

doi:10.25689/NP.2019.4.72-85

УДК 553.981.2

**ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЕРХНЕЮРСКИХ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
БУХАРО-ХИВИНСКОГО РЕГИОНА**

Ермилов А.П., Васюткин С.В., Жуков А.А., Жукова В.З.

ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», г. Ташкент

**ASPECTS OF GEOLOGICAL MODELING OF UPPER JURASSIC
CARBONATE RESERVOIRS IN BUKHARO-KHIVINSKY
PETROLEUM REGION**

Ermilov A.P., Vasyutkin S.V., Zhukov A.A., Zhukova V.Z.

LLC LUKOIL Uzbekistan Operating Company (Tashkent)

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Аннотация. На сегодняшний день значительная часть углеводородов мира добывается из карбонатных коллекторов. Несмотря на большое количество научных трудов, посвященных изучению карбонатных коллекторов, достоверная оценка запасов углеводородов и планирование разработки карбонатных коллекторов связаны с высоким уровнем риска.

Цель работы заключается в рассмотрении подходов к геологическому моделированию и подсчету запасов углеводородов в карбонатных коллекторах, применяемых ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», позволяющих учесть основные неопределенности, минимизировать риски и повысить эффективность проектов.

В работе проанализированы фациальные особенности разрезов карбонатной формации юры Бухаро-Хивинского нефтегазоносного региона, приведены результаты фациального моделирования, описана последовательность оценки степени проработки проекта в области геологии и разработки месторождений, а также инструмент Proху-моделирование, используемый для проведения вероятностной оценки.

Ключевые слова: карбонатные коллекторы, фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), неоднородность, условия осадконакопления, лито-генетический тип известняков, петрофизические классы, фациальное моделирование, методология Reservoir Engineering Status, Proху-моделирование, вероятностно-статистическая оценка

Abstract. Today, the major portion of hydrocarbon production comes from carbonate reservoirs. Despite numerous papers addressing carbonate reservoir studies, reliable estimate of hydrocarbon reserves and planning of carbonate reservoir development are still associated with high risks.

The paper discusses various approaches to geologic modeling and reserves estimate in carbonate formations applied by OOO Lukoil Uzbekistan Operating Company, which take into account basic uncertainties, allow minimizing risks and increasing project efficiency.

The paper analyzes facies features of Jurassic carbonate formation in Bukhoro-Khivinsky petroleum region, presents facies modeling results, describes procedure of evaluating reservoir geology and engineering project development, as well as Proxy-simulation tool used for probabilistic estimate.

Key words: *carbonate reservoirs, reservoir properties, heterogeneity, depositional environment, limestone lithogenic type, petrophysical classes, facies modeling, Reservoir Engineering Status concept, Proxy-simulation, probabilistic-statistical estimate*

В нефтегазодобывающей промышленности корректность принятия управленческих решений в большой степени зависит от достоверности оценки ресурсной базы и качества прогнозов добычи углеводородов. Непростая ситуация на сырьевых рынках и глобальная тенденция увеличения сложности месторождений повышают уровень рисков и сокращают ожидаемую эффективность проектов.

Как правило, планирование производственных показателей и принятие решений осуществляется на основе детерминированного подхода. В условиях неопределенности прогнозирование, основанное на детерминированном подходе, имеющем единственное решение, перестает быть актуальным и на первый план выходят методы вероятностной оценки.

ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани» осуществляет добычу углеводородов на территории Республики Узбекистан из продуктивных отложений поздней юры, сложенных карбонатными коллекторами.

Разрабатываемые газоконденсатные месторождения характеризуются сложным геологическим строением, обусловленным многопластовым строением залежей, неоднородностью фильтрационно-

емкостных свойств (ФЕС), изменчивостью фациального состава и наличием перекрывающего солевого горизонта. Перечисленные геологические особенности оказывают значительное влияние на надежность оценки начальных запасов углеводородов и стратегию деятельности Компании.

В связи с этим, возникает необходимость в детальном изучении условий формирования карбонатных коллекторов и поиска закономерностей, описывающих изменчивость фильтрационно-емкостных свойств. При работе со сложнопостроенными карбонатными коллекторами возникает ряд задач, которые возможно эффективно решать с применением современных подходов, основанных на геологическом и фильтрационном моделировании пластовых систем.

Структура представленной работы включает три основных раздела, посвященных приемам работы с карбонатными коллекторами, применяемыми в Компании. В первой части работы будет рассмотрено фациальное моделирование, во второй и третьей частях мы обратимся к методологии RE-Status (Reservoir Engineering Status) и Proху-моделированию, использующим вероятностные алгоритмы преобразования данных и оценки результатов.

Фациальное моделирование

На примере одного из месторождений продемонстрирована методика фациального моделирования карбонатных коллекторов, основанная на детальном анализе и обобщении геолого-промысловых материалов, включающих исследования керна, геофизические и гидродинамические исследования скважин, и численном моделировании с использованием стохастических алгоритмов.

Карбонатные коллекторы исследуемого месторождения сформировались в мелководно-морской среде осадконакопления, характерной для верхнеюрских отложений юго-западной части Республики

Узбекистан. Аккумуляция карбонатных отложений происходила в процессе снижения уровня моря (регрессии) в келловей-оксфордское время. Два основных карбонатных пласта XV-1 и XV-2 разделены прослоем аргиллитов и мергелей, сформированным во время короткой фазы трансгрессии (Рис. 1) [1].

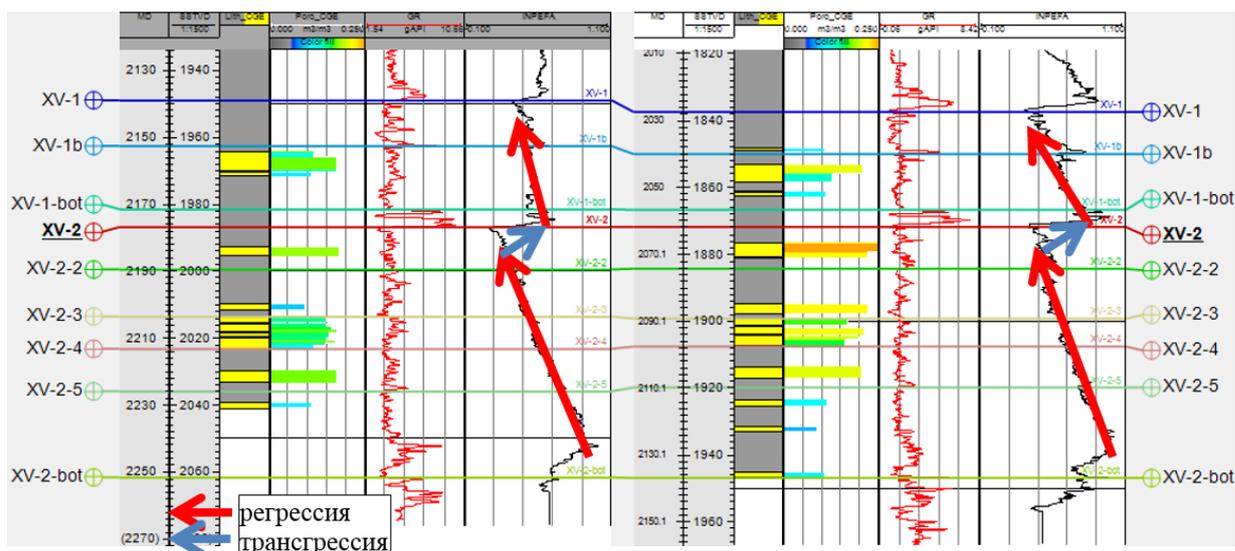


Рис. 1. Схема корреляции. Периоды трансгрессии и регрессии

Результаты газодинамических и промыслово-геофизических исследований скважин позволили обнаружить существенные геологические неоднородности и изменчивость фильтрационно-емкостных свойств по площади и разрезу месторождения, несмотря на кажущуюся однородность карбонатных коллекторов.

В результате были выявлены высокопроводящие интервалы и пласты с низкими коллекторскими свойствами.

Результаты исследований ядра на фильтрационной установке в пластовых условиях не позволяют определить единую зависимость проницаемости от пористости, характеризующуюся высоким коэффициентом корреляции (Рис. 2).

В результате анализа и обобщения результатов исследований ядра определены четыре основных типа известняков: оолитовые, комковатые, сгустковые, микрозернистые и два смешанных типа пород: сгустково-комковатые и комковато-сгустковые известняки.

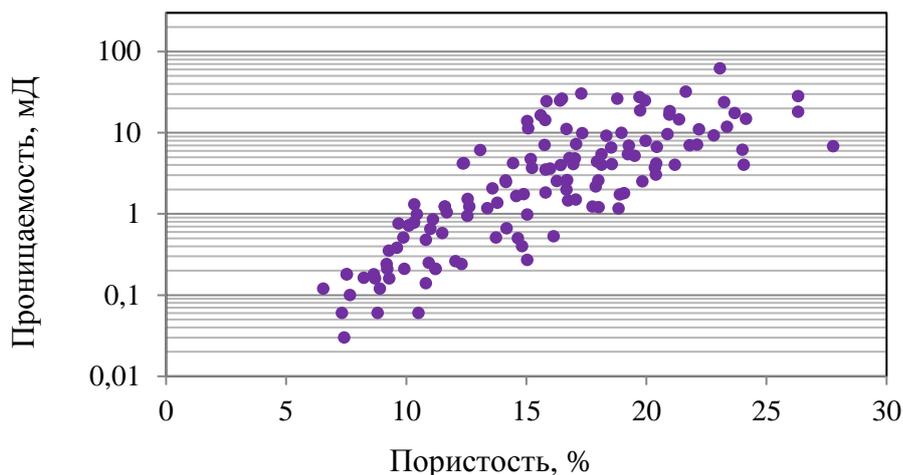


Рис. 2. Результаты лабораторных исследований керна

На рис. 3 приведены гистограммы распределения литогенетических типов известняков по пористости и проницаемости [2]. Сгустковые и микрозернистые известняки имеют сниженную пористость во всех исследуемых продуктивных горизонтах. В большинстве образцах керна рассматриваемые типы пород являются неколлектором и не способны вмещать или фильтровать сквозь себя углеводороды. Известняки с ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами сгруппированы в единый петротип РТ1. Пористость петротипа РТ1 в большинстве случаев не превышает 10-11 %.

Два смешанных типа известняков: сгустково-комковатые и комковато-сгустковые, характеризующиеся сходными свойствами, располагаются в среднем диапазоне пористости, которые объединены в один петротип РТ2. Пористость петротипа РТ2 в основном изменяется в пределах 10-14 %.

Оолитовые и обломочно-комковатые известняки соответствуют высокопроводящим интервалам, имеющим высокие значения пористости и проницаемости. Данные типы пород обнаружены в обоих продуктивных пластах XV-1 и XV-2 и объединены в общий петротип РТ3. При сравнении фильтрационно-емкостных свойств петротипа РТ3 отдельно по пластам выявлено различие фильтрационных свойств и для нижележащих пластов

(XV-2-2...5) выделен петротип РТ4.

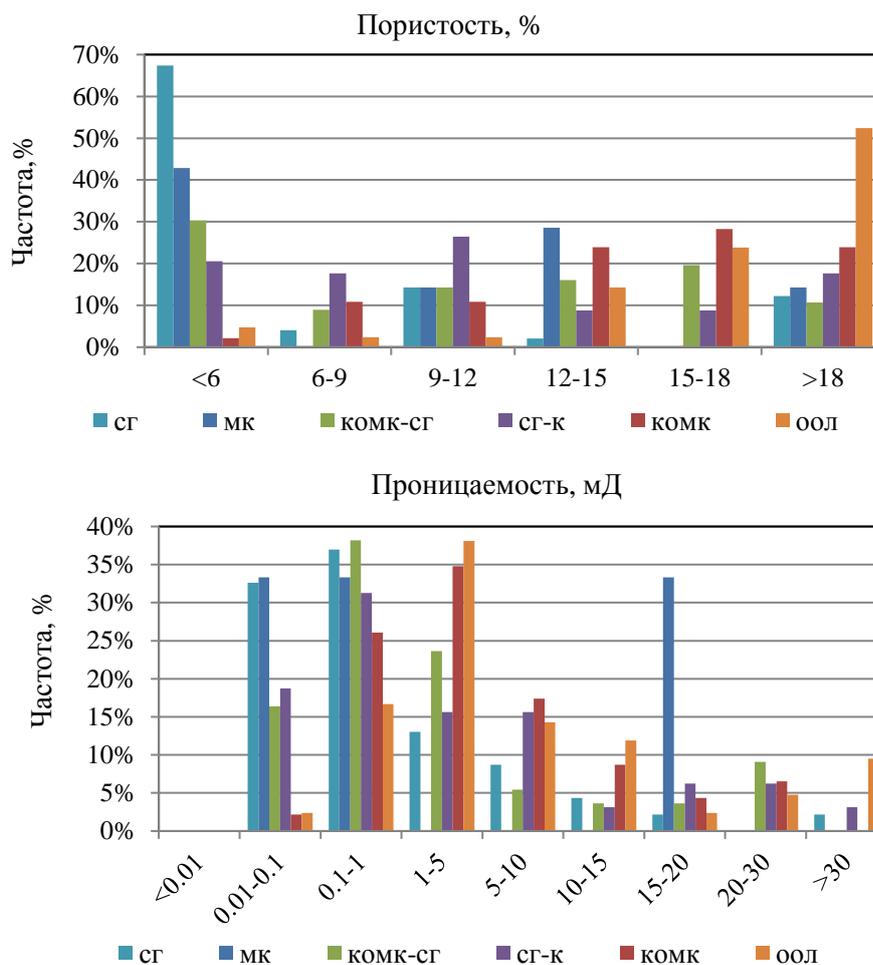


Рис. 3. Распределение типов известняков в зависимости от пористости и проницаемости

В результате анализа данных керна определены четыре основных петротипа: РТ1, РТ2, РТ3 и РТ4. На рис. 4 приведены зависимости проницаемости от пористости для каждого петротипа [1]. Высокие фильтрационные свойства, характерные для петротипов РТ3 и РТ4, по сравнению с петротипами РТ1 и РТ2, обусловлены структурой порового пространства и подтверждаются результатами отдельных испытаний скважин. При этом, для петротипа РТ3 свойственна большая проницаемость, чем для петротипа РТ4, что объясняется диагенетическими преобразованиями пород, главным образом, интенсивностью процесса выщелачивания.

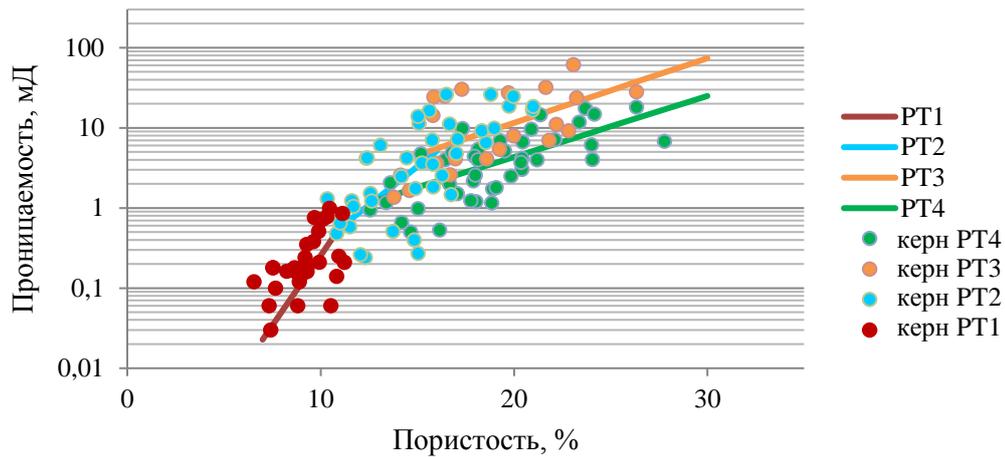


Рис. 4. Зависимость проницаемости от пористости для каждого петротипа

По результатам капилляриметрических исследований установлено, что поровый объем петротипа РТ3 состоит преимущественно из сверхкапилляров и капилляров, которые обеспечивают фильтрацию флюидов. В структуре порового пространства петротипа РТ1 преобладают субкапилляры и микропоры (тонкие поры), водоудерживающая способность которых очень высока и вследствие этого они не участвуют в процессе фильтрации флюидов (Рис. 5).

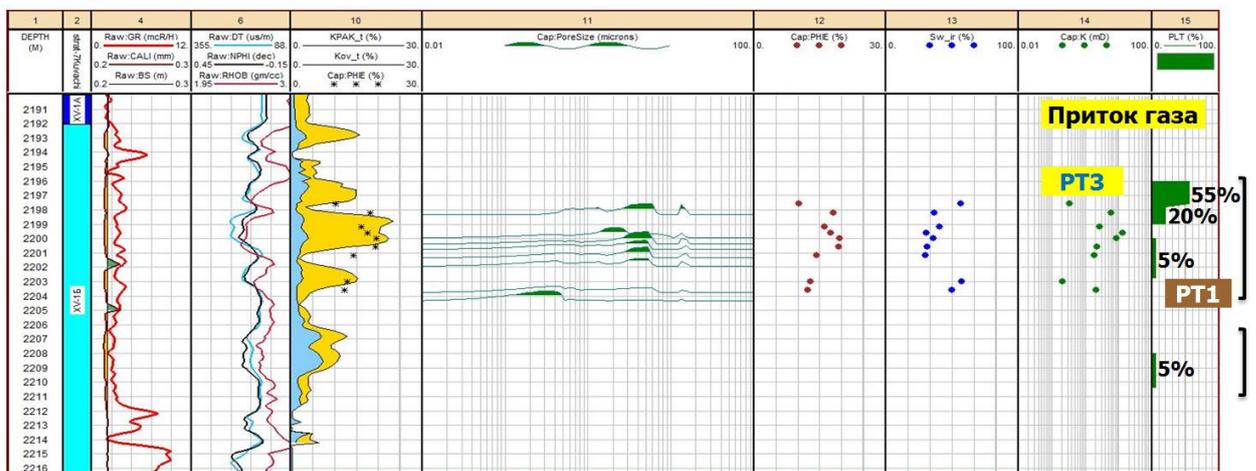


Рис. 5. Анализ структуры порового пространства петротипов РТ1 и РТ3 [3]

На основании результатов проделанного анализа построена фациальная модель изучаемого месторождения. Геологический разрез фациальной модели показан на рис. 6 [1]. С первого взгляда разрез месторождения характеризуется пластовым строением, выдержанные коллекторы присутствуют во всех эксплуатационных скважинах,

покрышкой служит толща солевых отложений - данный тип разреза свойственен мелководно-морской обстановке осадконакопления. Однако картина меняется при взгляде на распределение петротипов в разрезе, высокопроницаемые коллекторы распределены неравномерно, присутствуют потенциально застойные зоны с преобладанием петротипа РТ1.

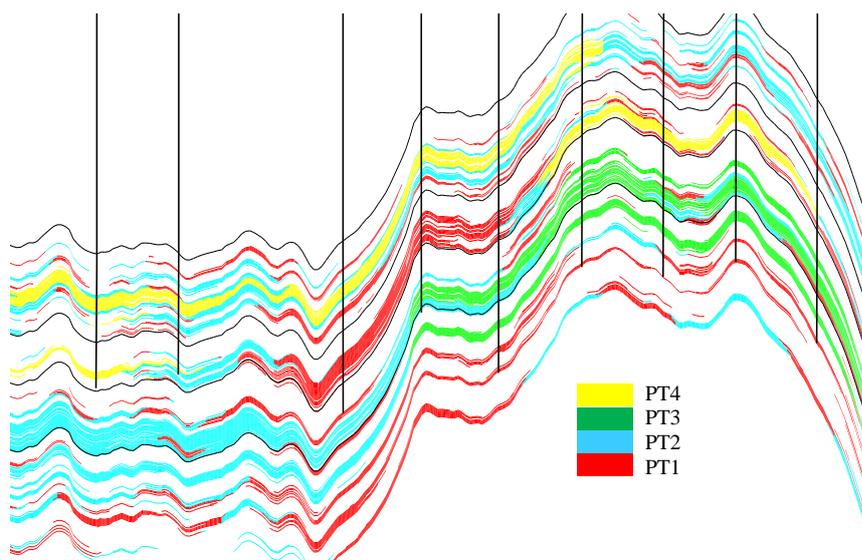


Рис. 6. Разрез через модель фаций

Построенная геологическая модель дает комплексную характеристику пластовой системы. Фациальная модель, в свою очередь, используемая при прогнозе проницаемости, подтверждена результатами освоения эксплуатационного фонда скважин, по данным исследований выявлена значительная изменчивость свойств по площади и разрезу.

Таким образом, применение фациального моделирования позволяет повысить надежность прогнозирования фильтрационных свойств, что в свою очередь, отражается на достоверности прогнозов добычи углеводородов.

Методология RE-Status

Оценка степени проработки проекта в области геологии и разработки месторождений позволяет выявить «слабые» стороны проекта на его

ранних этапах, подготовить рекомендации, направленные на увеличение эффективности проекта, и внести изменения в проект до начала его реализации [1].

Инженерами-разработчиками ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани» разработан новый подход к вероятностной оценке под названием RE-Status. Подход базируется на шести индикаторах уровня рисков в области подсчета запасов углеводородов и планирования разработки месторождений.

Методология RE-Status включает в себя четыре этапа.

На первом этапе выявляют основные характеристики и факторы, оказывающие значительное влияние на способ извлечения углеводородов, сложность разработки месторождений, стоимость скважин и объектов обустройства (коэффициент RCL) [1].

На втором этапе определяют основные неопределенности геологических параметров (уровни флюидальных контактов, фильтрационно-емкостные свойства, пластовые свойства нефти и газа и т.д.), выполняют вероятностную оценку и расчет коэффициентов надежности подсчета запасов углеводородов (коэффициенты ESI / ERI) [1]. Аналогичную последовательность действий выполняют при прогнозировании уровней добычи углеводородов (коэффициенты PRI / PRRI) [1]. На следующем шаге идентифицируют характер стратегии оценки запасов углеводородов и прогноза добычи в зависимости от вероятности подтверждения расчета (Табл. 1).

Таблица 1

Характер стратегии оценки запасов и прогноза добычи (ESI / PRI) [1]

Значение ESI / PRI	Тип стратегии оценки запасов и прогноза добычи
0...20 %	консервативный
20...40%	умеренный
40...100%	агрессивный

На третьем этапе оценивают статус проекта с точки зрения степени изученности месторождения в целом, планирования работ и готовности к реализации проекта. На данном этапе определяют уровень предварительной проработки проекта (коэффициент PDI) [1].

На четвертом этапе формулируют основные выводы и рекомендации по доизучению месторождения, оптимизации проекта, разрабатывают мероприятия по снижению неопределенности, снятию рисков и увеличению ценности проекта.

Данный инструмент используется в качестве универсального метода анализа неопределенности и мониторинга состояния проектов.

Proxy-моделирование

Инструмент Proxy-моделирования позволяет оптимизировать ресурсы, необходимые для проведения вероятностной оценки того или иного целевого показателя.

При вероятностном подходе каждый параметр неопределенности изменяется в пределах доверительного интервала. К примеру, при обосновании отметки газо-водяного контакта его уровень может изменяться между верхней отметкой притока воды и нижней отметкой притока газа, зависимость связанной водонасыщенности описывается уравнением, коэффициенты которого также находятся в определенных доверительных интервалах.

В сложных задачах вероятностной оценки количество переменных неопределенности может достигать нескольких десятков. В этом случае количество комбинаций совокупности переменных составляет несколько десятков тысяч. При значительной сложности моделей пласта оценить необходимые целевые показатели, будь то величина запасов, объем добычи газа или дата ввода дожимной компрессорной станции, в условиях нескольких тысяч комбинаций переменных невозможно в силу увеличения времени и ограниченности вычислительных ресурсов.

Инструмент Proху-моделирования позволяет на основе результатов граничных расчетов на полноценных моделях пласта, вариантов, образующих матрицу эксперимента, при которых значения параметров неопределенности принимают максимальное, минимальное и среднее значения, определить вид и коэффициенты функции целевого показателя. На следующем этапе с использованием целевой функции и метода Монте-Карло рассчитывается необходимое количество вариаций и выполняется вероятностная оценка целевого показателя, значение которого, при необходимости, может быть уточнено на полноценной модели пласта.

Proху-моделирование применено для вероятностной оценки запасов одного из газоконденсатных месторождений Республики Узбекистан. Переменные, влияющие на целевой показатель, рассматривались как случайные величины, изменяющиеся в пределах доверительных интервалов, определенных в результате анализа геолого-промысловых материалов.

Основное отличие вероятностной модели от детерминированной заключается в том, что при детерминированном подходе оценивается единственное значение запасов, на которое в определенной степени влияют мнения и опыт экспертов, принимающих участие в выполнении работ и согласовании подсчета запасов углеводородов. При вероятностном подходе вырабатывается диапазон возможных значений величины запасов, каждое значение которого характеризуется собственной надежностью и вероятностью реализации.

Выполнено сравнение значения вероятностной оценки запасов категории P50 (как средней ожидаемой величины) и оценки запасов, полученной из детерминированной модели. В результате после выполнения оценки геологической неопределенности по множеству реализаций построены карты эффективных газонасыщенных толщин для

каждой из реализаций P90, P50, P10, где P90 соответствует низкой степени риска, а P10 – высокой степени риска [4].

Транснациональные нефтегазодобывающие и аудиторские компании повсеместно используют стандартизованную методику вероятностной оценки запасов как элемент международной системы управления запасами и ресурсами жидких, газообразных и твердых углеводородов (PRMS) [5].

Таким образом, применяемые ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», подходы к геологическому моделированию и подсчету запасов углеводородов позволяют учесть особенности строения продуктивных горизонтов, выявить основные неопределенности и проводить работы по доизучению вверенных месторождений, а также минимизировать риски и повысить эффективность проектов.

Список литературы

1. Сучок С.Н., Обшаров П.А., Ермилов А.П., Вольнов И.А., Жуков А.А., Ялалова В.З., Применение литофациального моделирования для совершенствования гидродинамической модели низкопроницаемых карбонатных коллекторов. SPE-182015-RU.
2. Ялалова В.З., Вольнов И.А., Ермилов А.П., Оценка площадного распространения коллекторов месторождения по результатам ритмостратиграфического анализа. SPE-176626-RU.
3. Ялалова В.З., Жуков А.А., Вольнов И.А., Хакимов А.Ф., Ермилов А.П., Джумаев В.А., Абдуллаев Г.С., Влияние структуры порового пространства на фильтрационно-емкостные свойства карбонатных коллекторов. SPE-187893-RU.
4. Хисамов Р.С., Сафаров А.Ф., Калимуллин А.М., Дрягалкина А.А., Вероятностно-статистическая оценка запасов и ресурсов по международной классификации SPE-PRMS. // Георесурсы. 2018. 20(3). Ч.1. С. 158-164.
5. Пер. с англ. Агеева Ю.Е., ред. Аронштейн Б.Н. Система управления ресурсами и запасами жидких, газообразных и твердых углеводородов. // Москва: Государственная комиссия по запасам РФ. 2007.

References

1. S.N. Suchok, P.A. Obsharov, A.P. Ermilov, I.A. Volnov, A.A. Zhukov, V.Z. Yalalova *Primenenie litofacial'nogo modelirovaniya dlya sovershenstvovaniya gidrodynamichejskoj modeli nizkopronicaemyh karbonatnyh kollektorov* [Application of lithofacies modeling

- to improve simulation model of low-permeability carbonate reservoirs]. SPE-182015-RU (in Russian)
2. V.Z. Yalalova, I.A. Volnov, A.P. Ermilov *Ocenka ploshchadnogo rasprostraneniya kollektorov mestorozhdeniya po rezul'tatam ritmostratigraficheskogo analiza*. [Evaluation of areal extent of reservoirs based on stratigraphic analysis]. SPE-176626-RU (in Russian)
 3. V.Z. Yalalova, A.A. Zhukov, I.A. Volnov, A.F. Khakimov, A.P. Ermilov, V.A. Dzhumaev, G.S. Abdullaev *Vliyanie struktury porovogo prostranstva na fil'tracionno-emkostnye svoystva karbonatnykh kollektorov* [Effect of pore structure on carbonate reservoir properties]. SPE-187893-RU (in Russian)
 4. R.S. Khisamov, A.F. Safarov, A.M. Kalimullin, A.A. Dryagalkina *Veroyatnostno-statisticheskaya ocenka zapasov i resursov po mezhdunarodnoj klassifikacii SPE-PRMS* [Probabilistic-statistical estimate of reserves and resources according to SPE-PRMS international classification]. *Georesursy*, 2018, No.20(3), pp.158-164 (in Russian)
 5. *Sistema upravleniya resursami i zapasami zhidkih, gazoobraznykh i tverdykh uglevodorodov* [Resource management system for liquid, gaseous and solid hydrocarbons]. Translated by U.A. Ageev, edited by B.N. Aronshtein. Moscow, RF State Reserve Commission, 2007 (translated from English)

Сведения об авторах

Ермилов Андрей Петрович, заместитель генерального директора по геологии и разработке ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», г.Ташкент, Республика Узбекистан

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Васюткин Станислав Вячеславович, начальник отдела мониторинга геолого-гидродинамического моделирования и баз данных геологической информации ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», г.Ташкент, Республика Узбекистан

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Жуков Александр Александрович, главный специалист отдела мониторинга геолого-гидродинамического моделирования и баз данных геологической информации ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», г.Ташкент, Республика Узбекистан

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Жукова Венера Зинфиловна, главный специалист отдела мониторинга геолого-гидродинамического моделирования и баз данных геологической информации ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», г.Ташкент, Республика Узбекистан

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Authors

Ermilov A.P., Deputy Director General for geology and production, OOO LUKOIL Uzbekistan Operating Company, Tashkent, Republic of Uzbekistan

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Vasyutkin S.V., Head of Reservoir simulation and geologic database monitoring department, OOO LUKOIL Uzbekistan Operating Company, Tashkent, Republic of Uzbekistan

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Zhukov A.A., Principal Engineer of Reservoir simulation and geologic database monitoring department, OOO LUKOIL Uzbekistan Operating Company, Tashkent, Republic of Uzbekistan

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Zhukova V.Z., Principal Engineer of Reservoir simulation and geologic database monitoring department, OOO LUKOIL Uzbekistan Operating Company, Tashkent, Republic of Uzbekistan

E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz

Жукова Венера Зинфиловна
100027, Республика Узбекистан
г. Ташкент, ул. Олмазор, 1А
Тел.: + 998 78 140-40-40 доб. 4166
E-mail: vzhukova@lukoil-international.uz