

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по науке и стратегическим проектам, кандидат физико-математических наук
Гоголев Алексей Сергеевич

16» _____ 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Диссертация на тему «Гибридная интеллектуальная система для оперативного определения свойств бурового раствора на основе машинного обучения» выполнена в Центре подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

В период подготовки диссертации соискатель **Давуди Шадфар** с 2019 по 2023 год обучался в очной аспирантуре по специальности 2.8.2 – «Технология бурения и освоения скважин» в Отделении нефтегазового дела в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

В 2016 году окончил магистратуру Технологического университета им. Шарифа по специальности «Технология бурения нефтяных и газовых скважин».

Диплом об окончании аспирантуры Национального исследовательского Томского политехнического университета выдан в 2023 году. Дополнительно, 10 июля 2023 года соискатель успешно сдал кандидатский экзамен по научной специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (Справка №28 от 25 июля 2023 г).

Научный руководитель – Рукавишников Валерий Сергеевич, доктор философии в области нефтяного инжиниринга (Ph.D.), доцент Отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», директор Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела ИШПР НИ ТПУ.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы исследования. В ходе всего цикла буровых работ необходимо регулярно получать информацию относительно всех ключевых параметров буровых растворов. Чаще всего реологические и фильтрационные свойства бурового раствора проверяются один или два раза в день. Однако другие свойства бурового раствора, такие как плотность бурового раствора ($\rho_{б,р}$), содержание твердой фазы (ТФ) и условная вязкость (УВ), контролируются несколько раз в час, потому что их измерения проще. Для оценки реологических и фильтрационных свойств бурового раствора на основе других, более доступных параметров, таких как $\rho_{б,р}$, ТФ и УВ, могут быть использованы методы машинного обучения. Два таких метода, как метода опорных векторов с наименьшими квадратами (LSSVM) и многослойная экстремальная обучающая машина (MELM), успешно применяются для решения различных задач регрессии и классификации. Эти методы могут помочь разработать прогнозные модели, точно определяющие указанные свойства буровых растворов.

Однако оба этих метода обладают своими недостатками, которые влияют на точность прогнозирования и способность к обобщению. Например, самостоятельная LSSVM страдает от проблем с локальной оптимизацией, что приводит к застреванию в локальных минимумах. Самостоятельный метод MELM требует трудоемкого анализа методом проб и ошибок для определения подходящей архитектуры модели и подвержен случайному назначению гиперпараметров. Для решения этих проблем можно объединить самостоятельные модели с методами глобальной оптимизации, чтобы определить оптимальную архитектуру модели MELM и оптимальные гиперпараметры для обеих моделей MELM и LSSVM.

Новизна результатов проведённых исследований:

1. Предложена, обоснована и экспериментально проверена прогнозирующая модель, основанная на многослойном экстремальном обучении (MELM), обеспечивающая повышение точности прогнозирования свойств бурового раствора с помощью определения оптимального количества скрытых слоев и входящих в них нейронов, а также нахождения оптимальных значений весов и смещений, приписываемых каждому нейрону и скрытому слою соответственно.
2. Предложена, обоснована и экспериментально проверена прогнозирующая модель, основанная на методе опорных векторов (LSSVM), обеспечивающая повышение точности прогнозирования свойств бурового раствора за счет определения подходящей функции ядра и организации поиска гиперпараметров, при которых достигается глобальный минимум среднеквадратического отклонения (RMSE).
3. Предложено применение разработанных прогнозирующих моделей для формирования набора гибридных моделей, обеспечивающих получение точных оценок водоотдачи, пластической вязкости и динамического напряжения сдвига бурового раствора на основе измеряемых параметров: плотности, условной вязкости и содержания твердой фазы бурового раствора.

Личный вклад соискателя

Диссертационная работа, представленная соискателем, является результатом нескольких лет исследований в области моделирования параметров бурового раствора с использованием методов машинного обучения на основе полевых данных. Представленные на защите результаты являются обобщением работ, выполненных лично автором. В публикациях, написанных в соавторстве с коллегами, соискатель принимал активное участие во всех компонентах исследования, включая кураторство данных, концептуализацию, методологию, исследование, разработку программного обеспечения, формальный анализ, проверку, визуализацию, написание первоначальных черновиков, написание, рецензирование и редактирование. Вклад соавторов в основные публикации не

превышал 25% от общего объема работы. Автор непосредственно создал и провел вычислительные эксперименты, используемые для разработки автономных и гибридных моделей, предложенных в диссертационной работе. Применяя вычислительные подходы, такие как методы машинного моделирования и оптимизации, а также анализ и интерпретацию инженерных результатов, автор разработал шесть прогностических моделей для определения трех свойств бурового раствора. Достоверность и надежность предложенных автором прогностических моделей были детально исследованы и обоснованы с последующей публикацией результатов. Автор лично провел всю упомянутую исследовательскую работу, включая составление важного набора данных на основе ежедневных буровых отчетов двух различных нефтяных месторождений, предварительную обработку собранного набора данных и моделирование свойств с помощью методов машинного обучения. Кроме того, автор осуществил каждый этап разработки и оценки предложенных прогностических моделей для прогнозирования свойств бурового раствора. Постановка задачи и выбор методов их решения были выполнены совместно с научным руководителем. Формулировка защищаемых положений также была выполнена совместно с научным руководителем. Личный вклад автора в результаты диссертации превышает 85%.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретические положения, сформулированные автором, способствуют развитию гибридных моделей машинного обучения, позволяющих делать точные прогнозы с высокой обобщаемостью. Задача разработки таких гибридных прогностических моделей выполнена с использованием методов глобальной оптимизации и получила научное обоснование в результате проведения аналитического описания и многочисленных вычислительных экспериментов над предложенными моделями.

Что касается практической значимости, то следует отметить, что модели прогнозирования, предложенные в данной диссертации, могут быть применены при бурении скважин для непрерывного мониторинга трех критических параметров бурового раствора, а именно пластической вязкости, динамическое напряжение

сдвига и водоотдачи. Применение таких моделей, генерирующих надежные прогнозы целевых параметров бурового раствора, снижает требования к проведению большого количества трудоемких экспериментальных измерений.

Достоверность и обоснованность результатов исследования

Чтобы обеспечить достоверность результатов, представленных в диссертационном исследовании, применяется оценка эффективности прогнозирования разработанных моделей на тестовом наборе данных. Такой набор данных называется тестовым набором. Предложенные прогностические модели демонстрируют точные прогнозы для трех целевых параметров при применении на тестовом наборе данных. Кроме того, результаты настоящего диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Инженерной школы природных ресурсов ТПУ, а также используются в компании ООО "Инновационные Технологии" для нужд мониторинга процесса бурения. Акты внедрения приложены к диссертационной работе.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-практических конференциях международного и всероссийского уровня и изложены в печатных работах. По результатам диссертационного исследования опубликовано 12 работ, в том числе 9 статей в журналах первого квартиля (Q1), индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также 3 публикации в материалах международных и всероссийских научных конференций; 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основное содержание диссертационной работы и её результатов полностью отражены в следующих работах:

1. Davoodi, S. Hybridized machine-learning for prompt prediction of rheology and filtration properties of water-based drilling fluids / S. Davoodi, M. Mehrad, D.A.

- Wood, H. Ghorbani, V.S. Rukavishnikov // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 123. – P. 106459. (Q1, WoS, Scopus).
2. Davoodi, S. Machine-learning models to predict hydrogen uptake of porous carbon materials from influential variables / S. Davoodi, H.V. Thanh, D.A. Wood, M. Mehrad, M. Al-Shargabi, V.S. Rukavishnikov // *Separation and Purification Technology*. – 2023. – Vol. 316. – P. 123807. (Q1, WoS, Scopus).
 3. Davoodi, S. Machine-learning predictions of solubility and residual trapping indexes of carbon dioxide from global geological storage sites / S. Davoodi, H.V. Thanh, D.A. Wood, M. Mehrad, V.S. Rukavishnikov, Z. Dai // *Expert Systems with Applications*. – 2023. – Vol. 222. – P. 119796. (Q1, WoS, Scopus).
 4. Davoodi, S. Determination of bubble point pressure & oil formation volume factor of crude oils applying multiple hidden layers extreme learning machine algorithms / S. Rashidi, M. Mehrad, H. Ghorbani, D.A. Wood, N. Mohamadian, J. Moghadasi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 202. – P. 108425. (Q1, WoS, Scopus).
 5. Davoodi, S. Robust hybrid machine learning algorithms for gas flow rates prediction through wellhead chokes in gas condensate fields / A.R. Abad, H. Ghorbani, N. Mohamadian, S. Davoodi, M. Mehrad, S.K. Aghdam, H.R. Nasriani // *Fuel*. – 2022. – Vol. 308. – P. 121872. (Q1, WoS, Scopus).
 6. Davoodi, S. Hybrid machine learning algorithms to predict condensate viscosity in the near wellbore regions of gas condensate reservoirs / A.R. Behesht Abad, S. Mousavi, N. Mohamadian, D.A. Wood, H. Ghorbani, S. Davoodi, M.A. Alvar, K. Shahbazi // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 95. – P. 104210. (Q1, WoS, Scopus).
 7. Davoodi, S. Prediction of permeability of highly heterogeneous hydrocarbon reservoir from conventional petrophysical logs using optimized data-driven algorithms / A. Sheykhinasab, A.A. Mohseni, A. Barahooie Bahari, E. Naruei, Davoodi, S., A. Aghaz, M. Mehrad // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2023. – Vol. 13. – P. 66-689. (Q1, WoS, Scopus).

8. Davoodi, S. Predicting Formation Pore-Pressure from Well-Log Data with Hybrid Machine-Learning Optimization Algorithms / M. Farsi, N. Mohamadian, H. Ghorbani, D.A. Wood, S. Davoodi, J. Moghadasi, M. Ahmadi Alvar // Natural Resources Research. – 2021. – Vol. 30. – P. 3455-3481. (Q1, WoS, Scopus).
9. Davoodi, S. A geomechanical approach to casing collapse prediction in oil and gas wells aided by machine learning / N. Mohamadian, H. Ghorbani, D.A. Wood, M. Mehrad, S. Davoodi, S. Rashidi, A. Soleimanian, A.K. Shahvand // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 196. – P. 107811. (Q1, WoS, Scopus).
10. Davoodi, S. Accurate determination of shear wave velocity using LSSVM-GA algorithm based on petrophysical log / H. Ghorbani, A. Davarpanah, S. Davoodi // Conference Proceedings, Third EAGE Eastern Mediterranean Workshop, 1-3 December 2021, Larnaca, Cyprus, – Vol. 201, – P. 1-3. (Scopus).
11. Davoodi, S. Application of an eco-friendly green additive for drilling fluids / S. Davoodi, M. Al-Shargabi, M.K. Minaev // Труды XXVI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», 4-8 апреля 2022 г., г. Томск. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2022. – Т. 2. – С. 341-344.
12. Davoodi, S. Application Machine-Learning Predictions Co2 Solubility and Residual Trapping Indexes / S. Davoodi, M. Al-Shargabi // Труды XXVII Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», 3-7 апреля 2023 г., г. Томск. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2023. – Т. 2. – С. 95-96.

Свидетельства о государственной регистрации

1. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022685136 (RU); Заявка № 2022684195 от 05.12.2022, дата рег. 21.12.2022; Бюл. № 1 // Давуди Шадфар. Программа для расчета фильтрационных свойств бурового раствора на основе гибридной модели машинного обучения MELM-COA.

2. Заявка № 2022685740 от 16.12.2022, дата рег. 17.01.2023; Бюл. № 1 // Давуди Шадфар. Программа для расчета пластической вязкости бурового раствора на основе гибридной модели машинного обучения MELM-COA.
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023610692 (RU); Заявка № 2022685760 от 16.12.2022, дата рег. 12.01.2023; Бюл. № 1 // Давуди Шадфар. Программа для расчета динамического напряжения сдвига бурового раствора на основе модели машинного обучения MELM-COA.

В диссертационной работе соблюдены установленные Положением о присуждении ученых степеней критерии, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В диссертации «Гибридная интеллектуальная система для оперативного определения свойств бурового раствора на основе машинного обучения» отсутствует заимствованный материал без ссылок на авторов и источники заимствования.

Проверка диссертационной работы системой «Антиплагиат ВУЗ» показала, что оригинальный текст в документе составляет 83,34%, цитирования 7,52%, оставшиеся 9,14% содержатся более чем в 130 источниках, что соответствует требованиям оригинальности, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертационная работа является самостоятельно выполненной законченной научно-исследовательской работой.

Диссертация «Гибридная интеллектуальная система для оперативного определения свойств бурового раствора на основе машинного обучения» Давуди Шадфара рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Заключение принято на научном семинаре Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов федерального государственного автономного образовательного

учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 11 человек, в том числе 2 доктора наук и 9 кандидатов наук. Результаты голосования: «ЗА» - 11 чел., «ПРОТИВ» - нет, «ВОЗДЕРЖАЛСЯ» - нет, протокол № 1 от «16» ноября 2023 г.

Председатель научного семинара
Белозеров Владимир Борисович,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией ЛГ ЦППС НД ИШПР
ТПУ, профессор ОНД ИШПР ТПУ



подпись

Секретарь научного семинара,
Еремян Грачик Араикович,
кандидат технических наук,
инженер, ЦППС НД ИШПР НИ ТПУ



подпись