

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2026.1.132-145>

EDN YSUOER

УДК 622.276.1/4.001:519.2

**Прогноз динамики добычи нефти на основе вероятностного
подхода с использованием интегральных характеристик
вытеснения нефти водой**

Шумко В.С.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Forecast of oil production dynamics based on a probabilistic
approach using integral characteristics of oil displacement
by water**

V.S. Shumko

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

E-mail: vlad-to72@mail.ru

Аннотация. Модель характеристик вытеснения нефти водой является быстрым и эффективным способом оценки остаточных извлекаемых запасов. Использование данного метода экономит большое количество времени, а также финансовые затраты, которые необходимы для построения гидродинамической модели. Текущие исследования затрагивают применение вероятностного прогнозирования с помощью интегральных кривых обводнения. Предлагаемый способ оценки запасов нефти и других показателей обладает достоинствами традиционного применения характеристик вытеснения, а также предоставляет возможность осуществлять прогноз с использованием строго утвержденных критериев фильтрации неправдоподобных экстраполированных значений, что позволяет разным инженерам получать одинаковый результат при одинаковых входных данных и более рационально использовать время на его анализ.

В статье приводится краткий обзор отечественных методик прогнозирования величины извлекаемых запасов нефти с применением характеристик вытеснения на основе вероятностного подхода. Основное внимание уделено проблемам, связанным с достоверностью экстраполированного результата. Рассмотрен способ прогнозирования динамики добычи нефти с использованием вероятностного подхода на основе интегральных характеристик вытеснения.

В ходе текущих исследований установлено, что необходимо учитывать расхождение между последним историческим значением динамики добычи нефти и первым экстраполированным показателем. Кроме критерия сходимости в последней исторической точке необходимо следить за значением кратности извлекаемых запасов нефти: если экстраполированные извлекаемые запасы нефти не лежат в принятом диапазоне кратности остаточных извлекаемых запасов, следует устранить неправдоподобные показатели.

Ключевые слова: интегральные характеристики вытеснения нефти водой, кривые обводнения, вероятностный подход, прогноз, программа, динамика добычи нефти

Для цитирования: Шумко В.С. Прогноз динамики добычи нефти на основе вероятностного подхода с использованием интегральных характеристик вытеснения нефти водой // Нефтяная провинция.- 2026.-№1(45).-С. 132-145. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.1.132-145>. - EDN YSUOER

Abstract. The model of oil displacement characteristics by water is a fast and effective way to estimate the remaining recoverable reserves. Using this method saves a lot of time, as well as financial costs that are necessary to build a hydrodynamic model. Current research concerns the application of probabilistic forecasting using integral irrigation curves. The proposed method for estimating oil reserves and other indicators has the advantages of the traditional use of displacement characteristics and also provides an opportunity to make a forecast using strictly approved criteria for filtering non-physical extrapolated values, which allows different engineers to obtain the same result with the same input data and use time for its analysis more efficiently.

The article provides a brief overview of domestic methods for predicting the value of recoverable oil reserves using displacement characteristics based on a probabilistic approach. The main attention is paid to the problems related to the reliability of the extrapolated result. A method for predicting the dynamics of oil production using a probabilistic approach based on integral displacement characteristics is considered.

In the course of current research, it has been established that it is necessary to take into account the discrepancy between the latest historical value of oil production dynamics and the first extrapolated indicator. In addition to the convergence criterion at the last historical point, it is necessary to monitor the value of the multiplicity of recoverable oil reserves: if the extrapolated recoverable oil reserves do not lie within the accepted range of the multiplicity of residual recoverable reserves, implausible indicators should be eliminated.

Key words: integral characteristics of oil displacement by water, water cut curves, probabilistic approach, forecast, program, dynamics of oil production

For citation: V.S. Shumko Prognoz dinamiki doby`chi nefiti na osnove veroyatnostnogo podxoda s ispol`zovaniem integral`ny`x karakteristik vy`tesneniya nefiti vodoj [Forecast of oil production dynamics based on a probabilistic approach using integral characteristics of oil displacement by water]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(45), 2026. pp. 132-145. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.1.132-145>. EDN YSUOER (in Russian)

Введение

Прогнозирование динамики добычи нефти, извлекаемых запасов нефти и других показателей разработки актуально для эффективного планирования, принятия стратегических решений и управления рисками в нефтяной индустрии и энергетическом секторе. Характеристики вытеснения нефти зарекомендовали себя для решения данной задачи из-за скорости и простоты метода. Не нужно тратить много времени и финансовых средств на построение гидродинамической модели. В качестве исходных данных применяется только динамика технологических показателей, а информация о фильтрационных и геологических свойствах объекта не используется [1].

Традиционный подход имеет ряд недостатков: низкая точность при обводненности ниже 60%, отсутствие распространенных объективных критериев отбора характеристик и настроек интервала аппроксимации [2]. Вероятностному методу прогноза запасов нефти не свойственны перечисленные слабые стороны классического применения характеристик вытеснения. Модифицированное использование характеристик вытеснения за счет вероятностного подхода обладает достоинствами традиционного способа и устраняет его основные отрицательные свойства. Оценка извлекаемых запасов дает более точные результаты с использованием вероятностного подхода при обводненности менее 90% [3].

В данной статье рассмотрен алгоритм прогноза динамики добычи нефти, извлекаемых запасов и других основных показателей разработки с использованием вероятностного подхода на основе интегральных характеристик вытеснения. Описывается необходимость использования критерия сходимости между фактическими и экстраполированными показателями в связке с критерием кратности извлекаемых запасов.

Исследования проводились при помощи собственного разработанного комплекса программ. Программный код написан на языке программирования Python 3. Основные используемые библиотеки: numpy, pandas, scipy,

dearpygui. Модули комплекса программ позволяют обработать исходные данные, оценить технологические и технико-экономические показатели как методом характеристик вытеснения, так и вероятностным способом на основе интегральных кривых обводнения. Прогнозирование с использованием характеристик вытеснения в разработанном программном продукте описывалось в ранних исследованиях [4]. В текущих исследованиях приводится алгоритм вероятностного подхода.

В разработанных программных модулях реализованы исключительно интегральные кривые обводнения: они менее чувствительны к изменению режима работы залежи, чем дифференциальные [5, 6, 7, 8, 9].

Под интегральными характеристиками вытеснения подразумевают зависимости, в которых используются накопленные показатели динамики добычи жидкости, нефти и воды, а также их комбинации. В этих функциональных зависимостях не используются:

- текущая (ежемесячная) динамика добычи нефти, жидкости и воды;
- обводненность и нефтесодержание добываемой продукции.

Кривые обводнения – характеристики вытеснения, в которых отсутствует время в явном виде. Они характеризуют процесс обводнения в зависимости от отбираемой добычи жидкости.

Основная часть

Изначально вероятностный подход не использовался для прогноза динамики добычи нефти. Он применялся исключительно для оценки извлекаемых запасов нефти и других основных показателей, которые можно рассчитать для периода окончания разработки месторождения. Далее кратко обзереваются отечественные подходы вероятностного прогнозирования, описанные в исследованиях [10, 11, 12].

Расчет других состоял из следующих этапов:

- Построение кривых обводнения по фактическим данным (желательно по месячным), начиная со стартовой обводненности 40% (или за определенный период времени). Используются характеристики вытеснения из утвержденного набора, а интервал аппроксимации последовательно смещается вправо до четырех последних точек.

– Расчет экстраполированных извлекаемых запасов нефти по всем характеристикам.

– Фильтрация экстраполированных показателей по различным критериям.

– Построение функции распределения спрогнозированных извлекаемых запасов. Расчет извлекаемых запасов нефти по основным квантилям вероятности.

Фильтрация неправдоподобных прогнозных показателей осуществляется посредством разных критериев. Как правило, инженеры применяют следующие подходы или их комбинации:

– Отсеивание с использованием критерия кратности остаточных извлекаемых запасов: убираются прогнозные значения, у которых кратность больше 20 лет и меньше 2 лет.

– Исключение показателей, не входящих в доверительный интервал.

– Анализ типа функции распределения экстраполированных значений.

За действительный прогнозный результат, как правило, принимают значение квантиля P50. Авторы [11] руководствуются типом функции распределения извлекаемых запасов нефти для принятия утверждаемого прогнозного показателя.

Ранние исследования подтверждают преимущество вероятностного подхода в сравнении с традиционным методом характеристик вытеснения в

рамках точности прогнозирования [3]. Особенно заметна разница на объектах разработки с невысокой обводненностью.

В текущих исследованиях предлагается по квантилям вероятности прогнозировать динамику добычи нефти, а не только извлекаемые запасы. В табл. 1 описан вероятностный подход на основе кривых обводнения, который реализован в разработанном комплексе программ.

Таблица 1

Алгоритм вероятностного подхода на основе интегральных кривых обводнения в разработанном комплексе программ

№	Вероятностный метод
1	Анализ исходных данных: подготовка динамики текущей добычи нефти и жидкости по объекту разработки.
2	Обработка входных данных: расчет дополнительных фактических показателей (динамика накопленных величин, обводненность). Перевод параметров в пластовые условия.
3	Опциональное изменение масштаба данных (downscaling).
4	Расчет второстепенных показателей для характеристик вытеснения.
5	Прогноз динамики добычи жидкости.
6	Расчет характеристик вытеснения. Начало интервала аппроксимации с обводненности 40%. Интервал настройки смещается постепенно вправо до предельного количества точек (3 шт.).
7	Расчет экстраполированной накопленной динамики добычи нефти по каждой зависимости с использованием найденных значений параметров аппроксимации и динамики добычи жидкости.
8	Опциональное обратное изменение масштаба данных (upscaling). Обратный перевод показателей из пластовых условий в поверхностные.
9	Расчет извлекаемых запасов нефти при предельной максимальной обводненности по каждой функциональной зависимости.
10	Отсевивание неправдоподобных экстраполированных значений по критериям фильтрации. Расчет динамики добычи нефти по квантилям вероятностей P50 по отобранным кривым обводнения. Формирование динамики добычи по дополнительным квантилям (например, P10 и P90).
11	Расчет извлекаемых запасов нефти и других параметров по функции квантиля P50.

12	Отображение графика с накопленной добычей нефти по квантилю вероятностей P50. Генерация таблиц с различными прогнозными показателями.
----	---

Интегральные кривые обводнения, реализованные в комплексе программ для вероятностного прогнозирования, представлены в табл. 2. Обозначения: Q_n , $Q_{ж}$ – накопленная добыча нефти, жидкости; A , B , C – параметры аппроксимации.

Таблица 2

Список интегральных характеристик вытеснения нефти водой, применяемых в рамках вероятностного прогнозирования

Название характеристики вытеснения	Формула
Дж. Арпс	$Q_n = \frac{1}{B} * \ln(1 + B * \exp(A) * Q_{ж})$
Б. Ф. Сазонов	$Q_n = A + B * \ln(Q_{ж})$
Г. С. Камбаров	$Q_n = A + \frac{B}{Q_{ж}}$
А. М. Пирвердян	$Q_n = A + \frac{B}{\sqrt{Q_{ж}}}$
В. М. Ревенко	$Q_n = A + B * Q_{ж}^C$
Гусейнов (Модификация зависимости Н. В. Сипачева-А. Г. Пасевича)	$Q_n = \frac{A * Q_{ж}}{Q_{ж} + B}$

Результаты выполнения программного расчета демонстрируются на основе одного объекта разработки. Им является пласт крупного месторождения, находящегося в Западной Сибири. Фактическая динамика обводненности, накопленной добычи нефти, жидкости и воды представлена на рис. 1.

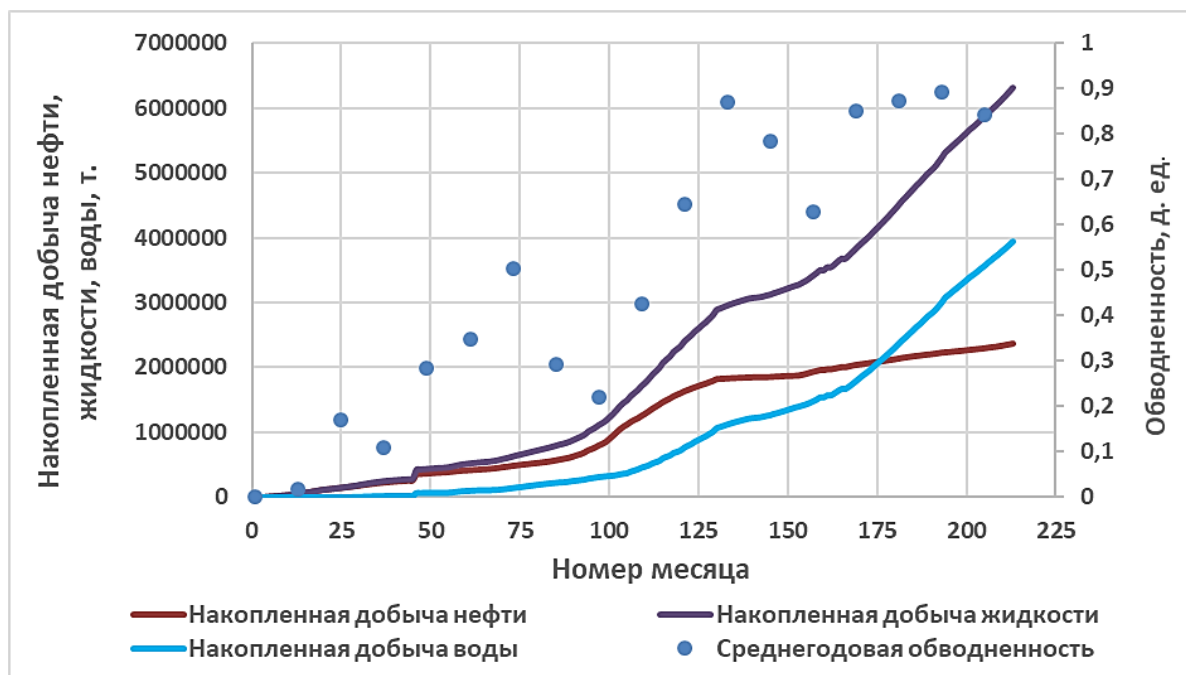


Рис. 1. Историческая динамика показателей на рассматриваемом объекте разработки

Динамика добычи анализировалась в формате по месяцам. Стартовый интервал аппроксимации (при достижении среднегодовой обводненности 40%) состоял из 143 точек. Всего было рассчитано 840 массивов с экстраполированными показателями. Использовались 6 интегральных кривых обводнения из табл. 1. После неправдоподобные показатели отфильтровывались с использованием критерия кратности остаточных извлекаемых запасов нефти и критерия сходимости в последней исторической точке. Устранялись из дальнейшего анализа массивы с динамикой добычи, которой соответствуют экстраполированные извлекаемые запасы нефти, не попавшие в диапазон кратности остаточных извлекаемых запасов от 2 лет до 23 лет, а также, имеющие отклонения больше 0,5% между началом экстраполяцией и концом истории. После фильтрации осталось 280 массивов, по которым рассчитывалась динамика добычи по квантилям вероятности P10, P50 и P90.

На рис. 2 продемонстрирована экстраполированная динамика накопленной добычи нефти относительно накопленной добычи жидкости для рассматриваемого объекта разработки.

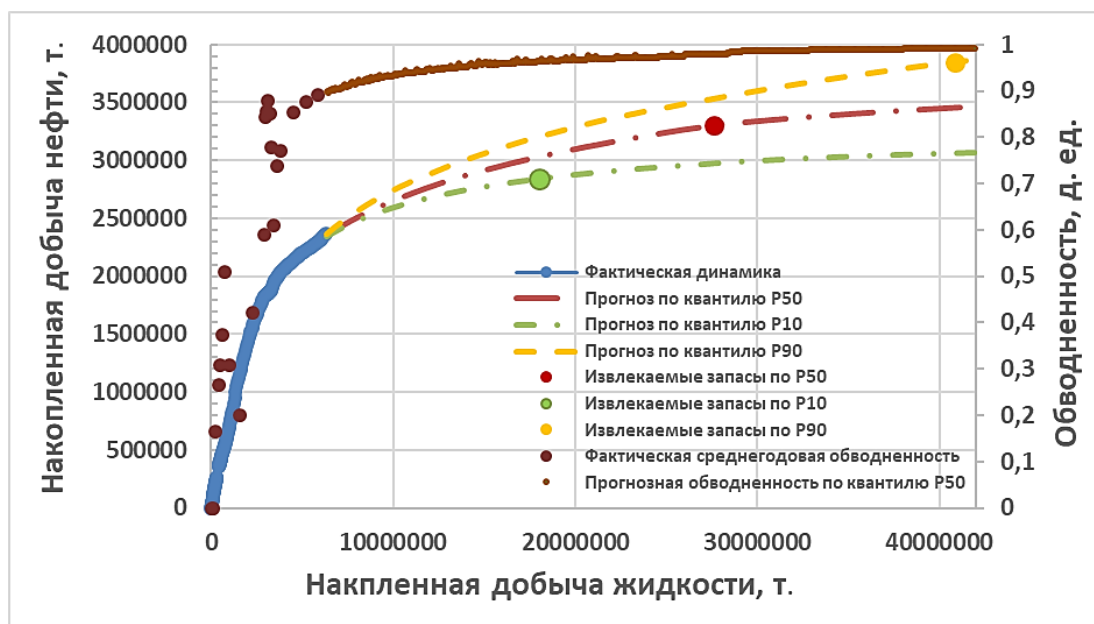


Рис. 2. Прогнозная динамика добычи нефти по квантилям вероятности

За прогнозные извлекаемые запасы нефти принимается величина по квантилю вероятности P50, которая была достигнута при предельной обводненности добываемой продукции (98%). Результаты по квантилям вероятности:

- P10: 2844 тыс. т. нефти;
- P50: 3311 тыс. т. нефти;
- P90: 3846 тыс. т. нефти.

С вероятностью 10% извлекаемые запасы нефти будут меньше отметки 2844 тыс. т., с вероятностью 50% будет достигнута отметка 3311 тыс. т., а с вероятностью 90% не будет превышена отметка в 3846 тыс. т.

В вероятностных подходах, которые используются исключительно для оценки извлекаемых запасов и других производных показателей разработки без учета динамики добычи, анализируется исключительно генераль-

ная совокупность экстраполированных значений запасов нефти, достигнутых при предельной обводненности. Применяются отсеивающие критерии, основанные только на неправдоподобных спрогнозированных показателях запасов. Накопленная динамика добычи сырья не учитывается. В связи с этим прогнозный результат строится на основе неправдоподобных показателей динамики добычи, которой соответствует адекватное значение извлекаемых запасов, полученное по принятому критерию в алгоритме. Например, по соответствию диапазону кратности остаточных извлекаемых запасов нефти.

В ходе анализа был выявлен недостаток такого подхода: начало экстраполированной динамики добычи нефти сильно отклоняется от конца исторических показателей. Такое явление даже свойственно кривым с высоким значением квадрата коэффициента линейной корреляции Пирсона (0,99 и более).

На рис. 3 находится пример, демонстрирующий необходимость использования критерия сходимости в последней фактической точке.

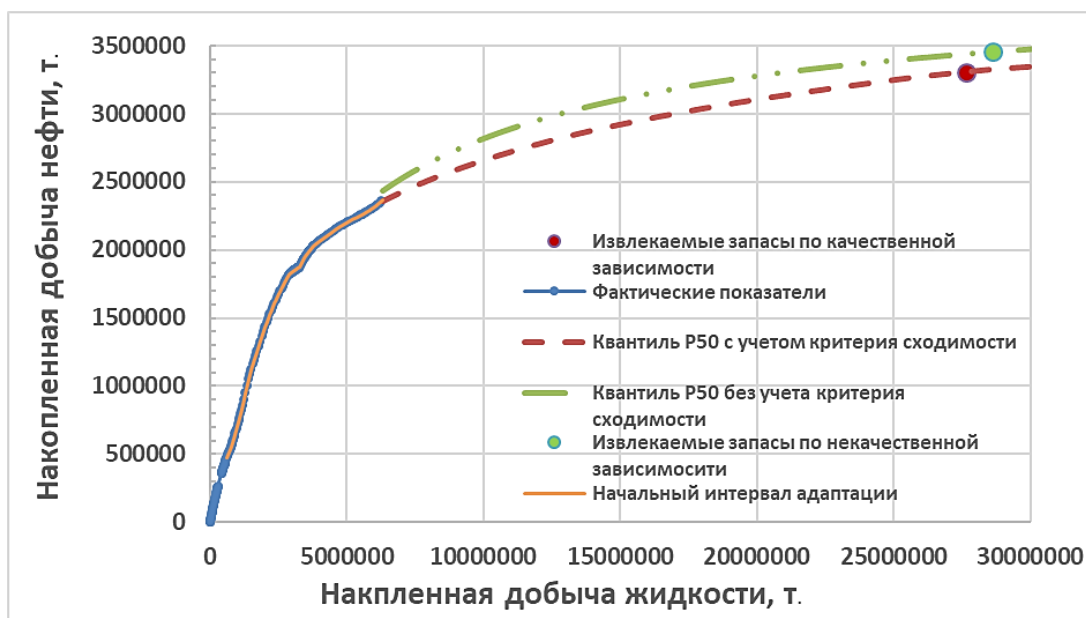


Рис. 3. Неправдоподобный прогноз динамики добычи нефти

Зеленая линия – прогнозная динамика добычи нефти по квантилю вероятности P50, полученная без использования критерия сходимости в последней фактической точке. Красная линия – прогнозная динамика добычи нефти по квантилю вероятности P50, полученная с использованием критерия сходимости в последней фактической точке. Обе кривые были получены с применением критерия кратности остаточных извлекаемых запасов нефти.

Первое экстраполированное значение в массиве с динамикой без критерия сходимости больше последнего исторического на 2,9%. Подобное отклонение является недопустимым. В начале экстраполяции будет наблюдаться большой разрыв в обводненности: данные неправдоподобные.

Заключение

Проведенное исследование показало, что нельзя оценивать извлекаемые запасы нефти независимо от анализа прогнозной динамики добычи. Традиционное применение кривых обводнения не позволяет оценивать запасы нефти по универсальному алгоритму, который подходил бы для любого объекта разработки при режиме заводнения. Вероятностный подход устраняет данный недостаток. Критерий кратности остаточных извлекаемых запасов в связке с критерием сходимости позволяет выявить явные неправдоподобные экстраполированные показатели. Вероятностный подход, как правило, позволяет получить более качественный результат даже на объектах с невысокой обводненностью.

Таким образом, разные пользователи комплекса программ будут получать одинаковый прогноз при одинаковой постановке задачи и едином наборе характеристик вытеснения. Результат не будет зависеть от субъективного мнения специалиста.

В основных модулях программного продукта используются интегральные характеристики вытеснения на основе вероятностного метода.

Присутствует возможность осуществить прогноз посредством классического метода характеристик вытеснения. Второстепенные модули занимаются обработкой базы данных с динамикой показателей разработки для ее дальнейшего использования в различных целях. Разработанный комплекс программ может быть использован как инженерами из нефтегазовых организаций, так и студентами из высших учебных заведений для следующих целей:

- анализ истории разработки;
- прогноз основных технологических показателей разработки;
- оценка эффективности от проведенных геолого-технических мероприятий.

Список литературы

1. Соколов С.В. Математическая модель прогнозирования базовой добычи нефти с учетом неопределенностей на основе метода характеристик вытеснения // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 1. С. 82-91. - DOI <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91>. – Текст : непосредственный.
2. Харисов М.Н., Карпов А.А., Петров С.В., Дарий С.Д. Алгоритм определения оптимальных характеристик вытеснения // Нефтяное хозяйство. 2018. №5. С. 56-59. - DOI <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-56-59>
3. Шумко В.С., Мамчистова Е.И., Кузовлев С.С. Оценка извлекаемых запасов нефти с применением интегральных характеристик вытеснения на основе вероятностной методики // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 2. С. 78-88. - DOI <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-78-88>
4. Шумко В.С., Мамчистова Е.И. Разработка образовательного приложения для прогноза основных показателей разработки нефтяных месторождений с применением характеристик вытеснения нефти водой // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. (7-8 ноября 2024 г., Ухта). С. 76-80.
5. Казаков А.А. Методическое обеспечение единых подходов оценки эффективности методов ПНП // Технологии топливно-энергетического комплекса. 2003. № 2. С. 47–53.
6. Казаков А.А. Методы характеристик вытеснения нефти водой. М.: ООО “Издательский дом Недра”. 2020. 276 с.
7. Назаренко М.Ю., Золотухин А.Б. Применение машинного обучения для вероятностного прогнозирования добычи и расчета потенциальных извлекаемых запасов нефти // Нефтяное хозяйство. 2020. № 9. С. 109–113. - DOI <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-109-113>
8. Назаренко М.Ю., Золотухин А.Б. Применение методов машинного обучения для вероятностного прогнозирования добычи. М.: ООО “Издательский дом Недра”. 2021. 125 с.

9. Integral Type Curves for Advanced Decline Curve Analysis / J.P. Spivey, J.M. Gatens, M.E. Semmelbeck, W.J. Lee. – DOI 10.2118/24301-MS. – Текст: непосредственный // SPE Mid-Continent Gas Symposium, 13–14 April, 1992. – Amarillo, Texas, 1992. – P. 91.
10. Ручкин А.А., Гусева Д.Н. Новый подход к оценке извлекаемых запасов по характеристикам вытеснения // Нефтепромысловое дело. 2016. № 1. С. 43-47.
11. Ханипов М.Н., Насыбуллин А.В., Саттаров Р.З. Вероятностная оценка вовлеченных в разработку запасов нефти на основе характеристик вытеснения с применением статистических методов // Нефтяное хозяйство. 2016. № 1. С. 37-39. - DOI <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-37-39>
12. Ручкин А.А., Левагин С.А. Вероятностный прогноз извлекаемых запасов по характеристикам вытеснения // Материалы международной научно-технической конференции. (14–18 ноября 2016 г. Ханты-Мансийск, Россия). С. 393–401.

References

1. Sokolov S.V. Matematicheskaya model' prognozirovaniya bazovoi dobychi nefiti s uchetom neopredelennosti na osnove metoda kharakteristik vytesneniya // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika. 2016. T. 2. № 1. Pp. 82-91. - DOI <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91>. – Текст : непосредственный. (in Russian)
2. Kharisov M.N., Karpov A.A., Petrov S.V., Darii S.D. Algoritm opredeleniya optimal'nykh kharakteristik vytesneniya // Neftyanoe khozyaistvo. 2018. №5. Pp. 56-59. - DOI <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-56-59> (in Russian)
3. Shumko V. S., Mamchistova E. I., Kuzovlev S. S. Otsenka izvlekaemykh zapasov nefiti s primeneniem integral'nykh kharakteristik vytesneniya na osnove veroyatnostnoi metodiki // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz. 2021. № 2. Pp. 78-88. - DOI <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-78-88> (in Russian)
4. Shumko V. S., Mamchistova E. I. Razrabotka obrazovatel'nogo prilozheniya dlya prognoza osnovnykh pokazatelei razrabotki neftyanykh mestorozhdenii s primeneniem kharakteristik vytesneniya nefiti vodoi // Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. (7-8 noyabrya 2024 g., Ukhta). Pp. 76-80. (in Russian)
5. Kazakov A.A. Metodicheskoe obespechenie edinykh podkhodov otsenki effektivnosti metodov PNP // Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa. 2003. № 2. Pp. 47–53. (in Russian)
6. Kazakov A.A. Metody kharakteristik vytesneniya nefiti vodoi. M.: ООО “Izdatel'skii dom Nedra”. 2020. 276 p. (in Russian)
7. Nazarenko M. Yu., Zolotukhin A. B. Primenenie mashinnogo obucheniya dlya veroyatnostnogo prognozirovaniya dobychi i rascheta potentsial'nykh izvlekaemykh zapasov nefiti // Neftyanoe khozyaistvo. 2020. № 9. Pp. 109–113. - DOI <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-109-113> (in Russian)
8. Nazarenko M. Yu, Zolotukhin A. B. Primenenie metodov mashinnogo obucheniya dlya veroyatnostnogo prognozirovaniya dobychi. M.: ООО “Izdatel'skii dom Nedra”. 2021. 125 p. (in Russian)
9. Integral Type Curves for Advanced Decline Curve Analysis / J.P. Spivey, J.M. Gatens, M.E. Semmelbeck, W.J. Lee. – DOI 10.2118/24301-MS. – Текст: непосредственный // SPE Mid-Continent Gas Symposium, 13–14 April, 1992. – Amarillo, Texas, 1992. – P. 91.
10. Ruchkin A.A., Guseva D.N. Novyi podkhod k otsenke izvlekaemykh zapasov po kharakteristikam vytesneniya // Neftepromyslovoe delo. 2016. № 1. Pp. 43-47. (in Russian)
11. Khanipov M.N., Nasybullin A.V., Sattarov R.Z. Veroyatnostnaya otsenka vovlechennykh

- v razrabotku zapasov nefiti na osnove kharakteristik vytesneniya s primeneniem statisticheskikh metodov // Neftyanoe khozyaistvo. 2016. № 1. Pp. 37-39. - DOI <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-37-39> (in Russian)
12. Ruchkin A.A., Levagin S.A. Veroyatnostnyi prognoz izvlekaemykh zapasov po kharakteristikam vytesneniya // Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. (14–18 noyabrya 2016 g. Khanty-Mansiisk, Rossiya). Pp. 393–401. (in Russian)

Сведения об авторах

Шумко Владислав Сергеевич, ассистент кафедры РЭНГМ, Тюменский индустриальный университет
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70
E-mail: vlad-to72@mail.ru

Authors

V.S. Shumko, Assistant, Tyumen Industrial University
70 Melnikaite St., Tyumen, 625000, Russian Federation
E-mail: vlad-to72@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2025
Принята к публикации 27.03.2026
Опубликована 30.03.2026