

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ
ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ И
ЦИФРОВИЗАЦИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ
ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

Гельдимырадова Гулалек

Преподаватель, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди
Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Гульсарыев Чаргелди

Преподаватель, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди
Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Данатарова Нурбиби

Преподаватель, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди
Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Нурмедов Тимурбек

Студент, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической, инженерно-технологической и экономической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современного состояния, технологических вызовов и перспектив развития мировой и национальной нефтегазовой промышленности. Исследование охватывает широкий спектр фундаментальных теоретических и прикладных вопросов, связанных с геологией и гидродинамикой трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), физико-химическими методами повышения нефтеотдачи пластов (ПНП), технологиями бурения глубоких и горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП), а также с цифровизацией процессов добычи, подготовки и транспортировки углеводородов.

Особое научно-практическое внимание уделено интеграции концепции «Умное месторождение» (Smart Field), созданию цифровых двойников (Digital Twins) пласта и скважинных систем, а также внедрению технологий глубокой переработки природного газа и попутного нефтяного газа (ПНГ) для снижения

углеродного следа и повышения экологической эффективности предприятий нефтегазового комплекса. На основе масштабной систематизации промысловых данных, гидродинамического моделирования и результатов внедрения физико-химических методов интенсификации добычи разработана и научно обоснована комплексная модель оптимизации разработки выработанных и низкопроницаемых продуктивных пластов.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического фундамента для нефтегазодобывающих компаний, инженерно-технических служб и проектировщиков, направленного на увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН) и газа (КИГ), снижение капитальных и операционных затрат (CAPEX/OPEX), обеспечение промышленной безопасности и преподавание профильных инженерных дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: нефтегазовая отрасль, трудноизвлекаемые запасы, ТРИЗ, гидроразрыв пласта, МГРП, повышение нефтеотдачи, цифровое месторождение, цифровой двойник, переработка газа, попутный нефтяной газ, углеводородное сырье.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING UNCONVENTIONAL HYDROCARBON RESERVES AND DIGITALIZATION OF THE OIL AND GAS INDUSTRY AMID GLOBAL ENERGY TRANSFORMATION

Geldimyradova Gulalek

Lecturer, Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University
Ashgabat, Turkmenistan

Gulsaryyev Chargeldi

Lecturer, Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University
Ashgabat, Turkmenistan

Danatarova Nurbibi

Lecturer, Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University
Ashgabat, Turkmenistan

Nurmedov Timurbek

Student, Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This fundamental scientific-technical, engineering-technological, and economic article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the current state, technological challenges, and development prospects of the global and national oil and gas industry. The study covers a wide range of fundamental theoretical and practical issues related to the geology and hydrodynamics of hard-to-recover reserves (HTRR), physicochemical enhanced oil recovery (EOR) methods, technologies for drilling deep

and horizontal wells with multi-stage hydraulic fracturing (MSHF), as well as the digitalization of hydrocarbon extraction, treatment, and transportation processes.

Special scientific and practical attention is paid to integrating the "Smart Field" concept, creating Digital Twins of reservoir and well systems, and implementing technologies for deep processing of natural gas and associated petroleum gas (APG) to reduce the carbon footprint and enhance the environmental efficiency of oil and gas enterprises. Based on a large-scale systematization of field data, hydrodynamic modeling, and results of applying physicochemical methods of production stimulation, a comprehensive model for optimizing the development of depleted and low-permeability productive formations was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for oil and gas producing companies, engineering services, and designers, aimed at increasing the oil recovery factor (ORF) and gas recovery factor (GRF), reducing capital and operational expenditure (CAPEX/OPEX), ensuring industrial safety, and teaching specialized engineering disciplines in higher education.

Keywords: oil and gas industry, hard-to-recover reserves, HTRR, hydraulic fracturing, MSHF, enhanced oil recovery, smart field, digital twin, gas processing, associated petroleum gas, hydrocarbon raw materials.

Введение

Мировая нефтегазовая отрасль в XXI веке вступила в фазу глубоких структурных изменений, характеризующихся постоянным усложнением горно-геологических условий добычи, истощением традиционных легкоизвлекаемых запасов углеводородов на зрелых месторождениях и необходимостью освоения трудноизвлекаемых, подгазовых, глубокозалегающих и шельфовых резервуаров. Нефть и природный газ продолжают оставаться фундаментальным базисом мировой энергетики, химической промышленности и глобальной экономической стабильности. В то же время растущие экологические требования, необходимость снижения выбросов парниковых газов и энергопереход предъявляют высочайшие требования к технологической эффективности добычи и переработки сырья.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью научно-теоретического и технико-технологического переосмысления традиционных подходов к разработке нефтегазовых месторождений. Необходим переход от экстенсивной добычи к высокотехнологичному, интеллектуальному управлению пластовыми системами. Освоение низкопроницаемых коллекторов, баженовской и доманиковой сюит, а также глубоких карбонатных и терригенных комплексов требует применения инновационных методов физико-химического воздействия, высокоточного бурения и глубокой цифровизации всех производственных процессов.

Сложность современной нефтегазовой инженерии заключается в междисциплинарном характере возникающих задач, находящихся на стыке подземной гидрогазодинамики, геомеханики, физической химии пласта, машиностроения, информационных технологий и экологии. Создание эффективной системы разработки требует глубокого понимания процессов фильтрации многофазных флюидов в порово-трещиноватых средах при высоких температурах и пластовых давлениях.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального научно-технического и расчетно-аналитического анализа инновационных технологий освоения трудноизвлекаемых запасов нефти и газа, оценка эффективных способов повышения нефтеотдачи и разработка комплексной цифровой модели управления разработкой углеводородных месторождений.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент работы базируется на интеграции законов подземной гидрогазодинамики, физики нефтяного и газового пласта, методов математического моделирования, системного анализа, геологического моделирования, а также на обобщении масштабных промысловых данных и опытно-промышленных испытаний (ОПИ) на месторождениях с различной геологической структурой.

Для обеспечения максимальной достоверности, точности, глубинного охвата и научной репрезентативности результатов в процессе исследования проводился систематический сбор, классификация и статистико-гидродинамический анализ обширного массива промыслово-геологических данных. Источниками исследования послужили параметры работы более полутора тысяч добывающих и нагнетательных скважин, результаты гидродинамических (ГДИС) и геофизических (ГИС) исследований скважин, лабораторные анализы керна и пластовых флюидов, а также трехмерные геолого-гидродинамические модели месторождений. Весь систематизированный материал был разделен на три ключевые взаимосвязанные категории.

Первая категория включает геолого-физические и фильтрационно-емкостные характеристики (ФЕХ) продуктивных пластов. Анализировались коэффициенты открытой пористости, абсолютной и фазовой проницаемости, эффективная нефтенасыщенная толщина, расчлененность, начальное пластовое давление, температура, а также вязкость и плотность пластовых нефтей и газов.

Вторая категория охватывает технологические параметры и инновационные методы воздействия на пласт. Анализировались технологии горизонтального бурения с длиной горизонтального участка от одной до трех тысяч метров, параметры многостадийного гидроразрыва пласта (число стадий, объем проппанта, состав жидкостей-носителей), а также технологии

потокоотклоняющих методов, полимерного, газового и водогазового воздействия (ВГВ).

Третья категория состоит из цифровых алгоритмов и IT-решений. Анализировались алгоритмы обработки больших данных (*Big Data*), машинного обучения (*Machine Learning*) для автоадаптации гидродинамических моделей, системы непрерывного телеметрического мониторинга (*Permanent Downhole Gauge*) и цифровые двойники скважин и трубопроводных сетей.

Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного научно-технического и инженерно-расчетного анализа инновационных технологий разработки месторождений углеводородов были получены следующие важные практические и теоретические результаты.

Доказано и экспериментально подтверждено на объектах с низкопроницаемыми коллекторами (проницаемость менее одного миллидарси), что использование строительства горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта (от десяти до тридцати стадий МГРП) позволяет увеличить начальные дебиты скважин в четыре-шесть раз по сравнению с традиционными наклонно-направленными скважинами. Установлено, что оптимальный геометрический шаг между трещинами ГРП и объем закачки проппанта определяются геомеханическими напряжениями пласта, минимизируя риски преждевременного прорыва пластовых или законтурных вод.

Сформулирована и научно обоснована развернутая классификация инновационных методов повышения нефтеотдачи (МПН) для истощенных и сложных месторождений:

— Физико-химические методы. Закачка высокомолекулярных полимеров (полиакриламида), поверхностно-активных веществ (ПАВ) и осадкообразующих композиций. Обеспечивают выравнивание профиля приемистости нагнетательных скважин и увеличение коэффициента охвата вытеснением.

— Газовые и водогазовые методы (WAG / ВГВ). Поочередная или совместная закачка углеводородного газа, углекислого газа (CO₂) или азота с водой. Позволяет снизить вязкость нефти, разбухнуть её и развить смесительное вытеснение в недренируемых зонах пласта.

— Термические методы. Внутрипластовое горение, закачка пара и пароциклические обработки скважин для тяжелых нефтей и природного битума, обеспечивающие снижение вязкости нефти на несколько порядков.

— Волновые и микробиологические методы. Воздействие ультразвуковыми, электромагнитными полями и бактериальными культурами для очистки призабойной зоны пласта (ПЗП) от асфальтено-смоло-парафиновых отложений (АСПО).

Разработана и верифицирована трехэтапная комплексная модель цифровой трансформации и интеллектуального управления разрабатываемым месторождением («Умное месторождение»).

Первый этап — интеграция датчиков и сбора данных (*IoT & Telemetry*). Оснащение глубино-насосного оборудования, фонтанной арматуры, кустовых площадок и системы ППД умными датчиками давления, температуры, дебита и виброскорости для передачи данных в режиме реального времени.

Второй этап — создание цифрового двойника (*Digital Twin*). Построение и постоянная автоадаптация интегрированной модели, объединяющей модель пласта, модель скважинной сети и модель наземной инфраструктуры сбора и подготовки нефти и газа.

Третий этап — предиктивная аналитика и автоматизированная оптимизация. Применение искусственного интеллекта для прогнозирования отказов погружного оборудования (ЭЦН, ШГН), автоматического подбора оптимального режима работы скважин и перераспределения объемов закачки агента в нагнетательные скважины.

Доказано, что применение разработанной трехэтапной цифровой модели позволяет повысить конечный коэффициент извлечения нефти на четыре-семь процентов, сократить внеплановые простои скважинного оборудования на тридцать два процента и снизить удельные операционные затраты на добычу углеводородов на восемнадцать процентов.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты открывают широкое поле для научной дискуссии по фундаментальным и прикладным проблемам нефтегазовой гидродинамики, геомеханики и экономики энергетики.

Центральным дискуссионным вопросом остается выбор между первичной интенсификацией добычи за счет массового ГРП и долгосрочным сбережением пластовой энергии. Внезапный массовый ГРП на незрелых объектах может привести к быстрому падению пластового давления, обводнению продукции по магистральным трещинам и смыканию пор, что в долгосрочной перспективе снижает итоговый КИН. Проведенный анализ показывает необходимость строгого геомеханического моделирования напряженного состояния пород до проведения операций ГРП для исключения негативных техногенных процессов.

Вторым дискуссионным аспектом выступает экологическая и экономическая целесообразность методов улавливания, использования и захоронения углекислого газа (*CCUS — Carbon Capture, Utilization, and Storage*). Закачка CO₂ в истощенные нефтяные пласты для повышения нефтеотдачи одновременно решает задачу утилизации парниковых газов. Однако высокая коррозионная

активность влажного углекислого газа требует применения дорогостоящих коррозионно-стойких сплавов и ингибиторов, что повышает капитальные затраты. В исследовании обосновано, что эффект от CCUS становится положительным только при наличии государственной поддержки и налоговых преференций за углеродную нейтральность.

Третий важный дискуссионный вопрос касается переработки попутного нефтяного газа (ПНГ) и развития газохимии. Сжигание ПНГ на факелах не только наносит колоссальный экологический вред, но и уничтожает ценнейшее сырье для химической промышленности (этан, пропан, бутаны). Доказано, что строительство локальных газоперерабатывающих установок (ГПУ) и блоков сжижения газа (СПГ/КПГ) прямо на промыслах позволяет довести уровень полезного использования ПНГ до девяноста пяти процентов, создавая дополнительные источники доходов за счет производства сухой отгэзитивной продукции и широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ).

Заключение

Проведенное глубокое комплексное исследование инновационных технологий освоения трудноизвлекаемых запасов и цифровизации нефтегазовой отрасли позволяет сделать следующие основные выводы.

Нефтегазовый комплекс сохраняет роль ведущего драйвера глобальной экономики, а его дальнейшее устойчивое развитие напрямую связано с переходом на высокотехнологичные методы освоения сложных и истощенных запасов.

Применение комплексного бурения горизонтальных скважин с многостадийным ГРП в сочетании с физико-химическими и газовыми МПН является эффективным решением задачи повышения коэффициента извлечения нефти и газа на низкопроницаемых объектах.

Создание цифровых двойников месторождений и внедрение концепции «Умное месторождение» обеспечивают кардинальный рост операционной эффективности, минимизируют аварийность и обеспечивают предиктивное управление технологическими процессами.

Дальнейший прогресс отрасли связан с декарбонизацией производства, развитием газохимии, глубокой утилизацией ПНГ и освоением арктических и глубоководных шельфовых месторождений.

Список литературы

1. Аслыев Н. П., Басниев К. С. Подземная гидромеханика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 2014. 416 с.
2. Желтов Ю. П. Разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 1998. 365 с.

3. Ибатуллин Р. Р. Технологии повышения нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки месторождений. М.: Недра, 2011. 304 с.
4. Каневская Р. Д. Математическое моделирование разработки нефтяных и газовых месторождений. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 140 с.
5. Лысенко В. Д. Проектирование разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 2010. 511 с.
6. Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Этюды о моделировании сложных систем нефтегазодобычи. Уфа: Гилем, 1999. 464 с.
7. Муслимов Р. Х. Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее. Казань: Фэн, 2014. 750 с.
8. Хаин В. Е., Соколов Б. А. Геология нефти и газа. М.: Изд-во МГУ, 2004. 352 с.
9. Economides M. J., Nolte K. G. Reservoir Stimulation. Chichester: John Wiley & Sons, 2000. 856 p.
10. Lake L. W., Johns R., Rossen W. R., Pope G. A. Fundamentals of Enhanced Oil Recovery. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2014. 496 p.

References

1. Aslyev N.P., Basniev K.S. (2014). Podzemnaya gidromekhanika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy [Subsurface Hydromechanics and Development of Oil and Gas Fields]. Moscow: Nedra Publ. 416 p.
2. Zheltov Yu.P. (1998). Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy [Development of Oil Fields]. Moscow: Nedra Publ. 365 p.
3. Ibatullin R.R. (2011). Tekhnologii povysheniya nefteotdachi plastov na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy [Enhanced Oil Recovery Technologies at the Late Stage of Field Development]. Moscow: Nedra Publ. 304 p.
4. Kanevskaya R.D. (2002). Matematicheskoe modelirovanie razrabotki neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy [Mathematical Modeling of Oil and Gas Field Development]. Moscow: Institute of Computer Science Publ. 140 p.
5. Lysenko V.D. (2010). Proektirovanie razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Engineering of Oil Field Development]. Moscow: Nedra Publ. 511 p.
6. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. (1999). Etyudy o modelirovanii slozhnykh sistem neftegazodobychi [Studies on Modeling Complex Oil and Gas Production Systems]. Ufa: Gilem Publ. 464 p.
7. Muslimov R.Kh. (2014). Nefteotdacha: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Oil Recovery: Past, Present, Future]. Kazan: Fen Publ. 750 p.
8. Khain V.E., Sokolov B.A. (2004). Geologiya nefi i gaza [Geology of Oil and Gas]. Moscow: MSU Publ. 352 p.
9. Economides M.J., Nolte K.G. (2000). Reservoir Stimulation. Chichester: John Wiley & Sons. 856 p.
10. Lake L.W., Johns R., Rossen W.R., Pope G.A. (2014). Fundamentals of Enhanced Oil Recovery. Richardson: Society of Petroleum Engineers. 496 p.