

Системный анализ значений извлекаемых запасов нефти путем вероятностного прогнозирования с применением интегральных характеристик вытеснения

Сергей Иванович Грачев¹,
Владислав Сергеевич Шумко^{1, 2✉},
Елена Ивановна Мамчистова¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

✉ E-mail для переписки: vlad-to72@mail.ru

Аннотация. Известно, что на основных стадиях разработки месторождений углеводородного сырья необходимо оперативное регулирование добычи нефти путем применения математических инструментов, основанных на физических принципах их разработки. Они позволяют принимать управленческие решения с требуемой точностью результата. С этим связано применение аналитических и упрощённых численных моделей. Характеристики вытеснения нефти водой являются быстрым способом оценки эффективности технологии заводнения, который экономит время и финансовые затраты, необходимые для построения гидродинамической модели. Применение вероятностного прогнозирования с помощью интегральных кривых обводнения компенсирует недостатки классического метода характеристик вытеснения за счет возможности прогноза с использованием строго утвержденных критериев фильтрации неправдоподобных экстраполированных значений, что позволяет получать оптимальный результат при одинаковых входных данных.

В статье обобщаются отечественные методики применения характеристик вытеснения на основе вероятностного подхода, сравниваются критерии отбора неправдоподобных прогнозных значений, анализируются типы функций распределения экстраполированных извлекаемых запасов нефти, рассчитанные по квантилям вероятностей P50. Описан алгоритм оценки запасов данным способом. Исследования проведены на основе данных пятидесяти объектов разработки.

В результате исследований установлено, что отсутствует необходимость выбора прогнозного значения извлекаемых запасов в зависимости от типа функции распределения запасов нефти. Рекомендуется использовать не менее четырех кривых обводнения при использовании вероятностного подхода. На месторождениях с низкой или быстрорастущей обводненностью следует осуществлять прогноз на основе месячных или квартальных данных.

Ключевые слова: интегральные характеристики вытеснения нефти водой; вероятностный подход; извлекаемые запасы нефти; прогноз; программа; функция распределения.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (договор №896ГССС15-L/81021 от 14.12.2022).

Цитирование: Грачёв С. И., Шумко В. С., Мамчистова Е. И. 2025. Системный анализ значений извлекаемых запасов нефти путем вероятностного прогнозирования с применением интегральных характеристик вытеснения // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. нефть, газ, энергетика. Том 11. № 1 (41). С. 144–157. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-1-144-157>

Поступила 21.01.2025; одобрена 19.04.2025; принята 21.04.2025

Statistical analysis of forecast values of recoverable oil reserves in probabilistic forecasting using integral displacement characteristics

Sergey I. Grachev¹,
Vladislav S. Shumko^{1, 2}✉,
Elena I. Mamchistova¹

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² University of Tyumen, Tyumen, Russia

✉ Corresponding author: vlad-to72@mail.ru

Abstract. It is known that at the main stages of the development of hydrocarbon deposits, it is necessary to promptly regulate oil production by using mathematical tools based on the physical principles of their development. They allow you to make management decisions with the required accuracy of the result. This

is related to the use of analytical and simplified numerical models. The oil displacement characteristics evaluate the effectiveness of the flooding technology. Their use avoids the huge waste of time and financial resources that must be allocated to the process of three-dimensional hydrodynamic modeling. The proposed results of applying probable forecasting using integral curves of flooding compensate for the disadvantages of using displacement characteristics and the possibility of forecasting using strictly approved criteria for filtering improbable extrapolated values, which allows you to get the optimal result when the same input data.

The article provides a brief overview of domestic methods using displacement characteristics based on a probabilistic approach, comparing criteria for selecting improbable forecast values, analyzing the types of distribution functions for predicting recoverable oil reserves using integral displacement characteristics using a probabilistic methodology based on data from fifty development sites. An algorithm for estimating reserves in this way is described.

As a result of the research, it was found that there is no need to choose the forecast value of recoverable reserves depending on the type of oil reserves distribution function. It is not recommended to use a single watering curve and make a forecast based on monthly quarterly data.

Key words: integral characteristics of oil displacement by water; probabilistic approach; recoverable oil reserves; forecast; program; distribution function.

Acknowledgments: the research is being carried out with the financial support of the Innovation Promotion Fund (contract No. 896GSSS15-L/81021 dated 12/14/2022).

Citation: Grachev, S. I., Shumko, V. S., & Mamchistova, E. I. (2025). Statistical analysis of forecast values of recoverable oil reserves in probabilistic forecasting using integral displacement characteristics. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 11(1), 144-157. <https://doi.org/10.21684/j2411-7978-2025-11-1-144-157>

Received Jan. 21, 2025; Reviewed Apr. 19, 2025; Accepted Apr. 21, 2025

Введение

Характеристики вытеснения нефти водой позволяют быстро и корректно спрогнозировать извлекаемые запасы нефти и другие параметры разработки месторождений [Мищенко, 2022]. Они зарекомендовали себя в качестве альтернативы расчетов на основе полномасштабных трехмерных геологических и гидродинамических моделях в условиях недостаточной промысловой информации и необходимости проведения оперативной оценки основных показателей разработки месторождений нефти [Гавура и др., 2017]. Метод основывается на анализе исторических данных о накопленной или текущей

добыче нефти, жидкости, воды и других показателей, на основе которых строится функциональная зависимость [Наливкин, 1981; Darwis, 2009; Paryani, 2018]. Высокая скорость получения прогнозного результата связана с простотой метода характеристик вытеснения, так как учитывается исключительно историческая динамика добычи флюида без фильтрационных свойств и геологических показателей. [Соколов, 2014а, 2016б].

Традиционный подход имеет ряд недостатков:

- невысокая прогностическая способность на ранних стадиях разработки месторождений;
- отсутствие универсальных объективных критериев выбора качественных характеристик вытеснения;
- использование разного числа точек на интервале аппроксимации;
- использование различных типов исторических данных динамики параметров (по годам/ по месяцам).

Вероятностному методу прогноза запасов нефти не свойственны перечисленные слабые стороны классического применения характеристик вытеснения. Оценка извлекаемых запасов дает более точные результаты с использованием вероятностного подхода при обводненности менее 90% [Харисов, 2018а, б; Шумко, 2020].

В разработанных программах для прогноза извлекаемых запасов и других основных показателей разработки используются исключительно интегральные характеристики вытеснения нефти водой. Накопленные показатели менее чувствительны к кратковременным колебаниям и шуму в данных. [Spivey, 1992; Казаков, 2003а, 2020б; Назаренко, 2020а, 2021б;].

Методы

В Российской Федерации предлагаемый вероятностный способ прогноза запасов активно описывают в научных статьях с 2016-ого года разные отечественные специалисты [Ручкин, 2016а, б; Ханипов, 2016]. В разработанных алгоритмах наблюдаются различия, особенно касающихся количества используемых интегральных кривых обводнения и критериев фильтрации неправдоподобных экстраполированных показателей. На первом этапе осуществляется прогноз вовлеченных в разработку запасов нефти по каждой кривой обводнения из набора с учетом всех фактических значений, начиная с определенной обводненности (от 15 до 25%). Стартовый интервал настройки задачи сокращается до трех значений на правой границе. Затем реализуется процесс фильтрации неправдоподобных экстраполированных показателей. Авторы статьи [Ручкин, 2016] применяют критерий кратности запасов: удаляются спрогнозированные вовлеченные в разработку запасы нефти с кратностью остаточных извлекаемых запасов менее 2 лет и более 20 лет. Специалисты из ТатНИПИнефть в своих исследованиях [Ханипов, 2016] отсеивают экстраполированные неправдоподобные результаты по альтернативному критерию двух сигм, осуществляют прогнозирование с применением исключительно одной интегральной кривой обводнения Камбарова, а исторические показатели дина-

мики добычи флюида рассматривают в формате по месяцам. На заключительном этапе анализируется функция распределения и функция плотности распределения отфильтрованных вовлеченных в разработку запасов.

Как правило, утверждаются вовлеченные в разработку показатели по квантилю P50 [Ручкин, 2016]. Однако авторы статьи [Ханипов, 2016] анализируют тип функции распределения и другими статистическими показателями для выбора экстраполированных значений.

На рисунке 1 изображены фактические показатели динамики одного из рассматриваемого объекта разработки. В данном случае объектом исследования является один из пластов крупного месторождения, находящегося в Западной Сибири. Стартовая минимальная среднегодовая обводненность для начала расчета: 40%, предельная среднегодовая обводненность для окончания расчета: 98%, фактическая обводненность в последней исторической точке: 94%, количество кривых обводнения: 6 шт., основные входные данные: годовые показатели динамики добычи нефти и жидкости, критерии фильтрации неправдоподобных значений: кратность запасов (менее 3 лет и больше 25 лет).

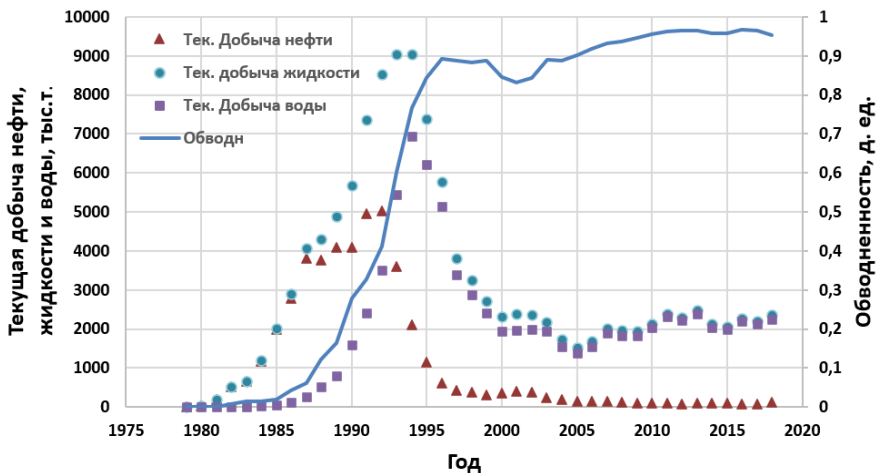


Рис. 1. Фактические показатели текущей динамики добычи жидкости, воды, нефти в поверхностных условиях, обводненность

Fig. 1. Actual indicators of the current dynamics of liquid, water, and oil production in surface conditions, water cut

На рисунках 2 и 3 продемонстрирован пример спрогнозированных потенциальных извлекаемых запасов нефти с помощью разработанной программы. Прогнозные запасы: 46446,9 тыс. т. по квантилю P50, значения по квантилям P10 и P90: 45792,2 тыс. т. и 47498,3 тыс. т. соответственно. Остаточные извлекаемые запасы по квантилям P10, P50, P90 равны 940,1 тыс. т., 1594 тыс. т., 2646 тыс. т. соответственно.

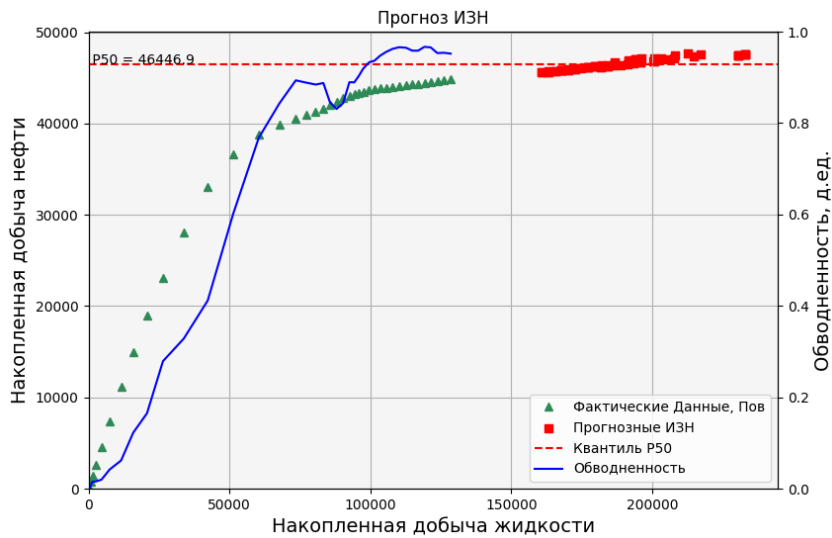


Рис. 2. Фактические показатели накопленной динамики добычи нефти в поверхностных условиях, прогнозные значения извлекаемых запасов нефти, квантиль P50

Fig. 2. Actual indicators of accumulated dynamics of oil production in surface conditions, forecast values of recoverable oil reserves, P50 quantile

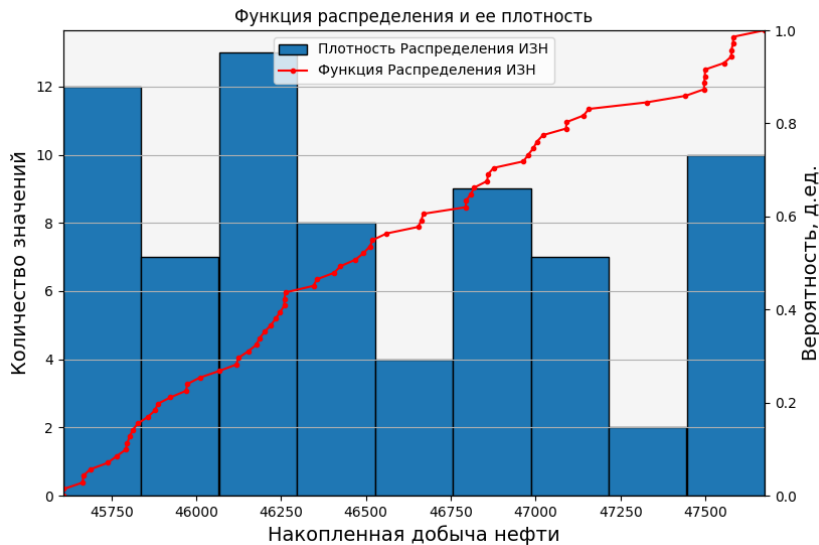


Рис. 3. Плотность распределения и функция распределения прогнозных значений извлекаемых запасов нефти

Fig. 3. Distribution density and distribution function of forecast values of recoverable oil reserves

В таблице 1 расположен список используемых интегральных кривых обводнения, которые использовались в собственных исследованиях. Обозначения: Q_n , $Q_{ж}$ — накопленная добыча нефти, жидкости; A , B , C — параметры аппроксимации. Выбор конкретных характеристик вытеснения объясняется удобством с точки зрения программирования, так как задействованные модели вытеснения уже приведены к виду $f(Q_n) = f(Q_{ж})$.

Таблица 1. Используемые функциональные зависимости
Table 1. Applicable functional dependencies

Название характеристики вытеснения	Формула
Арпс	$Q_n = \frac{1}{B} * \ln(1 + B * \exp(A) * Q_{ж})$
Сазонов	$Q_n = A + B * \ln(Q_{ж})$
Камбаров	$Q_n = A + \frac{B}{Q_{ж}}$
Пирвердян	$Q_n = A + \frac{B}{\sqrt{Q_{ж}}}$
Ревенко	$Q_n = A + B * Q_{ж}^C$
Гусейнов (Модификация зависимости Сипачева-Пасевича)	$Q_n = \frac{A * Q_{ж}}{Q_{ж} + B}$

Результаты и обсуждение

Из-за существенных расхождений в методиках прогнозирования у разных авторов было принято решение о проведении исследований с целью выявления качественных критериев отбора недостоверных прогнозных значений запасов нефти. В текущих исследованиях особое внимание уделено анализу функций распределения экстраполированных значений извлекаемых запасов нефти.

Исследования проводились на основе данных пятидесяти объектов. Объектами разработки являются пласты крупных месторождений Западной Сибири, а также месторождения в целом. Минимальные извлекаемые запасы нефти на одном из объектов составляют 198,8 тыс. т, а максимальные 78894,3 тыс. т. На 42 объектах из 50 исторический уровень обводненности превышает предельное значение 98%. Вовлеченные в разработку запасы нефти прогнозировались без учета поздних показателей динамики добычи углеводородного сырья: не анализировалась история при среднегодовой обводненности более 60–70%.

Статистический анализ проведен при разном количестве интегральных функций: 1, 6 штук. Извлекаемые запасы нефти и другие технологические и технико-экономические показатели разработки месторождений экстраполировались как на основе данных

по месяцам, так и по годам. Входные показатели анализировались по годам и по месяцам в одинаковом соотношении: двадцать пять объектов по годам, двадцать пять объектов по месяцам. Результаты по точности прогноза продемонстрированы в таблице 2. Величина отклонений берется по модулю.

Таблица 2. Средние отклонения в зависимости от используемого количества функциональных зависимостей

Table 2. Average deviations depending on the number of functional dependencies

Кол-во ХВ	Среднее отклонение при прогнозировании всех данных, %	Среднее отклонение при прогнозировании данных по годам, %	Среднее отклонение при прогнозировании данных по месяцам, %	Минимальное отклонение, %	Максимальное отклонение, %
1 ХВ	25,17	24,46	25,88	0,09	51,52
6 ХВ	12,42	12,81	12,04	0,08	31,49

Среднее отклонение практически не зависит от типа данных. Однако при использовании входных параметров по годам прогнозируемые извлекаемые запасы не попали в интервал квантилей P10-P90 на десяти объектах из двадцати пяти. Экстраполяция данных по годам показала правдоподобный результат: четыре прогнозных показателя из двадцати пяти не оказались на отрезке между квантилями P10-P90. В среднем прогнозные показатели должны находиться в данном интервале в 80% случаев. Слабая точность попадания в интервал при экстраполяции данных по годам объясняется малым расстоянием между значениями P10 и P90, которое является таким из-за меньшего объема входных данных. Подробный сравнительный анализ точности вероятностного прогнозирования с использованием разного количества кривых обводнения в зависимости от стадии разработки (обводненности в конце интервала аппроксимации) при базовом варианте разработки описан в статье [Шумко, 2021].

Прогноз с применением одной кривой обводнения осуществлялся с помощью функциональных зависимостей Арпса или Гусейнова. При использовании одной интегральной кривой обводнения большая часть выборок прогнозных значений запасов нефти соответствовала степенному и экспоненциальному закону распределения. Полный список подбираемых законов распределения расположен в таблице 3 и на рисунке 4. В ходе исследований был получен следующий вывод: нет смысла анализировать подходящий тип функции распределения при отборе прогнозных запасов. Корреляция между типом закона распределения и точностью прогноза не была выявлена.

При прогнозировании извлекаемых запасов нефти с использованием шести кривых обводнения законы распределения являлись мультимодальными. Количество “пиков”, как правило, соответствовало количеству характеристик вытеснения. Одним из лучших способов анализа подобных распределений является их разбиение на группы, т.е. на данные, соответствующие каждой функциональной зависимости.

Таблица 3. Количество и доля законов распределения, соответствующих прогнозным значениям извлекаемых запасов нефти

Table 3. The number and proportion of distribution laws corresponding to the forecast values of recoverable oil reserves

Распределение	Количество, шт.	Отношение, %
Степенное (Power)	22	44
Экспоненциальное (Exponential)	11	22
Экспоненциально-степенное (Exponential power)	6	12
Равномерное (Uniform)	6	12
Нормальное (Normal)	3	6
Логнормальное (Log-normal)	2	4
Фон Мизеса (Von Mises)	0	0

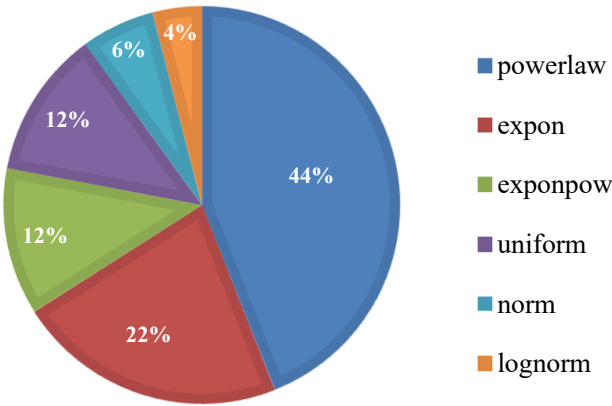


Рис. 4. Диаграмма: доля законов распределения, соответствующих прогнозным значениям извлекаемых запасов нефти

Fig. 4. Diagram: Proportion of distribution laws corresponding to the forecast values of recoverable oil reserves

Неправдоподобные прогнозные значения извлекаемых запасов нефти отсеивались при кратности запасов менее 3 лет и более 25 лет.

Научные исследования проведены при использовании разработанных программ, написанных на языке программирования Python 3.8. Основные используемые библиотеки: numpy, pandas, scipy, fitter, matplotlib, PyQt5, dearpygui.

Fitter — это библиотека для Python, предназначенная для подгонки распределений вероятностей к данным. Для определения наилучшего распределения, которое соответствует заданному набору данных, используются различные критерии (Байесовский информационный критерий, информационный критерий Акаике, сумма квадратов

ошибок и др.). Результаты собственных исследований были получены с применением суммы квадратов ошибок (sumsquare error).

Исходя из результатов, полученных в ранних исследованиях, рекомендуется использовать не менее четырех функциональных зависимостей. Количество характеристик вытеснения рекомендуется увеличивать при использовании данных по годам, а также при оценке запасов на объектах с невысокой обводненностью [Шумко, 2022].

Заключение

Системный анализ результатов вероятностного прогнозирования с применением интегральных кривых обводнения выявил, что точность прогноза выше при большем количестве характеристик вытеснения, а результат не будет отличаться при использовании одинакового алгоритма и входных данных у разных пользователей программного продукта, в котором реализован алгоритм. Поэтому не рекомендуется применять менее четырех функциональных зависимостей. Средняя точность прогноза не зависит от типа данных, если за потенциальные извлекаемые запасы нефти принимать значение квантиля P50: можно использовать как годовые показатели дебитов нефти, воды, жидкости, так и, месячные/квартальные. Однако предпочтительнее осуществлять экстраполяцию данных по месяцам/кварталам, так как прогнозное значение извлекаемых запасов реже вылетает за пределы квантиля P10 и квантиля P90.

Результаты выполненных исследований выявили, что нет необходимости обращать внимание на тип функции распределения выборки извлекаемых запасов нефти при любом количестве используемых характеристик вытеснения. В качестве прогнозных запасов нефти было принято решение брать значение квантиля P50 после отсеивания по критерию кратности извлекаемых запасов.

Из-за результатов, полученных в ходе данного исследования, в перспективе рассматривается поиск дополнительных критериев фильтрации неправдоподобных экстраполированных показателей для увеличения точности прогнозирования особенно на проблемных объектах, на которых отклонение от фактических показателей извлекаемых запасов составило почти 30 %.

Список источников

- Гавура А. В. и др. 2017. Инженерный анализ разработки месторождений: Учебное пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. 131 с.
- Казаков А. А. 2003. Методическое обеспечение единых подходов оценки эффективности методов ПНП // Технологии топливно-энергетического комплекса. № 2. С. 47–53.
- Казаков А.А. 2020. Методы характеристик вытеснения нефти водой. М.: ООО “Издательский дом Недра”. 276 с.
- Мищенко К. П, Тихомирова Е. А. 2022. Оценка прогнозной способности характеристик вытеснения нефти для оперативного анализа показателей разработки месторождения // Международный научно-исследовательский журнал. № 6 (120). С. 158-163. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.023>

- Назаренко М. Ю., Золотухин А. Б. 2020. Применение машинного обучения для вероятностного прогнозирования добычи и расчета потенциальных извлекаемых запасов нефти // Нефтяное хозяйство. № 9. С. 109–113. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-109-113>
- Назаренко М. Ю., Золотухин А. Б. 2021. Применение методов машинного обучения для вероятностного прогнозирования добычи. М.: ООО “Издательский дом Недра”. 125 с.
- Наливкин В. Д., Белонин М. Д., Лазарев В. С., Сверчков Г. П. 1981. Методология прогноза запасов нефти и газа: достижения и перспективы // Энергия и топливо. № 3. С. 96–101.
- Ручкин А. А., Гусева Д. Н. 2016. Новый подход к оценке извлекаемых запасов по характеристикам вытеснения // Нефтепромысловое дело. № 1. С. 43–47.
- Ручкин А. А., Левагин С. А. 2016. Вероятностный прогноз извлекаемых запасов по характеристикам вытеснения // Материалы международной научно-технической конференции. (14–18 ноября 2016 г. Ханты-Мансийск, Россия). С. 393–401.
- Соколов С. В. 2014. Модификация характеристик вытеснения для краткосрочного прогноза добычи нефти и оценки эффекта от реализации программы геолого-технических мероприятий // Материалы международной научно-технической конференции. (17–21 ноября 2014 г. Ханты-Мансийск, Россия). С. 284–288.
- Соколов С. В. 2016. Математическая модель прогнозирования базовой добычи нефти с учетом неопределенностей на основе метода характеристик вытеснения // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 2. № 1. С. 82–91. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91>
- Ханипов М. Н., Насыбуллин А. В., Саттаров Р. З. 2016. Вероятностная оценка вовлеченных в разработку запасов нефти на основе характеристик вытеснения с применением статистических методов // Нефтяное хозяйство. № 1. С. 37–39. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-37-39>
- Харисов М. Н., Карпов А. А., Петров С. В., Дарий С. Д. 2018. Алгоритм определения оптимальных характеристик вытеснения // Нефтяное хозяйство. №5. С. 56–59. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-56-59>
- Харисов М. Н., Харисова Э. А., Юнусова Э. А., Майский Р. А. 2018. Алгоритм определения характеристик вытеснения в условиях несовершенства данных. // Нефтегазовое дело. Том. 16. № 6. С. 20–25. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-6-20-25>
- Шумко В. С., Мамчистова Е. И. 2020. Применение вероятностного подхода для оценки потенциально извлекаемых запасов // Материалы национально науч.-техн. конференции. (7 декабря 2020 г., Тюмень, Россия). С. 144–147.
- Шумко В. С., Мамчистова Е. И., Кузовлев С.С. 2021. Оценка извлекаемых запасов нефти с применением интегральных характеристик вытеснения на основе вероятностной методики // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 2. С. 78–88. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-78-88>
- Шумко В. С., Мамчистова Е. И., Колев Ж. М., Грачева С. К. 2022. Алгоритмизация прогноза извлекаемых запасов нефти с использованием вероятностной методики на основе характеристик вытеснения // Естественные и технические науки. № 3. С. 113–116.
- Darwis S., Ruchjana B. N., Permadi A. K. 2009. Robust decline curve analysis // Journal of the Indonesian Mathematical Society. Vol. 15, Issue 2. P. 105–111.

- Paryani M., Ahmadi M., Awoleke O., Hanks C. 2018. Decline curve analysis: a comparative study of proposed models using improved residual functions // *Journal of petroleum & environmental biotechnology*. Vol. 9, Issue 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000362>
- Spivey J. P., Gatens J. M., Semmelbeck, M. E., Lee W. J. 1992. Integral Type Curves for Advanced Decline Curve Analysis // *SPE Mid-Continent Gas Symposium*, 13–14 April. Amarillo, Texas. P. 91-100.

References

- Gavura A.V. et al. (2017). *Engineering analysis of field development: Textbook*. Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU). [In Russian]
- Kazakov A. A. (2003). Methodological support for unified approaches to evaluating the effectiveness of PNP methods // *Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa*. (2), 47–53. [In Russian]
- Kazakov A. A. (2020). *Methods of characteristics of oil displacement by water*. Nedra. [In Russian]
- Mishchenko K. P. & Tikhomirova E. A. (2022). Assessment of the predictive ability of oil displacement characteristics for operational analysis of field development indicators // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 6, 158-163. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.023>
- Nazarenko M. Yu. & Zolotukhin A. B. (2020). Application of machine learning for probabilistic forecasting of production and calculation of potential recoverable oil reserves // *Neftyanoe hozyajstvo*. (9), 109–113. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-109-113>
- Nazarenko M. Yu. & Zolotukhin A. B. (2021). Application of machine learning methods for probabilistic production forecasting. Nedra [In Russian]
- Nalivkin V. D., Belonin M. D., Lazarev V. S. & Sverchkov G. P. (1981). Methodology for forecasting oil and gas reserves: achievements and prospects // *Energiya i toplivo*. (3), 96–101. [In Russian]
- Ruchkin A. A. & Guseva D. N. (2016). A new approach to estimating recoverable reserves based on displacement characteristics // *Neftepromyslovoe delo*. (1), 43-47. [In Russian]
- Ruchkin A. A. & Levagin S. A. (2016). Probabilistic forecast of recoverable reserves based on displacement characteristics // *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. (pp. 393-401). Khanty-Mansiysk. [In Russian]
- Sokolov S. V. (2014). Modification of displacement characteristics for the short-term forecast of oil production and assessment of the effect of the implementation of the program of geological and technical measures // *Materials of the International scientific and technical conference*. (pp. 284-288). Khanty-Mansiysk. [In Russian]
- Sokolov S. V. (2016). A mathematical model for predicting basic oil production, taking into account uncertainties based on the method of displacement characteristics // *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*. 2(1), 82-91. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91>
- Khanipov M. N., Nasybullin A.V. & Sattarov R. Z. (2016). Probabilistic assessment of oil reserves involved in the development based on displacement characteristics using statistical

- methods // *Neftyanoe hozyajstvo*. (1), 37-39. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-37-39>
- Kharisov M. N., Karpov A. A., Petrov S. V. & Darius S. D. (2018). An algorithm for determining the optimal displacement characteristics // *Neftyanoe hozyajstvo*. (5), 56-59. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-56-59>
- Kharisov M. N., Kharisova E. A., Yunusova E. A. & Maisky R. A. (2018) Algorithm for determining displacement characteristics in conditions of data imperfection. // *Neftegazovoe delo*. 16(6), 20-25. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-6-20-25>
- Shumko V. S. & Mamchistova E. I. (2020). The use of a probabilistic approach to assess potentially recoverable reserves // *Materials of National Science and Technology. conferences*. (pp. 144-147). Tyumen Industrial University. [In Russian]
- Shumko V. S., Mamchistova E. I. & Kuzovlev S.S. (2021). Estimation of recoverable oil reserves using integral displacement characteristics based on probabilistic methodology // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Neft' i gaz*. (2), 78-88. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-78-88>
- Shumko V. S., Mamchistova E. I., Kolev J. M. & Gracheva S. K. (2022). Algorithmization of the forecast of recoverable oil reserves using a probabilistic technique based on displacement characteristics // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. (3), 113–116. [In Russian]
- Darwis S., Ruchjana B. N. & Permadi A. K. (2009). Robust decline curve analysis. *Journal of the Indonesian Mathematical Society*. 15(2), 105–111. [In English]
- Paryani M., Ahmadi M., Awoleke O. & Hanks C. (2018). Decline curve analysis: a comparative study of proposed models using improved residual functions. *Journal of petroleum & environmental biotechnology*. 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000362>
- Spivey J. P., Gatens J. M., Semmelbeck, M. E. & Lee W. J. (1992). SPE Mid-Continent Gas Symposium, 13–14 April, 1992. Amarillo, Texas. (pp. 91-100) [In English]

Информация об авторах

Сергей Иванович Грачев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки нефтяных и газовых месторождений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
grachevsi@tyuiu.ru

Владислав Сергеевич Шумко, аспирант, ассистент-стажер, кафедра фундаментальной математики и механики, Тюменский государственный университет, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Тюменский Индустриальный Университет, Тюмень, Россия
vlad-to72@mail.ru

Елена Ивановна Мамчистова, кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
mamchistovaei@tyuiu.ru

Information about the authors

Sergey I. Grachev, doctor of technical sciences, professor, head of the department of Oil and Gas Field Development, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
grachevsi@tyuiu.ru

Vladislav S. Shumko, Postgraduate Student, assistant, Department of Fundamental Mathematics and Mechanics, University of Tyumen, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
vlad-to72@mail.ru

Elena I. Mamchistova, Cand Sci (Tech.), Associate Professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
mamchistovaei@tyuiu.ru