

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ DFN-МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Коллектив авторов,
2025



Н.Ю. Смирнов*, В.А. Стародубов, Р.К. Непоп

ООО «ПетроГМ», РФ, Новосибирск

Электронный адрес: smirnov.ny@petrogm.com

Введение. Естественная трещиноватость характерна для карбонатных пород и играет определяющую роль при разработке карбонатных коллекторов трещиноватого и трещинно-порового типов. Необходимым условием успешного моделирования трещиноватости с получением систем дискретных трещин является наличие и интерпретация в едином ключе результатов микроимеджевых исследований, данных сейсморазведки приемлемого качества и, по возможности, проведение палеорекострукции геологической эволюции горного массива. В случае недостатка этих данных или их недостаточного качества эффективной альтернативой может служить концептуальный подход, разработке и апробации которого посвящена статья.

Цель. Целью данной работы стал анализ возможных подходов к моделированию дискретной трещиноватости, а также разработка и апробация концептуального подхода в случае, когда применение стандартных методов является малоэффективным.

Методы. Анализ данных микроимеджевых исследований и сейсморазведки позволяет рассчитывать прямые зависимости параметров трещиноватости как по отдельным скважинам, так и осуществлять их прогноз в межскважинном пространстве. В том случае, когда качество имеющихся данных не позволяет корректно определить такие зависимости и соотнести параметры трещиноватости между скважинами, структурами и сейсмическими атрибутами, эффективной альтернативой может служить концептуальный подход, основанный на понимании механизма возникновения и распространения трещин в меняющихся горно-геологических условиях.

Результаты. Предлагаемый подход подразумевает разработку концепции образования трещиноватости в конкретной региональной или деформационной обстановке с последующей ее оцифровкой и использованием вместе со скважинной информацией. В рамках этого подхода был проведен анализ исходных данных микроимеджевых исследований с выделением низко достоверных интервалов интерпретации и их исключением из последующего рассмотрения, а также анализ инцидентов поглощений бурового раствора при бурении, с учетом результатов 1D геомеханического моделирования, для выявления зон трещиноватости, обойденных скважинными исследованиями. Рассчитанные параметры трещиноватости стохастически распространялись в моделируемой области согласно распределениям интенсивности трещин, угла наклона и азимута простирания для ранее выделенных петротипов.

Заключение. Несмотря на то, что концептуальный подход требует значительно больших трудозатрат и компетенций как при разработке самой концепции и ее оцифровке, так и при последующих расчетах, в итоге именно он позволил построить модель DFN, достоверность и прогнозная сила которой была заверена в ходе проведенных множественных «слепых» тестов по различным параметрам.

Ключевые слова: карбонатный коллектор, трещиноватость, DFN, концептуальный подход, ТРИЗ, комплексное моделирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Смирнов Н.Ю., Стародубов В.А., Непоп Р.К. Концептуальный подход при проведении DFN-моделирования. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2025;10(2):6–13. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-2-6-13>

Статья поступила в редакцию 28.12.2024

Принята к публикации 15.02.2025

Опубликована 30.06.2025

CONCEPTUAL APPROACH TO DFN MODELING

Nikolay Y. Smirnov*, Vladislav A. Starodubov, Roman K. Nepop

LLC "PetroGM", RF, Novosibirsk

E-mail: smirnov.ny@petrogm.com

Introduction. Natural fracturing is typical for carbonate rocks and plays a decisive role in the development of carbonate fractured and fractured-porous types of reservoirs. A necessary condition for successful natural fractures modeling with obtaining discrete fracture systems is the availability and interpretation in a single uniform way of the results of formation microimager logging, seismic exploration data of suitable quality and, if possible, paleoreconstruction of the geological evolution of the rock mass. In case of a lack of these data or their insufficient quality, an effective alternative may be a conceptual approach, the development and approbation of which is devoted to the article.

Aim. The purpose of this work was to analyze possible approaches to discrete fracture modeling, as well as to develop and test such an approach in the case when the use of standard methods turned out to be ineffective.

Materials and methods. Analysis of formation microimager logging and seismic exploration data allows building direct correlations of fractures parameters both for wells and making a forecast in the interwell space. In the case where the quality of available data does not allow correctly determining such dependencies and correlating fractures parameters between wells, structures and seismic attributes, a conceptual approach based on understanding the mechanism of fracture forming and propagation in ever changing geological conditions can serve as an effective alternative.

Results. The proposed approach involves developing a concept of fractures formation in a specific regional or deformation environment with its subsequent digitization and use with well information. Within the framework of this approach, an analysis of the initial data of formation microimager logging was carried out with the allocation of low-reliability intervals of interpretation and their exclusion from subsequent consideration, as well as an analysis of mud loss incidents while drilling, considering the results of 1D geomechanical modeling, to identify fractured zones bypassed by well studies. The calculated fractures parameters were stochastically distributed in the modeled area according to the distributions of fracture intensity, dip angle and strike azimuth for the previously identified petrotypes.

Conclusion. Even though the conceptual approach requires significantly more efforts and competencies both in the development of the concept itself and its digitization, and in subsequent modeling, it ultimately allowed us to build a DFN model, the reliability and predictive power of which were confirmed during multiple "blind" tests for various parameters.

Keywords: carbonate reservoir, fracturing, DFN, conceptual approach, unconventional reservoirs overpressure reservoir, complex modeling

Conflict of Interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Smirnov N.Y., Starodubov V.A., Nepop R.K. Conceptual approach to DFN modeling. PRONEFT. Professionally about oil. 2025;10(2):6–13. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-2-6-13>

Manuscript received 28.12.2024

Accepted 15.02.2025

Published 30.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

Повышение нефтегазоотдачи трещиноватых коллекторов является актуальным и перспективным направлением развития отрасли, в частности трудно извлекаемых запасов (ТРИЗ). Ситуация, когда добыча из коллекторов с преобладающей трещинной проницаемостью превышает добычу из обычных пластов с матричной проницаемостью, в настоящее время уже не является редкостью. Трещиноватые коллектора, как правило, характеризуются высокой гетерогенностью и анизотропией свойств [1], а их отличительной особенностью является зачастую низкая общая пористость и практически непроницаемая матрица. Тем не менее трещины могут увеличивать эффективную пористость и проницаемость, определяя не только анизотропию проницаемости, но и наличие ее как таковой, особенно в породах с низкой проницаемостью матрицы. Аналогичную роль могут играть и разломы, функционирующие как пути миграции флюида либо барьеры для его распространения [2]. Естественная трещиноватость характерна для карбонатных пород и играет определяющую роль при разработке карбонатных коллекторов трещиноватого и трещинно-порового типов. При моделировании таких коллекторов применение стандартных подходов, основанных на взаимосвязи пористости и проницаемости, ввиду значительной анизотропии и латеральной

изменчивости последней, малоэффективно. Кроме того, дополнительную трудность представляет прогнозирование распределения сети трещин, их геометрических размеров и раскрытости, контролируемой напряженно-деформированным состоянием горного массива, которые и определяют проницаемость и связность продуктивной толщи. В настоящее время основным инструментом при моделировании фильтрационных процессов в трещиноватой среде является модель двойной среды (пористости и проницаемости), а основной технологией (наряду с технологией CFM (Continuous Fracture Modeling) — моделирование непрерывной трещиноватости) является технология DFN (Discrete Fracture Network — система дискретных трещин).

В данной работе анализируются возможные подходы к моделированию дискретной трещиноватости и представляются два способа построения модели DFN. При традиционном подходе основное внимание уделяется прежде всего прямой корреляции выявленных по результатам микроимиджеровых исследований параметров трещиноватости со скважинными данными и сейсмическими атрибутами для их последующего распространения в объеме резервуара для последующей подачи в симулятор DFN. При отсутствии необходимых входных данных или в том случае, когда количество исследований или их качество не позволяет определить параметры трещиноватости, а также

рассчитать валидные зависимости для прямой корреляции, концептуальный подход, основанный на понимании механизма возникновения и распространения трещин в меняющихся в ходе геологической истории региона горно-геологических условиях, может служить эффективной альтернативой. Концептуальный подход требует значительно больших трудозатрат и компетенций

С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗА ТРЕЩИНОВАТОГО И ТРЕЩИННО-ПОРОВОГО ТИПОВ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРЕДЛОЖЕН ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИСКРЕТНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ОСНОВЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ МИКРОИМИДЖЕРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, АНАЛИЗА ИНЦИДЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЙ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ БУРЕНИИ И РЕЗУЛЬТАТОВ 1D ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

как при разработке самой концепции и ее оцифровке, так и при последующих расчетах и распространении свойств в пространстве. Несмотря на это, в итоге именно он позволил построить модель DFN, достоверность и прогнозная сила которой была заверена в ходе проведенных «слепых» тестов и с высокой точностью подтверждена на истории и фактах дальнейшей разработки.

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Трещиноватость, связанная с присутствующими в горном массиве структурными и литологическими неоднородностями, контактами и разломами, а также предопределенная минеральным составом пород и различными геомеханическими эффектами, является широко распространенной характеристикой геологической среды. Основная идея процесса моделирования трещиноватости состоит в том, чтобы, опираясь на представления о геологии изучаемого объекта и имеющиеся фактические данные (скважинные замеры, керновые исследования, сейсмические кубы и т.д.), определить свойства геологической среды в ячейках трехмерной сетки, которые позволяют рассчитывать проницаемость и пористость как для поровой матрицы пород, так и для трещин, а также оценить влияние трещиноватости на напряженно-деформированное состояние и его влияние на отдельные трещины. Понимание характера локализации трещин в трехмерном пространстве (например, в результате работы алгоритма выделения

разломов/трещин Ant-tracking) позволяет использовать технологию CFM и распространять в ячейках модели значения интенсивности трещиноватости. Такое распространение может осуществляться как детерминистическим способом, т.е. с использованием фактических скважинных данных, так и стохастически.

В отличие от анализа интенсивности трещиноватости (скалярная величина) в случае применения технологии CFM, технология DFN дает возможность имитировать реальные трещины и в целом систему трещиноватости геологической среды. Результатом применения этой технологии является цифровая модель сети дискретных объектов, где по определенным законам моделируются плоскости распределенных в пространстве трещин, охарактеризованных своей протяженностью, ориентацией (угол падения, азимут простирания) и раскрытостью. Создаваемые при моделировании DFN плоскости трещин позволяют учитывать пространственные соотношения свойств в соседних ячейках сетки и рассчитывать коллекторские свойства пласта с учетом их пространственной анизотропии. Такой подход дает понимание особенностей геологического строения коллектора, увязанного с геометрией реальной сети трещин, и позволяет проводить гидродинамическое моделирование связности резервуара (с учетом геологических и геофизических данных, а также данных о добыче и испытаниях скважин). Отметим, что моделирование DFN может базироваться на результатах непосредственного картирования трещин (так называемое геологическое моделирование DFN по [3]), на статистическом подходе к моделированию параметров трещиноватости (или же стохастическое моделирование DFN) и на концептуальном анализе процесса трещинообразования (геомеханическое моделирование DFN по [3]).

Под геологическим картированием подразумевается анализ трещиноватости в естественных обнажениях скальных пород или искусственно вскрытых разрезах (скважинах, карьерах и т.д.). Результаты такого анализа дают более глубокое понимание механизма трещинообразования [4], а оцифровка возникающей системы естественных трещин на объектах аналогов позволяет проводить численное моделирование DFN и дальнейшее моделирование фильтрационных потоков [5, 6].

Появление и развитие стохастического (или геостатистического) подхода к моделированию DFN в 1980-х годах [7, 8], помимо развития вычислительной техники, было связано

прежде всего со сложностью получения полноценной информации о трехмерных системах естественных трещин на реальных природных объектах. В основе геостатистического подхода лежала идея о представлении различных параметров трещиноватости (таких, как положение трещин, их ориентация, размер и т.д.) в виде случайных величин с заданными распределениями вероятностей. По сути, задача построения сети дискретных трещин при таком подходе решалась в вероятностном ключе, когда реальная физическая система является одной из возможных статистических реализаций. При этом для получения достоверного результата должно обеспечиваться достаточное количество моделируемых реализаций. Как показывает практика, использование результатов геологического картирования реальной трещиноватости (например, интерпретация имиджей FMI) существенно повышает точность стохастического моделирования, а при решении практических задач, требующих калибровки и заверки стохастических моделей DFN, такой подход, наряду с анализом результатов гидродинамических испытаний, является необходимым [9]. Несмотря на вероятностный характер стохастического подхода, это обстоятельство можно рассматривать и в качестве преимущества, т.к. при анализе сложных геологических объектов в условиях недостатка информации неизбежна неопределенность получаемых результатов, для которых однозначные прогнозы на основе детерминистических методов могут быть более рискованными [10].

Заметим, что понимание механизма образования и развития трещин в меняющихся горно-геологических условиях дает возможность строить геомеханически обоснованные модели DFN. В основе таких построений лежит математическое моделирование геологических процессов и эволюции сети трещин как геометрический отклик на изменение напряженно-деформированного состояния горного массива, на протяжении всей геологической истории региона, определяемой в результате проводимых палеоре-конструкций. В настоящее время разработан целый ряд численных методов, позволяющих моделировать изменяющееся поле напряжений, вызывающее зарождение, распространение и слияние дискретных трещин [11, 12]. Преимуществом геомеханического моделирования DFN является непосредственная увязка геометрии и топологии сети трещин с условиями их формирования. С другой стороны, меняющиеся горно-геологические условия не всегда могут быть достоверно

определены при проведении палеоре-конструкций. Невозможность проведения точного математического моделирования различных природных процессов (тектонических, гидрологических, термических, химических и т.д.), действующих в горном массиве на протяжении всей его эволюции, приводит к неизбежным упрощениям и погрешностям в создании моделей трещин, соответствующих реальным системам.

ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Моделирование трещиноватости представляет собой многоэтапный итерационный процесс, охватывающий несколько смежных дисциплин (**рис. 1**). Важными составляющими этого процесса являются:

- Анализ разномасштабной геолого-геофизической информации, включая данные по месторождениям аналогам и естественным обнажениям, результаты которого дают представление о механизме и факторах трещинообразования.
- Анализ индикаторов трещиноватости на естественных обнажениях, месторождениях аналогам или по скважинным данным, с целью оценки параметров трещин (интенсивность, ориентация, раскрытость и т.д.). В ходе такого анализа могут быть задействованы параметры трещиноватости, заимствованные с месторождений аналогов, изученные на естественных обнажениях или на извлеченном из скважины керне. Информация о трещиноватости может быть получена при проведении в скважине микроимиджеровых исследований, сейсмоакустического зондирования или геофизических исследований скважин (ГИС). Дополнительными источниками такой информации могут быть результаты структурного анализа, оценки текстурной кавернозности и т.д.
- Промежуточное стохастическое моделирование непрерывных параметров (интенсивность трещин — CFM) и создание куба интенсивности трещин.
- Моделирование сети дискретных трещин, которая, по сути, представляет собой пространственную «статистическую сборку» выявленных на отдельных объектах закономерностей трещиноватости. В качестве таких объектов в зависимости от используемого подхода могут выступать отдельные скважины, месторождения-аналог, концепция трещинообразования и т.д., а само моделирование проводится в симуляторе DFN, генерирующем трехмерное

распределение трещин с определенными характеристиками.

Таким образом, при моделировании трещиноватости могут быть задействованы все обозначенные выше методы — геологическое картирование трещин, стохастическое моделирование параметров трещиноватости и концептуальный анализ процесса трещинообразования. При этом традиционный подход к построению модели DFN подразумевает расчет прямых зависимостей параметров трещиноватости по скважинным данным, прежде всего по результатам микроимджеровых исследований, и их последующей корреляции между скважинами, структурами и сейсмическими атрибутами. При традиционном подходе концептуальные представления о процессе трещинообразования во многом играют вспомогательную роль. Наличие таких представлений во многом облегчает поиск зависимостей и позволяет верифицировать получаемые результаты. Однако в случае невозможности прямого расчета корреляционных зависимостей концептуальный подход из вспомогательного становится основным методом построения корректной модели DFN. При его реализации, помимо разработки самой концепции и ее обоснования, необходимо провести оцифровку концепции на имеющихся данных, построить на ее основе модель дискретной сети трещин и провести настройку и верификацию этой модели с использованием всего массива имеющейся информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При моделировании DFN изначально был задействован стандартный (прямой) подход, который подразумевал использование данных индикаторов трещиноватости по данным ГИС и результатам обработки сейсмической съемки. С учетом того, что на месторождении проведены микроимджеровые исследования, корректная интерпретация которых позволяла бы получить информацию о положении трещин, их ориентации и раскрытости, такой подход выглядел наиболее эффективным и вполне перспективным. Однако детальный анализ имевшихся данных не выявил валидных зависимостей, которые можно было бы использовать при моделировании трещиноватости. Такой результат означал не отсутствие как таковых связей между различными физическими величинами, а лишь недостаточное качество данных, определяющее невозможность расчета корреляционных зависимостей.

В сложившейся ситуации реализация прямого подхода требовала улучшения качества входных данных за счет, прежде всего, переобработки данных сейсморазведки и переинтерпретации в едином ключе данных микроимджеровых исследований, проведенных различными специалистами и приборами. В условиях отсутствия результатов обозначенных исследований для завершения моделирования трещиноватости был произведен поиск месторождений аналогов и анализ данных о трещиноватости на этих

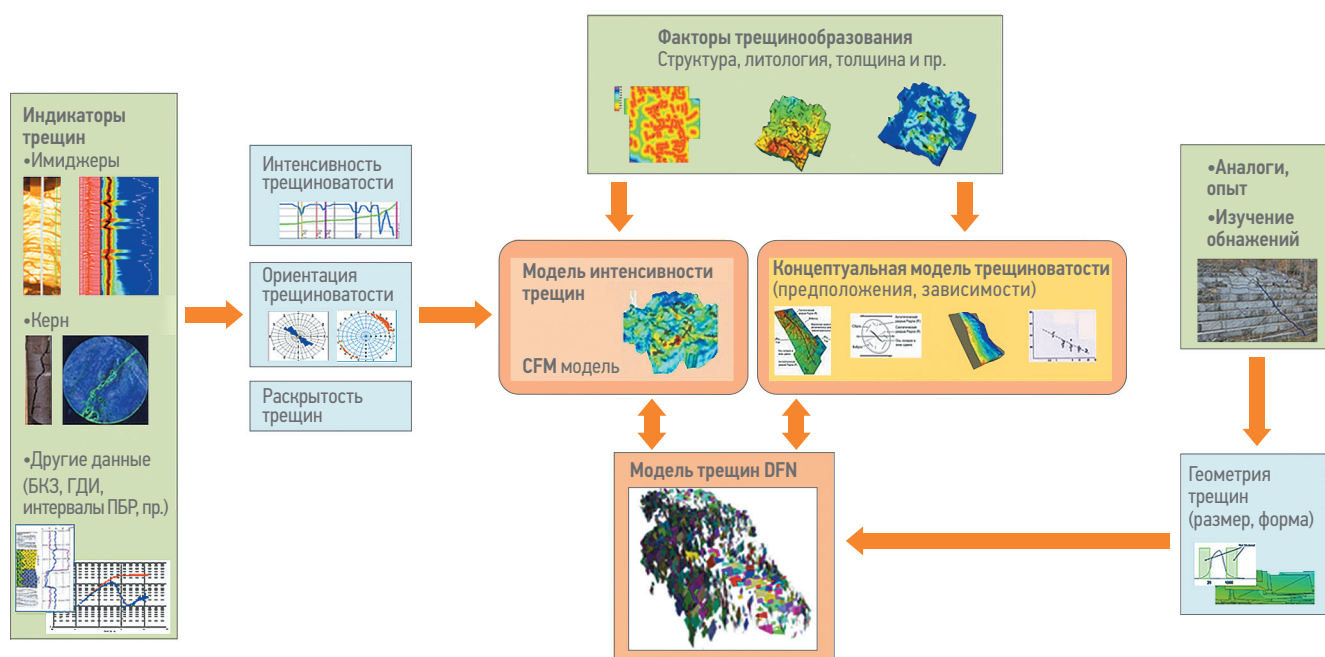


Рис. 1. Общая схема процесса моделирования трещиноватости. Составлено авторами
Fig. 1. General scheme of the fracturing modeling process. Prepared by the authors

месторождениях, что в итоге позволило построить модель DFN. Альтернативой и дополнением к данному подходу могло стать проведение палеореконокструкций образования структуры с привязкой к зонам деформации тех или иных признаков наличия трещиноватости. Но, как уже было отмечено выше, проведение точного математического моделирования природных процессов (тектонических, гидрологических, термических, химических и т.д.), действующих в горном массиве на протяжении всей его эволюции, задача крайне сложная и неоднозначная.

Другим альтернативным подходом к моделированию DFN в данной ситуации являлся концептуальный подход, подразумевавший анализ механизма образования и развития трещин в ответ на изменение напряженно-деформированного состояния горного массива на протяжении всей геологической истории региона. Отметим, что при разработке концепции, как правило, постулируются общепринятые истины. При кажущейся простоте и очевидности таких постулатов для реализации концептуального подхода необходимо экспертное видение и глубокое понимание процессов, контролирующих трещиноватость, что в конечном счете требует значительных трудозатрат и компетенций. В рамках построения модели DFN проведена масштабная работа по разработке простой и очевидной (концептуальной) модели формирования структуры на месторождении. Проведен анализ исходных данных микроимиджеровых исследований с выделением низко достоверных зон интерпретации и их исключением из последующего рассмотрения как альтернатива переобработке данных в едином ключе, а также анализ интервалов поглощений с учетом результатов 1D геомеханического моделирования. Полученные результаты позволили предложить базовую концепцию трещиноватости для данной структуры. Основными постулатами этой концептуальной модели стало представление о наличии складки с двумя осями — основной и второстепенной.

Исходя из этого, трещиноватость рассматриваемой области относится к купольной части месторождения и зонам локальной кривизны структуры, а направление простирания трещин соотносится с простиранием зон основной и локальной кривизны структуры. При этом раскрытость трещин и их проницаемость определяется направлениями и значениями главных напряжений, действующих в массиве на каждую из плоскостей трещин. Далее решалась задача оцифровки разработанной концептуальной модели, что позволило численно рассчитать параметры

трещиноватости. Для того чтобы охарактеризовать свойства в межскважинном пространстве, построены кубы кривизны структуры (рис. 2), отражающие два ее основных свойства.

Первым свойством стал азимут простирания, который контролирует направление простирания трещин; вторым — интенсивность кривизны, определяемой расстоянием до оси складки, с учетом ее принадлежности к основной или второстепенной складке. Также были привязаны углы падения с настройкой на скважинные данные. Распространение свойств в межскважинном пространстве осуществлялось стохастическими методами согласно распределениям интенсивности трещин, угла наклона и азимута простирания для ранее выделенных петротипов по зонам модели. В результате

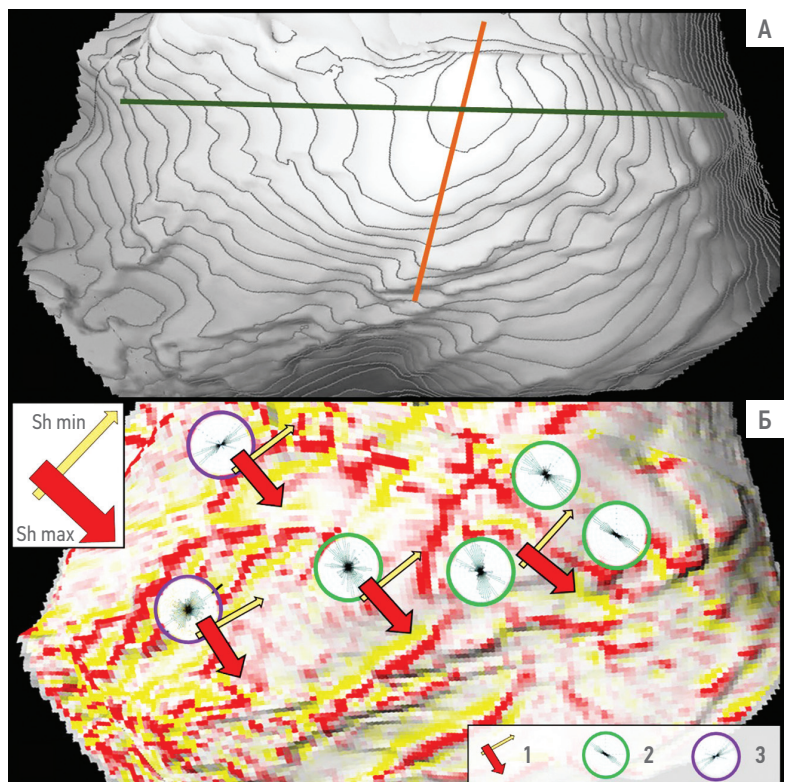


Рис. 2. Реализация концептуального подхода на практике. Структурная модель (панель А) с направлениями основной (зеленая линия) и вторичной (коричневая линия) осей деформации и результаты моделирования (панель Б). Максимальная интенсивность трещиноватости приурочена к зоне максимальной кривизны. Рассчитываемый в процессе моделирования DFN куб кривизны (панель Б) используется в дальнейшем в качестве тренда для распространения параметров трещин в пространстве. Цифрами обозначены: 1 — направление основных стрессов и ориентация трещин (2, 3) по скважинным данным, где 2 — скважины с преимущественно закрытыми и 3 — открытыми трещинами. Составлено авторами

Fig. 2. Implementation of the conceptual approach in practice. Structural model (panel A) with directions of the primary (green line) and secondary (brown line) deformation axes and simulation results (panel B). Maximum fracturing intensity is confined to the zone of maximum curvature. The curvature cube calculated during DFN simulation (panel B) is further used as a trend for the propagation of fracture parameters. The numbers indicate: 1 — direction of the main stresses and orientation of fractures (2, 3) according to well data, where 2 — wells with predominantly closed and 3 — predominantly open fractures. Prepared by the authors

построены кубы основных атрибутов, такие как раскрытость трещин, угол и азимут наклона трещины, обусловленный ее простиранием, кубы концентрации, формы и длины трещин, и проведены дальнейшие расчеты в DFN-симуляторе. Достоверность и прогнозная сила построенной модели DFN заверена в ходе проведенных «слепых» тестов и сравнении результатов с фактическими поглощениями при бурении и результатами добычи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ возможных подходов (геологическое картирование, стохастический анализ и геомеханический подход) к моделированию дискретной трещиноватости обозначил сильные стороны и ограничения каждого из них. Так, геологическое картирование трещиноватости на естественных обнажениях является детерминистическим подходом и дает представление о реальных природных объектах. Ограничения такого подхода связаны с отличающимися от реальных пластовых условиями залегания, масштабом и разрешением проводимых измерений, а также со сложностью моделирования свойств в объеме.

Стохастический подход к определению параметров трещиноватости, сочетая в себе относительную простоту и эффективность генерируемой сети трещин (одинаково применимых как для 3D-моделей, так и для разномасштабных моделей), подвержен чрезмерному упрощению геометрии и топологии трещин, а также сложностью определения статистических параметров. Кроме того, он требует множественных реализаций и зачастую оставляет без должного внимания физические процессы, контролирующие трещинообразование.

Построение модели сети дискретных трещин с использованием геомеханического подхода позволяет рассчитывать параметры трещин с учетом механических свойств пород в условиях меняющегося напряженно-деформированного состояния горного массива на протяжении всей геологической истории региона. Проводимые палеореконструкции и разработка концепции трещинообразования учитывают определяющее влияние основных природных процессов и механизмов возникновения и развития трещин, а также корреляцию между различными параметрами (атрибутами) трещин. Тем не менее геомеханический подход чувствителен к неопределенности исходных данных,

параметров геологической среды и тектонических условий. Кроме того, он требует значительно больших компетенций и трудозатрат, а также не учитывает влияние некоторых процессов (гидрологических, термических, химических и т.д.).

В настоящее время при моделировании DFN традиционно основное внимание уделяется, прежде всего прямой корреляции выявленных по результатам микроимиджеровых исследований параметров трещиноватости со скважинными данными и сейсмическими атрибутами. В условиях невозможности получения валидных зависимостей для расчета с использованием прямых индикаторов таких физических величин, как интенсивность трещиноватости, ориентация трещин и их раскрытость, моделирование DFN может быть выполнено на основании концептуального подхода. При реализации этого подхода была разработана и оцифрована концепция трещинообразования на месторождении, проведен анализ результатов микроимиджеровых исследований с выделением низко достоверных зон интерпретации, а также анализ буровой информации. Для скважин, где проводились исследования FMI/MCI, были рассчитаны кривые интенсивности трещиноватости. С учетом результатов 1D-моделирования полученные параметры трещиноватости стохастически распространялись в моделируемой области. Проведенные исследования позволили создать дискретную модель трещиноватости, заверенную результатами слепых тестов. Доказанная прогнозная сила модели позволяет использовать ее для проведения корректного гидродинамического моделирования, заложения скважин, расчеты параметров стимуляции и оптимизации разработки в целом.

Концептуальный подход, основываясь на глубоком понимании процессов, контролирующих образование трещин, требует значительных больших трудозатрат и компетенций как при разработке самой концепции, так и при ее оцифровке и проведении последующих расчетов. Однако понимание факторов, контролирующих распределение и ориентацию трещин и разломов в продуктивном пласте, может значительно улучшить точность моделирования фильтрационных потоков, тем самым повысив эффективность работ по строительству скважины, планированию способов заканчивания, разработке подходов к проведению обработки призабойной зоны, что в конечном счете обеспечивает повышение рентабельности разработки месторождения.

Список литературы / References

1. Aguilera R. *Naturally fractured reservoirs*. Oklahoma, 2007. 215 p.
2. Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*. 1996;24(11):1025–1028.
3. Lei, Q., Latham, J.P., Tsang, C.F. The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*. 2017;85:151–176.
4. Petit J.P., Mattauer M. Palaeostress superimposition deduced from mesoscale structures in limestone: the Matelles exposure, Languedoc, France. *Journal of Structural Geology*. 1995;17(2):245–256.
5. Brown S.R., Bruhn R.L. Fluid permeability of deformable fracture networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998;103(B2):2489–2500.
6. Latham J.P., Xiang J., Belayneh M., Nick H.M., Tsang C.F., Blunt M.J. Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013;57:100–112.
7. Long J.C., Remer J.S., Wilson C.R., Witherspoon P.A. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*. 1982;18(3):645–658.
8. Andersson J., Shapiro A.M., Bear J. A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information. *Water Resources Research*. 1984;20(1):79–88.
9. Casciano C., Ruvo L., Volpi B., Masserano F. Well test simulation through Discrete Fracture Network modelling in a fractured carbonate reservoir. *Petroleum Geoscience*. 2004;10(4):331–342.
10. Herbert A.W. Modelling approaches for discrete fracture network flow analysis. In: Stephansson O, Jing L, Tsang C-F, editors. *Coupled thermohydromechanical processes of fractured media*, vol. 79. Amsterdam: Elsevier; 1996. p. 213–229.
11. Nick H.M., Paluszny A., Blunt M.J., Matthai S.K. Role of geomechanically grown fractures on dispersive transport in heterogeneous geological formations. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2011;84(5):056301.
12. Asahina D., Houseworth J.E., Birkholzer J.T., Rutqvist J., Bolander J.E. Hydro-mechanical model for wetting/drying and fracture development in geomaterials. *Computers & Geosciences*. 2014;65:13–23.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Н.Ю. Смирнов — разработка концепции, интерпретация входных данных и полученных результатов, построение модели DFN, критический анализ текста рукописи, общее руководство.

В.А. Стародубов — оцифровка концепции и построение модели DFN, анализ входных данных и полученных результатов, обсуждение и корректировка текста рукописи.

Р.К. Непоп — экспертная поддержка при разработке концепции и анализе полученных результатов, написание и критический анализ текста рукописи.

Nikolay Y. Smirnov — concept development, data interpretation, discussion of obtained results, DFN modelling, critical analysis of the manuscript, general supervision.

Vladislav A. Starodubov — concept simulation, DFN modelling, analysis of input data and obtained results, discussion and correction of the manuscript.

Roman K. Nepop — expert support in developing the concept and analyzing the results, writing and critical analysis of the manuscript.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Юрьевич Смирнов* — главный инженер, ООО «ПетроГМ»
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 2/2.
e-mail: smirnov.ny@petrogm.com

Владислав Алексеевич Стародубов — начальник отдела геомеханического моделирования инженер, ООО «ПетроГМ»

Роман Кириллович Непоп — кандидат геолого-минералогических наук, старший инженер-геомеханик, ООО «ПетроГМ»

Nikolay Y. Smirnov* — Chief engineer, PetroGM LLC
2/2, Academician Lavrentyev Ave., 630090, Novosibirsk, Russia.
e-mail: smirnov.ny@petrogm.com

Vladislav A. Starodubov — Head of geomechanical department, PetroGM LLC

Roman K. Nepop — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Senior engineer, PetroGM LLC

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author