними дроселями (керованими штуцерами);
- манифольд стояків та манифольд дроселів;
- робоче місце інструктора-викладача.

Відтворені на пультах тренажера засоби управління і контрольно-вимірювальна апаратура майже не відрізняються від реального обладнання.

Інтерфейс Тренажера «Drillsim 5000» відображає безліч модулів, що імітують робочі місця фахівців в бурінні. Тренажер влаштований таким чином, щоб оператор міг тренуватися на базі віртуальної версії або фізичної приладової панелі, завдяки можливості підключення безлічі контролерів по імітації осьового навантаження на долото, регулювання параметрів промивки і т.д. Функціональна можливість з обміну даними в реальному часі через інтерфейси дозволяє

підключити декілька фізичних приладових панелей управління бурінням до єдиного інтерфейсу (монітора).

Для максимальної відповідності реальним умовам обстановки буріння використовуються цифрові звукові ефекти, повністю синхронізовані з різними операціями, що здійснюються на тренажері. Кольоровий графічний монітор з високою роздільною здатністю дозволяє учню отримувати в реальному часі графічну інформацію про роботу спускопідйомного обладнання і роторної системи в процесі буріння, а також іншого обладнання. Дії оператора тренажера відображаються на моніторі.

Індивідуальна станція учня з сенсорним екраном поставляється в комплекті обладнання тренажера для спостереження за параметрами, не пов'язаними безпосередньо з обладнанням бурової установки, наприклад, для спостереження за зміною питомої ваги бурового розчину [25].

Повномасштабний бурової тренажер DrillSim-5000 дозволяє моделювати практично будь-яку бурову установку, яка існує на сьогоднішній день. На додаток до оперативних завдань, інструктор може вводити численні несправності. На тренажері моделюється все стандартне обладнання, яке присутнє на будь-якій буровій установці.

Крім того моделюються

- параметри бурового розчину і циркуляційної системи, бурильного інструменту і процесу буріння, талевої системи;
- система управління свердловиною і запобігання ГНВП;
- позаштатні ситуації, які можуть виникнути на виробництві (всі позаштатні ситуації задаються інструктором зі свого робочого місця);
- широкий діапазон забійних умов;
- ГНВП і глушіння свердловини;
- стандартний процес буріння і спускопідйомних операцій (СПО).
- процеси, пов'язаних з капітальним ремонтом свердловини [5].

Нараді з повномасштабним тренажером використовується портативний тренажер реального часу буріння і управління DrillSim20. Інтерактивний тренажер є економічно ефективним засобом проведення практичного

навчання з контролю за свердловинами за визнаними стандартами акредитації, включаючи IADC та IWCF.

DrillSim20 включає в себе дві консолі, робоче місце бурильника з сенсорним екраном і ноутбук інструктора, які упаковані в міцний захисний кейс, зручний для транспортування і проведення навчання в будь-якому місці, в будь-який час.

Підтримує повні можливості свердловинної моделі DrillSim.

**Таблиця 1 - Порівняльна техніко-функціональна характеристика тренажерів**

Показники	Слайд Майстер 1.18	AMT -231	DAR T	DrillSim 5000	Drill Sim 20
Тренажер має реалістичні динамічні властивості	-	+	+	+	+
Симуляція аварій і ускладнень	-	+	+	+	+
Автоматичний режим	+	+	+	+	+
Інтерфейс відповідає прийнятим стандартам	+	+	+	+	+
Розробник може емулювати типовий операторський інтерфейс	-	-	+	+	-
Оцінка і складання звітності	+	+	+	+	-
Декілька станцій тренування	-	+	-	+	-

В результаті огляду систем класу «Бурові тренажери» бачимо, що тенденція використання тренажерних комплексів в наш час має під собою вагомні підстави. Однак без недоліків не обійшлося. Основне досліджуване устаткування не моделюється, а обчислюється, не враховуючи динаміки, або обчислюється за готовими формулами з незмінними параметрами.

### Висновки

Представлено основні тенденції використання штучного інтелекту при симуляції технологічних процесів. Доведено високу ефективність цього засобу навчання та необхідність його впровадження у навчальну і їх професійну підготовку. Деталізовано структуру сучасних тренажерів з погляду технічної

сторони, особливий акцент зроблено на організації інформаційної моделі.

Узагальнено задачі, які на сьогоднішній день не повністю вирішені при реалізації проектних рішень побудови тренажерів, а саме питання формування адекватної бази даних, питання критеріїв, що стосуються суб'єктивності визначення важливості епізодів та доцільності занесення прецедентів до бази, організації даних, де існує величезний потенціал перетворення даних у знання.

Проаналізовано виникнення, етапи розвитку та сучасний стан комп'ютерних тренажерів, що застосовуються в підготовці персоналу НГС.

### Список використаних джерел

- Barbosa, Luis Felipe et al. "Machine learning methods applied to drilling rate of penetration prediction and optimization - A review." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 183 (2019): 106332.
- Bello, O. et al. "Application of Artificial Intelligence Techniques in Drilling System Design and Operations: A State of the Art Review and Future Research Pathways." (2016).
- Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. (2020). Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>
- Chiranth Hegde, Hugh Daigle, Harry Millwater, Ken Gray Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. Publication: *Journal of Petroleum Science and Engineering* Publisher: Elsevier. Date: November 2017.
- DrillSIM:5000 Classic [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.drillingsystems.com/product/drillsim5000/>.
- Hegde, C. et al. "Fully coupled end-to-end drilling optimization model using machine learning." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 186 (2020): 106681.
- Hegde, Chiranth et al. "Performance Comparison of Algorithms for Real-Time Rate-of-Penetration Optimization in Drilling Using Data-

Driven Models.” Spe Journal 23 (2018): 1706-1722.

8. Pollock, J. et al. “Machine Learning for Improved Directional Drilling.” (2018).

9. Sheketa V. Case-based modelling of data and knowledge // Sheketa V., Chesanovsky M., Styslo T., Romanyshyn Y., Poteraiilo L. // 14-a міжнародна науково-практична конференція “Математичне та імітаційне моделювання систем – МОДС 2019” – Чернігів.– 2019.–С.177–181.

10. Stanisław Dubiel Barbara Uliasz-Misiak Analiza decyzji technologicznych podejmowanych w zakresie zarządzania złożem węglowodorów przy dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż Przegląd Górniczy 2014; 70 (12) : 106-113; (PL)

11. Yanlong Li, Lei She, Lifeng Wen, Qiang Zhang Sensitivity analysis of drilling parameters in rock rotary drilling process based on orthogonal test method. Publication: Engineering Geology. Publisher: Elsevier. Date: Available online 5 March 2020.

12. Білецький В., Сергєєв П., Фик М., Козирець С. Моделювання в нафтогазовій промисловості Geotechnologies Journal homepage: <http://library.kpi.kharkov.ua/> Volume 1 (2018), pp. 86-98

13. Бурение (добыча, транспортировка, переработка) [Электронный ресурс] // Техническая библиотека транспортировка и хранение. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://neftgaz.ru/tech-library/burenie/141992-burenie-1/>.

14. Волкова М. М., Манурова Р. А., Шайдуллина Д. Н. Применение виртуальных тренажеров для обучения специалистов нефтегазовой отрасли Вестник технологического университета. 2019. Т.22, №4 115 УДК 66-9.

15. Гобир Л.М. Ймовірнісна оцінка результатів інтерпретації даних та параметрів геофізичних досліджень / Гобир Л.М., Вовк Р.Б., Потеряйло Л.О., Шекета В.І. // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”. – 2018. – №3(68).– С. 46-59.

16. Горбійчук М.І. Оптимізації процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.

17. Гриб П.С. Цифровые тренажерные комплексы как средство оптимизации бурения и

эксплуатации скважин Инженерная практика 08/2019.

18. Дарьин А. А. Некоторые аспекты моделирования при создании интерактивных средств обучения операторов Тип: статья в сборнике трудов конференции, 2020 Страницы: 116-118.

19. Дозорцев В. М., Кнеллер Д. В., Левит М. Ю. О проблеме адекватности тренажерных моделей технологических процессов//Труды междунар. конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'2000)». М.: 2000. С. 51–61.

20. Мухаметгалиев И.Д., Агзамов З.В. Разработка человеко-машинного интерфейса тренажера наклонно-направленного бурения «Молодой учёный» №27 (317), июль 2020

21. Мыслюк М.А., Стефурак Р.И., Рыбчик И.И., Ю.М.Васильюк Совершенствование технологии обработки трёхшарошковых долот при роторном бурении скважин /. – М.: ОАО. ВНИИОЭНГ, 2005. – 212 с.

22. Потеряйло Л.О. Моделювання імітаційної моделі керування процесами буріння на основі прецедентів /Потеряйло Л.О. , Процюк В.В. , Кравців К.І// Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості » - - ІГОТП-2020 -Івано-Франківськ, 8 жовтня 2020.

23. Потеряйло Л.О. Використання СВР при реалізації інженерних рішень систем класу «Бурові тренажери» /Потеряйло Л.О. , Процюк В.В. , Кравців К.І//VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», Дніпро, 4 листопада 2020р. – Дніпро, 2020.

24. Разработка процесса принятия решений при моделировании и проектировании месторождений углеводородов на основе вывода по прецедентам. Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы VIII Международной научно-технической конференции; отв. ред. О. Н. Кузяков. – Тюмень: ТИУ, 2019. – 324 с. – Текст: непосредственный. ISBN 978-5-9961-2225-7 .

25. Функциональные возможности полномасштабного бурового тренажера DrillSim-5000 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://www.gubkin.ru/faculty/oil\\_and\\_gas\\_develop](https://www.gubkin.ru/faculty/oil_and_gas_develop)

ment/chairs\_and\_departments/drill\_center/DrillSim-5000.php.

26. Чесановський М.С. Особливості контролю параметрів процесу буріння в контексті підтримки прийняття релевантних рішень / Чесановський М.С., Шекета В.І., Процюк В.В. // Всеукраїнський шоквартальний науково-технічний журнал “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”. – 2018.

27. Шекета В.І. Формально-алгоритмічна імплементація моделей кейсів даних про процес буріння / В.І. Шекета, М.С. Чесановський, Л.О. Потеряйло // Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем : IV Міжнар. наук.-техн. конф., Дніпро, 1-2 листопада 2018р. – Дніпро, 2018. - С. 312-314.

28. Эфендиев, Алиев С.А., Сарбопеева М.Д., Агаева К.К., Кирисенко О.Г. Принятие решений при выборе долот и режимных параметров бурения в зависимости от характера исходной информации г.м., геоинформатика, 2016, №3 (59).

### References

29. Barbosa, Luis Felipe et al. “Machine learning methods applied to drilling rate of penetration prediction and optimization - A review.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 183 (2019): 106332.

30. Bello, O. et al. “Application of Artificial Intelligence Techniques in Drilling System Design and Operations: A State of the Art Review and Future Research Pathways.” (2016).

31. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. (2020). Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>

32. Chiranth Hegde, Hugh Daigle, Harry Millwater, Ken Gray Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. Publication: *Journal of Petroleum Science and Engineering* Publisher: Elsevier. Date: November 2017.

33. DrillSIM:5000 Classic [Електронний ресурс] Retrieved from: <https://www.drillingsystems.com/product/drillsim5000/>.

34. Hegde, C. et al. “Fully coupled end-to-end drilling optimization model using machine learning.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 186 (2020): 106681.

35. Hegde, Chiranth et al. “Performance Comparison of Algorithms for Real-Time Rate-of-Penetration Optimization in Drilling Using Data-Driven Models.” *Spe Journal* 23 (2018): 1706-1722.

36. Pollock, J. et al. “Machine Learning for Improved Directional Drilling.” (2018).

37. Sheketa V. Case-based modelling of data and knowledge // Sheketa V., Chesanovsky M., Styslo T., Romanyshyn Y., Poterailo L. // 14th International Scientific and Practical Conference “Mathematical and Imitational Models of Systems - MODS 2019”. Chernigiv. 2019. pp.177–181.

38. Stanisław Dubiel Barbara Uliasz-Misiak Analiza decyzji technologicznych podejmowanych w zakresie zarządzania złożem węglowodorów przy dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż *Przegląd Górniczy* 2014; 70 (12) : 106-113; (PL)

39. Yanlong Li, Lei She, Lifeng Wen, Qiang Zhang Sensitivity analysis of drilling parameters in rock rotary drilling process based on orthogonal test method. Publication: *Engineering Geology*. Publisher: Elsevier. Date: Available online 5 March 2020.

40. Biletskyi V., Serhieiev P., Fyk M., Kozurets S. Modeliuvannia v naftohazovii promyslovosti [Modeling in the oil and gas industry] *Geotechnologies Journal* homepage: <http://library.kpi.kharkov.ua/> Volume 1 (2018), pp. 86-98.

41. Burenie (dobycha, transportirovka, pererabotka) [Yelektronniy resurs] // *Tekhnicheskaya biblioteka transportirovka i khranenie*. 2013 Retrieved from: <https://neftegaz.ru/tech-library/burenie/141992-burenie-1/> (in Russ.).

42. Volkova M. M., Manurova R. A., Shaydullina D. N. Primenenie virtualnykh trenazherov dlya obucheniya spetsialistov neftegazovoy otrasli [Using virtual simulators in training oil and gas professionals] *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2019.; T.22,4 115 UDK 66-9 (in Russ.).

43. Hoby L.M. Ymovirnisna otsinka rezultativ interpretatsii danykh ta parametriv heofizychnykh doslidzhen / Hoby L.M., Vovk R.B., Poterailo L.O., Sheketa V.I. // *Vseukrainskyi*

shchokvartalnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal "Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch". 2018;3(68).p. 46-59(in Ukr.).

44. Horbiichuk M.I. Optymizatsii protsesu burinnia hlybokykh sverdlovin / M.I.Horbiichuk, H.N.Sementsov. – Ivano-Frankivsk: Fakel, 2003, 493 p. (in Ukr.)

45. Grib P.S. Tsifrovye trenazherye kompleksy kak sredstvo optimizatsii bureniya i ekspluatatsii skvazhin Inzhenernaya praktika 08.2019 (in Russ.).

46. Darin A. A. Nekotorye aspekty modelirovaniya pri sozdanii interaktivnykh sredstv obucheniya operatorov Tip: statya v sbornike trudov konferentsii. 2020 pp: 116-118 (in Russ.).

47. Dozortsev V. M., Kneller D. V., Levit M. Yu. O probleme adekvatnosti trenazherykh modeley tekhnologicheskikh protsessov//Trudy mezhdunar. konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya (SICPRO'2000)». Moskow: 2000. p. 51–61 (in Russ.).

48. Mukhametgaliev I.D., Agzamov Z.V. Razrabotka cheloveko-mashinnogo interfeysa trenazhera naklonno-napravlenogo bureniya «Molodoy uchenyy» 27(317), 07.2020 (in Russ.).

49. Myslyuk M.A., Stefurak R.I., Rybchich I.I., Yu.M.Vasylyuk Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki trekhsharoshkovykh dolot pri rotornom burenii skvazhin/ Moskow: OAO VNIIOENG, 2005. – 212 p. (in Russ.).

50. Poteriailo L.O. Modeliuvannia imitatsionnoi modeli keruvannia protsesamy burinnia na osnovi pretsedentiv /Poteriailo L.O. , Protsiuk V.V. , Kravtsiv K.I// Vseukrainskoi nauk.-prakt. konf. «Informatsiini tekhnolohii v osviti, tekhnitsi ta promyslovosti » - ITOTP-2020 -Ivano-Frankivsk, 8 zhovtnia 2020.

51. Poteriailo L.O. Vykorystannia CBR pry realizatsii inzhenernykh rishen system klasu «Burovi trenazhery» /Poteriailo L.O. , Protsiuk V.V. , Kravtsiv K.I//VI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system», Dnipro, 4.11.2020. – Dnipro, 2020. (in Ukr.)

52. Razrabotka protsessa prinyatiya resheniy pri modelirovanii i proektirovanii mestorozhdeniy uglevodorodov na osnove vyvoda po pretsedentam. Novye informatsionnye tekhnologii v neftegazovoy otrasli i obrazovanii: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii; otv. red. O. N. Kuzyakov. Tyumen:

TIU, 2019. 324 p. (in Russ.).

53. Funktsionalnye vozmozhnosti polnomasshtabnogo burovogo trenazhera DrillSim-5000 [Yelektronniy resurs] – Retrieved from: [https://www.gubkin.ru/faculty/oil\\_and\\_gas\\_development/chairs\\_and\\_departments/drill\\_center/DrillSim-5000.php](https://www.gubkin.ru/faculty/oil_and_gas_development/chairs_and_departments/drill_center/DrillSim-5000.php). (in Russ.).

54. Chesanovskiy M.S. Osoblyvosti kontroliu parametriv protsesu burinnia v konteksti pidtrymky pryiniattia relevantnykh rishen / Chesanovskiy M.S., Sheketa V.I., Protsiuk V.V. // Vseukrainskyi shchokvartalnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal "Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch". 2018(in Ukr.).

55. Sheketa V.I. Formalno-alhorytmichna implementatsiia modelei keisiv danykh pro protses burinnia / V.I. Sheketa, M.S. Chesanovskiy, L.O. Poteriailo // Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system: IV Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., Dnipro, 1-2 lystopada 2018r. Dnipro, 2018. p. 312-314 (in Ukr.).

56. Efendiev, Aliev S.A., Sarbopeeva M.D., Agaeva K.K., Kirisenko O.G. Prinyatie resheniy pri vybore dolot i rezhimnykh parametrov bureniya v zavisimosti ot kharaktera iskhodnoy informatsii g.m., geoinformatika, 2016, 3 (59) (in Russ.).