

**Ибрагимова Алина Руслановна**, магистрант, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

**Панченко Илья Владимирович**, магистрант, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРБОНАТНОГО КОЛЛЕКТОРА. МОДЕЛЬ ДВОЙНОЙ СРЕДЫ**

**Аннотация.** В статье рассматривается подход к моделированию карбонатных коллекторов с применением модели двойной среды. Которая в свою очередь учитывает взаимодействие между пористой матрицей и трещинами. Описаны особенности карбонатных коллекторов. Их высокую геологическую сложность, которая обуславливается неоднородностью и наличием двух сред с различными фильтрационно-ёмкостными свойствами. Приведены математические основы модели. Основы базируются на уравнениях сохранения массы, а также методы её реализации в специализированных программных комплексах. Эффективность подхода подтверждена примерами применения на месторождениях Саудовской Аравии, Казахстана и Западной Сибири. Выявлены основные проблемы, такие как неоднородность коллекторов и сложность калибровки, и предложены пути их решения, включая использование геостатистических методов и интеграцию сейсмических данных. Перспективы развития связаны с внедрением новых технологий для повышения точности моделирования. Приведены ПО в которых производится моделирование двойной среды.

**Annotation.** The article examines an approach to modeling carbonate reservoirs using the dual-porosity model, which accounts for the interaction between the porous matrix and fractures. The specific features of carbonate reservoirs are described, including their high geological complexity due to heterogeneity and the presence of two media with differing filtration and capacity properties. The mathematical foundations of the model, based on mass conservation equations, are

presented, along with methods for its implementation in specialized software packages. The effectiveness of the approach is demonstrated through case studies from fields in Saudi Arabia, Kazakhstan, and Western Siberia. Key challenges, such as reservoir heterogeneity and calibration difficulties, are identified, and solutions are proposed, including the use of geostatistical methods and the integration of seismic data. Future prospects are associated with the adoption of new technologies to enhance modeling accuracy. The software used for modeling a dual environment is presented.

**Ключевые слова:** карбонатные коллекторы, модель двойной среды, пористая матрица, трещины, нефтегазовые месторождения, моделирование.

**Keywords:** carbonate reservoirs, dual-porosity model, porous matrix, fractures, oil and gas fields, modeling.

Карбонатные коллекторы находят важное место в нефтегазовой индустрии. Они обеспечивают значительную часть от общемировой добычи углеводородов. Данные коллекторы отличаются высокой геологической сложностью, так как ее включает геоподоснову в виде неоднородности и наличием двойной среды, которая в свою очередь включает сеть трещин и пористую матрицу [3, с. 37].

Было выявлено, что матрица имеет высокую пористость, но обладает низкой проницаемостью. В то время, как трещины наоборот - характеризуются низкой пористостью и высокой проницаемостью, обеспечивая основные каналы для движения флюидов. В отличие от других коллекторов, таких как песчаник, традиционные методы моделирования, которые основываются на однородной пористости, не позволяют адекватно описать такие системы [4, с. 15]. В данной статье рассматривается подход к моделированию карбонатных коллекторов с использованием модели двойной среды, позволяющий учесть взаимодействие между матрицей и трещинами для повышения точности прогнозов.

Рассматриваемый карбонатный коллектор отличается от других типов коллекторов наличием двух сред: матрицы и трещин.

Карбонатные коллекторы отличаются от других типов коллекторов наличием двух среды матрицы и среды трещины. Матрица представлена основной массой породы, где располагается основная часть запасов углеводородов, но низкая проницаемость препятствует движению флюидов.

Трещины же формируют высокопроницаемые каналы, которые обеспечивают основной поток флюида. В работе Уоррена и Рута «естественно трещиноватые коллекторы требуют подхода, учитывающего как хранение флюидов в матрице, так и их транспортировку через трещины». Для описания таких систем была разработана модель двойной среды, впервые предложенная в 1963 году [1, с. 1286].

Математическое представление модели основано на уравнениях сохранения массы для каждой среды:

$$d(\phi_m * \rho_m)/dt + \text{div}(\rho_m * u_m) = -q_{mt}$$

$$d(\phi_f * \rho_f)/dt + \text{div}(\rho_f * u_f) = q_{mt}, \text{ где}$$

$\phi_m, \phi_f$  — пористости матрицы и трещин;

$\rho_m, \rho_f$  — плотности флюида в матрице и трещинах;

$u_m, u_f$  — скорости потока;

$q_{mt}$  — коэффициент обмена между матрицей и трещинами. Было показано, что этот подход позволяет моделировать накопление флюидов в матрице и их движение через трещины, что особенно важно для карбонатных систем [1, с. 1290].

Методы, которые применяются при моделировании карбонатных коллекторов называются аналитическими и численными. Модель Уоррена-Рута, которая подходит под аналитический подход, используется для упрощенного анализа. Их применимость ограничена в силу идеализированных предположений. Метод конечных разностей и конечных элементов, именуемые численными методами, показывают более высокую точность. Двойная среда моделируется и реализуется в таких программных

обеспечениях, как Eclipse, CMG, tNavigator, INTERSECT, Petrel и др. Необходимы данные ПО, так как коллектор в них представлен двумя сетками. Одна для матрицы, вторая для трещин. Связь между ними осуществляется через коэффициент обмена, зависящий от свойств флюида и геометрии трещин.

Было проведено сравнение моделей двойной среды и двойной проницаемости, где последняя учитывает движение флюидов как в трещинах, так и в матрице. Этот подход оказывается полезным для коллекторов с частично проницаемой матрицей, что подтверждается исследованиями [2, с. 400].

Приведено несколько применений данной технологии. Эффективность данной модели, а именно модели двойной среды была продемонстрирована и протестирована на многих крупных месторождениях. На месторождении в Саудовской Аравии применение данного подхода к моделированию позволило оптимизировать добычу из-за учета влияния трещин в движении нефти.

Как отмечалось в исследовании, "модель двойной среды обеспечила точное соответствие прогнозов с фактическими данными по дебитам". Похожий результат был достигнут на месторождении Tengiz в Казахстане, где высокая трещиноватость потребовала использования этого подхода для планирования разработки. В России модель применялась на карбонатных участках Западной Сибири. Было установлено, что учет двойной среды улучшил соответствие модели данным по давлению и дебитам, что подтверждает её применимость в сложных геологических условиях [5, с. 14].

При использовании модели двойной среды возникают определенные трудности. Неоднородность карбонатных коллекторов, включая каверны и трещины различного масштаба, усложняет определение параметров модели [3, с. 40]. Также отмечается сложность в оценке коэффициента обмена, который часто подбирается путем калибровки, что вносит неопределенность. Как подчеркивалось в литературе, "точное определение обмена между матрицей и трещинами остается одной из главных проблем" [2, с. 402].

Для того, чтобы преодолеть и решить ряд трудностей применяются такие методы, как геостатистические и интеграция сейсмических данных [4, с. 20]. В текущее время разработаются гибридные подходы, которые сочетают в себе модель двойной среды с дискретным моделированием трещин. Но такие методы требуют на ряд выше вычислительных ресурсов.

В заключении необходимо отметить, что модель двойной среды остается важным и одним из ключевых инструментов для моделирования карбонатных коллекторов. Она позволяет учитывать взаимодействие между матрицей и трещинами. Было продемонстрировано, что несмотря на проблемы, такие как неоднородность и сложность калибровки, данный подход обеспечивает высокую точность прогнозов в ходе устранения ряда сложностей. Перспективы развития связаны с интеграцией новых технологий, что позволит повысить эффективность моделирования в будущем.

### Список литературы

1. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Основные понятия теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Журнал прикладной математики и механики. 1960. Т. 24. № 5. С. 1286-1303.
2. Лысенко В.Д. Разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 2003. 512 с.
3. Митрофанов В.П., Злобин А.А., Бейзман В.Б. О кавернозности карбонатных продуктивных // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2002. – С. 37-43.
4. Михайлов А.Е., Шершуков В.В., Успенский Е.П. и др. Лабораторные работы по структурной геологии, геокартированию и дистанционным методам. – М.: Недра, 1988. – 218 с.
5. Мухаметзянов Р.Н., Соколов Е.П., Зощенко Н.А. и др. Перспективы разработки залежей углеводородов в карбонатных трещиноватых коллекторах Восточной Сибири (на примере Юрубчено-Тохомской зоны

нефтегазонакопления) // Минеральные ресурсы России. – 2023. – № 3. – С. 12-18.

1.