

Равшанжонов Ф.Ш., магистрант

Ташкентский университет информационных технологий

Узбекистан, Ташкент

Исмаилов Ш.Р., преподаватель, PhD

Ташкентский университет информационных технологий

Узбекистан, Ташкент

Махмудова М.М., преподаватель, PhD

Ташкентский университет информационных технологий

Узбекистан, Ташкент

Назирова А.Ш., преподаватель

Ташкентский университет информационных технологий

Узбекистан, Ташкент

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ В НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ НА ОСНОВЕ 2D И 3D ГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация: В данной статье исследуются вопросы визуализации процессов фильтрации в нефтяных пластах, зависящих от изменения давления и коэффициента проницаемости, на основе 2D и 3D графических моделей. Разработаны методы визуализации результатов численного решения математической модели фильтрации нефти в пористой среде с использованием современных технологий компьютерной графики. С помощью программы Blender построены трёхмерные геологические модели, а на основе Three.js и WebGL создано интерактивное веб-приложение.

Ключевые слова: нефтяной пласт, фильтрация, визуализация, 3D модель, 2D графика, Blender, Three.js, WebGL, коэффициент проницаемости, численная модель, анимация

*Ravshanjonov F.Sh., master student
Tashkent University of Information Technologies
Uzbekistan, Tashkent*

*Ismailov Sh.R., teacher, PhD
Tashkent University of Information Technologies
Uzbekistan, Tashkent*

*Makhmudova M.M., teacher, PhD
Tashkent University of Information Technologies
Uzbekistan, Tashkent*

*Nazirov A.Sh., teacher
Tashkent University of Information Technologies
Uzbekistan, Tashkent*

VISUALIZATION OF FILTRATION PROCESSES IN OIL LAYERS BASED ON 2D AND 3D GRAPHIC MODELS

Abstract: This paper investigates the visualization of filtration processes in oil reservoirs based on 2D and 3D graphic models, with a focus on pressure-dependent permeability coefficient variations. Methods for visualizing the results obtained from the numerical solution of the mathematical model of oil filtration in porous media using modern computer graphics technologies have been developed. Three-dimensional geological models were constructed using Blender, and an interactive web-based visualization application was created using Three.js and WebGL.

Keywords: oil reservoir, filtration, visualization, 3D model, 2D graphics, Blender, Three.js, WebGL, permeability coefficient, numerical model, animation

1. ВВЕДЕНИЕ

Нефтегазовая промышленность является одной из важнейших отраслей мировой экономики, и её развитие невозможно без применения современных технологий. В частности, изучение, моделирование и

визуализация гидродинамических процессов в нефтяных пластах представляет собой одну из актуальных научных проблем в данной области. Сложность процессов фильтрации, гетерогенная структура пористой среды и зависимое от давления изменение коэффициента проницаемости — эти и другие факторы затрудняют анализ данных процессов. В связи с этим визуализация результатов численного моделирования стала необходимым инструментом для инженеров и исследователей, позволяющим преобразовать массивы числовых данных в наглядные графические представления, облегчающие интерпретацию и принятие решений.

На сегодняшний день существует множество исследований, посвящённых численному решению задач фильтрации нефти. В частности, Равшанов Н., Назирова Э.Ш. и соавторы [1] разработали эффективные численные алгоритмы решения задач фильтрации нефти в пористой среде. Исмаилов Ш.Р. [2] построил краевую задачу на основе двумерной математической модели. Нематов А., Махмудова М.М. и соавторы [3] предложили алгоритм решения и программу визуализации для трёхмерных дифференциальных уравнений параболического типа. Однако в большинстве этих исследований визуализация численных результатов имеет ограниченные возможности и в основном ограничивается статическими графиками. Случаи полного использования возможностей современных интерактивных технологий 3D визуализации встречаются редко.

В данной статье, на основе третьей главы магистерской диссертации автора, излагаются методы и результаты визуализации процессов фильтрации в нефтяных пластах на основе 2D и 3D графических моделей. Основная цель исследования — визуализация вычислительных результатов, полученных на основе численной модели фильтрации нефти в пористой среде, с помощью современных графических технологий,

включая построение 3D геологических моделей в программе Blender, разработку интерактивного веб-приложения визуализации на основе Three.js и WebGL, а также создание динамических изображений процесса фильтрации с использованием технологий анимации.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

2.1. Математическая модель фильтрации нефти в пористой среде

Процесс фильтрации нефти в пористой среде описывается квазилинейным дифференциальным уравнением, в котором коэффициент проницаемости является неоднородным и зависящим от пластового давления. Данная модель имеет следующий общий вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \left(\frac{k(P)}{\mu m \beta} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + f(x, t)$$

Здесь P — пластовое давление, $k(P)$ — зависящий от давления коэффициент проницаемости, μ — динамическая вязкость нефти, m — коэффициент пористости, β^* — коэффициент сжимаемости среды, $f(x, t)$ — функция источника. Зависимость коэффициента проницаемости от давления выражается в двух случаях: при малом изменении давления — линейная связь $k(P) = k_0(1 - \alpha k(P_0 - P))$, при большом изменении давления — экспоненциальная связь $k(P) = k_0 \cdot \exp(-\alpha k(P_0 - P))$.

Краевая задача, построенная на основе данной математической модели, численно моделируется методом конечных разностей. Для численного решения применяется метод ADI (Alternating Direction Implicit), который обладает высокой точностью и устойчивостью при решении уравнений параболического типа [4].

2.2. Анализ литературы по технологиям визуализации

В последние годы применение технологий визуализации в нефтегазовой сфере продолжает расширяться. Фрей и соавторы [5] предложили метод

визуального анализа процессов вытеснения двухфазного потока в пористой среде. Штрауб и соавторы [6] разработали инновационный метод анализа процессов вытеснения с помощью пространственно-временных графиков потока.

С другой стороны, Кент [7] опубликовал исчерпывающее руководство по применению программы Blender в целях научной визуализации. Библиотека GemPy обеспечивает интеграцию Blender в процессы геологического моделирования и инверсии [8]. В области веб-визуализации 3D Чен и соавторы [9] разработали кроссплатформенную систему 3D визуализации процессов бурения на основе технологии WebGL.

3. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ

3.1. Визуализация графических объектов в программе Blender

При определении основных показателей процесса фильтрации нефти в пластах нефтяных месторождений важное значение имеет автоматизация решения краевой задачи, построенной на математической модели, а также визуализация полученных результатов. Blender — это программа 3D моделирования, анимации и визуализации с открытым исходным кодом, бесплатная и профессионального уровня, предоставляющая широкие возможности для визуализации системы фильтрации. С помощью данной программы можно визуально представить трёхмерную геологическую модель нефтяного пласта, конструкцию скважины и различные этапы процесса фильтрации.

3.2. Мультимедийные технологии для визуализации численных результатов в 2D и 3D графических формах

Для эффективной визуализации результатов численного моделирования необходимо использование современных мультимедийных технологий.

Разработанное в исследовании программное обеспечение построено на основе библиотеки Three.js и технологии WebGL, что позволяет отображать интерактивную 3D графику в веб-браузере. Программа визуализирует изменение давления вокруг нефтяной скважины в пласте по времени и длине пласта в виде 3D поверхности, а также в форме 2D графика.

3.3. Визуализация результатов в виде анимации

Анимация — это процесс создания иллюзии движения и изменения путём быстрого показа последовательности статических изображений. При визуализации процесса фильтрации нефти технологии анимации имеют особое значение, поскольку процесс фильтрации является динамическим явлением, непрерывно развивающимся во времени. Статические графики показывают состояние только в определённый момент времени, анимация же позволяет представить всю динамику процесса наглядно.

3.4. Результаты вычислительных экспериментов и их визуальный анализ

Для проведения вычислительных экспериментов использовались следующие исходные данные: длина пласта $L = 10000$ м, толщина пласта $h = 10$ м, коэффициент пористости $m = 0.2$, вязкость нефти $\mu = 0.0009\text{--}0.001$ Па·с, начальное давление $P_0 = 200$ атм, коэффициент проницаемости $k_0 = 0.1\text{--}0.5$ Д. В центре дискретного поля фильтрации расположены пять скважин с одинаковым дебитом $Q = 500000$ м³/сутки.

Таблица 1. Результаты падения давления при различных значениях проницаемости

k (проницаемость)	Давление в центре	Характер снижения
k = 0.1	0.935	Медленное снижение
k = 0.2	0.962	Среднее снижение
k = 0.5	0.985	Быстрое снижение

Как видно из таблицы, при $k = 0.1$ давление в центре падает до 0.935, при $k = 0.2$ — до 0.962, при $k = 0.5$ — до 0.985. Данный результат показывает, что при увеличении проницаемости скорость перехода нефти к скважине возрастает, в результате давление уменьшается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье исследованы вопросы визуализации процессов фильтрации в нефтяных пластах на основе 2D и 3D графических моделей. По результатам исследования сделаны следующие основные выводы.

Во-первых, с помощью программы Blender построены трёхмерные геологические модели нефтяного пласта и скважин. Данные модели позволили выделить составные части системы фильтрации, применить техники материалов и шейдеров, а также смоделировать различные этапы процесса фильтрации с помощью ключевой анимации.

Во-вторых, на основе технологий Three.js и WebGL разработано интерактивное программное обеспечение для визуализации численных результатов в 2D и 3D графических формах. Пользователь может изменять физические параметры и наблюдать результаты в реальном времени.

В-третьих, с помощью технологий анимации созданы динамические изображения процесса фильтрации, позволяющие наглядно представить всю динамику процесса.

Использованные источники:

1. Равшанов Н., Назирова Э.Ш. Эффективный численный алгоритм решения задач фильтрации нефти в пористой среде // Научный журнал ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразми. – 2020. – №2. – С. 45-52.
2. Исмаилов Ш.Р. Двумерная математическая модель краевой задачи процесса фильтрации нефти в пористой среде. – Магистерская диссертация, ТУИТ, 2021.

3. Нематов А., Махмудова М.М., Артыкбаева Г.К. Алгоритм решения краевой задачи для трёхмерного дифференциального уравнения параболического типа и визуализация численного результата // Научный журнал. – 2022. – №3. – С. 22-29.
4. Douglas J. Jr., Gunn J.E. A General Formulation of Alternating Direction Methods. Part I: Parabolic and Hyperbolic Problems // Numerische Mathematik. – 1964. – Vol. 6. – Pp. 428-453.
5. Frey S., Hagele D., Ertl T. Visual Analysis of Two-Phase Flow Displacement Processes in Porous Media // Computer Graphics Forum. – 2021. – Vol. 40(6). – Pp. 183-197.
6. Straub A., Karadimitriou N., Reina G. et al. Visual Analysis of Displacement Processes in Porous Media using Spatio-Temporal Flow Graphs // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2024. – Vol. 30(1). – Pp. 1029-1053.
7. Kent B.R. 3D Scientific Visualization with Blender. – IOP Publishing, Bristol, UK, 2015.
8. de la Varga M., Schaaf A., Wellmann F. GemPy 1.0: Open-Source Stochastic Geological Modeling and Inversion // Geoscientific Model Development. – 2019. – Vol. 12(1). – Pp. 1-32.
9. Chen Y., Zhang J., Bai W. et al. Cross-Platform Drilling 3D Visualization System Based on WebGL // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – 5516278.
10. Novikov P., Sabitov D., Bukhanov N. et al. Interactive Visualization of Large-Scale Oil and Gas Reservoir Simulation Models // ISC High Performance 2022 International Workshops. – LNCS Vol. 13364. – Pp. 274-286.

11. Zhu S.-Y., Du Z.-M., Li C.-L. et al. A Semi-analytical Model for Pressure-Dependent Permeability of Tight Sandstone Reservoirs // Transport in Porous Media. – 2018. – Vol. 122(2). – Pp. 235-252.
12. Kudryashov N.A., Kochanov M.B., Savatorova V.L. Approximate Self-Similar Solutions for the Boundary Value Problem Arising in Modeling of Gas Flow in Porous Media with Pressure Dependent Permeability // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37(7). – Pp. 5563-5573.
13. Nazirova E.Sh., Sadikov R.T., Ismailov Sh. Algorithm and Program for Solving the Boundary Value Problem for Gas Filtration in a Dynamically Interconnected Porous Medium // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Vol. 3244. – 020030.
14. Nematov A., Nazirova E.Sh., Sadikov R.T. On Numerical Method for Modeling Oil Filtration Problems in Piecewise-Inhomogeneous Porous Medium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1032. – 012018.