

УДК 519.6

## АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ ПОРИСТОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

<sup>+</sup> Назирова Э.<sup>1</sup>, Артикбаева Г.<sup>2</sup>, Исмаилов Ш.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада  
ал-Хоразмий, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Хорезмская академия Маъмуна, Хорезм, Узбекистан

<sup>+</sup> elmira\_nazirova@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматривается разработка алгоритма и программы на основе численной модели для расчета основных параметров разработки газового месторождения с учетом изменения пористости в зависимости от давления, создание информационного массива для формирования исходных данных, необходимых для работы программы, и пользовательского интерфейса, обеспечивающего удобное взаимодействие. Кроме того, рассматривается разработка программных модулей и их структура. Решение этих задач позволит дополнительно повысить надежность расчета основных параметров, создать возможность наглядного представления численных результатов в различных графических формах и изучить процесс фильтрации.

**Ключевые слова:** алгоритм, программа, интерфейс, газ, гидродинамические параметры, пористые среды, фильтрация.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

В современном этапе развития нефтегазовой отрасли особое значение приобретает автоматизация процессов анализа и прогнозирования фильтрационных явлений в пористых средах. Автоматизированное решение краевых задач фильтрации при определении гидродинамических параметров пластов в процессе добычи газа позволяет существенно ускорить проектирование месторождений и повысить эффективность оценки фильтрационных процессов. Применение методов математического моделирования в сочетании с современными компьютерными технологиями значительно упрощает решение задач, связанных с проектированием, управлением и исследованием газовых и газоконденсатных месторождений, а также сокращает временные затраты [1-6].

В данной работе представлен метод и алгоритм численного решения задачи фильтрации газа в пористой среде, учитывающий зависимость пористости от давления. Разработанная математическая модель служит основой для комплексного анализа сложных взаимодействий между потоком газа и изменениями структуры пористой среды [5, 6].

### 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическую модель краевой задачи фильтрации газа, описывающую процесс изменения пористости в зависимости от давления, запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k(x, y)h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k(x, y)h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P^2}{\partial y} \right) = 2ahm(x, y, P) \frac{\partial P}{\partial t} - Q, \\ m = m_0 [1 + \beta_c (P - P_0)], \quad (x, y) \in G, \quad t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

Начальные и граничные условия задачи следующие:

$$P(x, y, t) = P_0(x, y), \quad t = 0, \quad (x, y) \in G, \quad (2)$$

$$\begin{cases} -k(x, y) \frac{\partial P}{\partial x} = \lambda \alpha (P_A - P), & x = 0, \quad t > 0, \\ k(x, y) \frac{\partial P}{\partial x} = \lambda \alpha (P_A - P), & x = L, \quad t > 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} -k(x, y) \frac{\partial P}{\partial y} = \lambda \alpha (P_A - P), & y = 0, \quad t > 0, \\ k(x, y) \frac{\partial P}{\partial y} = \lambda \alpha (P_A - P), & y = L, \quad t > 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$Q = \sum_{i_q=1}^{N_q} q_{i_q} \delta, \quad i_q = 1, \dots, N_q. \quad (5)$$

При решении краевой задачи непрерывная область была преобразована в сетку и решена квазилинейным методом, методом конечных разностей и итерационным методом. На основе разработанной численной модели были разработаны вычислительный алгоритм и программа [7, 8].

### 3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА

На основе разработанной выше численной модели двумерная краевая задача фильтрации газа в пористой среде сводится к двум конечно-разностным задачам (в направлениях  $x$  и  $y$ ) с использованием схемы переменных направлений и решается методом прогонки [9-11]. В каждом направлении, т.е. во временном полуслое, для функции давления используется итерационный метод.

Расчет проводится в два этапа на каждом временном слое.

Первый этап алгоритма расчета основных показателей разработки газового месторождения осуществляется путем расчета значений функции давления во временном слое  $l+0,5$  в направлении переменной  $x$ .

Первый этап. В этом случае используется метод прогонки в направлении переменной  $x$ , и расчет осуществляется следующим образом:

- рассчитывается значение коэффициента пористости для нового временного слоя;
- определяются (рассчитываются) коэффициенты конечно-разностного уравнения  $a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}, d_{i,j}$  ( $i=1, 2, \dots, N-1; j=0, M$ );

- $\alpha_{0,j}, \beta_{0,j}$  начальные значения коэффициентов метода прогонки определяются из граничных условий левой части дискретной области фильтрации

$$\alpha_{0,j} = \frac{b_{1,j} - 4c_{1,j}}{a_{1,j} - (3 - 2\Delta x)c_{1,j}}, \quad \beta_{0,j} = \frac{d_{1,j}}{a_{1,j} - (3 - 2\Delta x)c_{1,j}};$$

- $\alpha_{i,j}$  и  $\beta_{i,j}$  ( $i=1, 2, \dots, N-1$ ) - значения коэффициентов метода прогонки вычисляются

$$\alpha_{i,j} = \frac{c_{i,j}}{b_{i,j} + a_{i,j}\alpha_{i-1,j-1}}, \quad \beta_{i,j} = \frac{a_{i,j}\beta_{i-1,j-1} + d_{i,j}}{b_{i,j} + a_{i,j}\alpha_{i-1,j-1}};$$

- $\bar{P}_{N,j}$  - конечное значение функции давления определяется с использованием граничных условий правой части дискретной области фильтрации  $\bar{P}_{N,j} = \frac{(d_{N,j} + a_{N,j}\beta_{N-1,j})}{(b_{N,j} - \alpha_{N-1,j}a_{N,j})}$ ;

- $\bar{P}_{i,j}$  значения функции давления вычисляются в обратном направлении методом прогонки  $\bar{P}_{i,j} = \alpha_{i,j}\bar{P}_{i+1,j} + \beta_{i,j}$ .

Второй этап алгоритма выполняется аналогично, по направлению переменной  $y$ , на интервалах  $l+1$  временного слоя.

- итерационный процесс по функции давления продолжается до тех пор, пока не выполнится следующее условие  $|P_{ij}^{(s)} - P_{ij}^{(s-1)}| \leq \varepsilon$ , если условие не выполняется, то последующие итерации этапа повторяются снова.

Алгоритмы первого и второго этапов повторяются на каждом временном слое. При этом каждое полученное решение служит начальным условием для следующего временного шага. Блок-схема алгоритма численного решения представлена на рис.1-2.

Программа решения задачи фильтрации газовых месторождений с изменением пористости в зависимости от давления ускоряет проведение вычислительных экспериментов по ключевым показателям при исследовании нестационарных процессов фильтрации газа в пористых средах. Использование данной системы повышает эффективность разработки газовых месторождений, а также позволяет ускорить проектирование месторождений в разработку.

Программа состоит из набора модулей, специализированных на решении задач отдельного класса. Программа на основе предоставленных исходных данных управляет программами, учитывающими специфику конкретной задачи, обеспечивает автоматизированный выбор её оптимального решения и гарантирует качество получаемого решения. Она также обеспечивает удобство взаимодействия пользователя с системой, ускоряет обработку и расчёты [12-14].

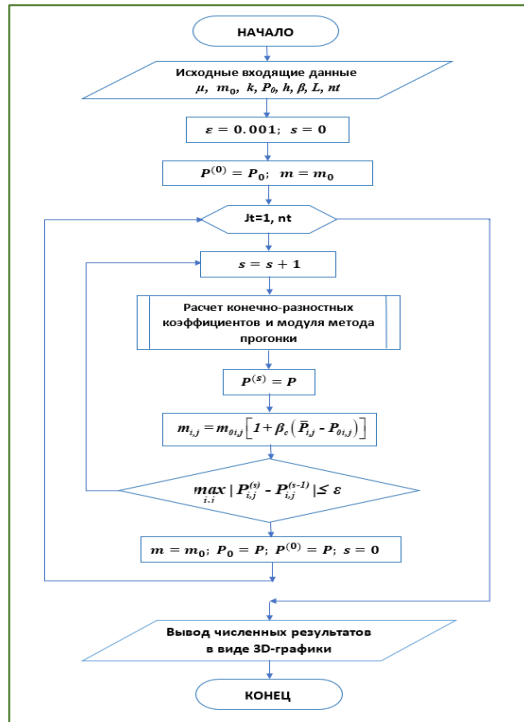


Рис. 1. Блок (Структурная) схема алгоритма расчета основных показателей при разработке газового месторождения

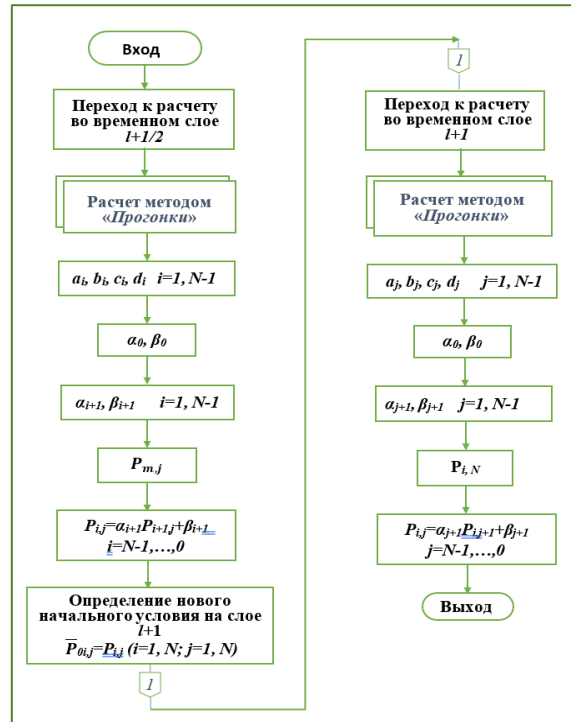


Рис. 2. Блок (Структурная) схема алгоритма расчета конечно-разностных коэффициентов и модуля метода прогонки

Функциональная схема разработанной программы представлена на рисунке 3. Она отображает связи между модулями решения двумерных краевых задач в однослойных и двухслойных пористых средах. Она состоит из блоков формирования и предоставления исходных данных для работы программы, выполнения расчётов, а также хранения и вывода результатов расчётов.

Блок задачи взаимодействует со своим блоком модулей для получения исходных данных.

Блок модулей ввода исходных данных включает в себя следующие модули:

- модуль формирования исходных данных о параметрах пласта;
- модуль формирования информационного массива о конфигурации дискретного фильтрационного поля;
- модуль формирования информационного массива о пористости пласта;
- модуль формирования информационного массива о высоте пласта;
- модуль формирования информационного массива о дебитах и координатах скважин.

Решение каждой задачи начинается с расчетного блока. Этот блок содержит основные показатели, модулями которого являются:

- расчет коэффициентов конечно-разностного уравнения;
- реализация квазилинейного метода;
- реализация итерационного метода;
- реализация метода конечных разностей (в прогоночном методе).

Блок реализации расчёта работает совместно с блоком хранения и вывода результатов. Блок хранения и вывода результатов содержит модули хранения и визуализации результатов вычислительного эксперимента. Они выполняют следующие задачи:

- модуль отображения результатов эксперимента в виде анимации;
- модуль отображения результатов эксперимента в трёхмерной графике;
- модуль отображения результатов эксперимента в виде контурной графики;
- модуль отображения местоположения скважин в дискретной области.



**Рис. 3.** Функциональная схема программы для анализа и прогнозирования процесса фильтрации газа

Программа состоит из двух расчетных модулей и модуля руководства пользователем. Расчетный модуль 1 предназначен для расчета изменения коэффициента пористости вследствие изменения давления в однослойных и двумерных задачах фильтрации газа.

1) Ввод основных параметров, используемых для расчета изменения коэффициента пористости вследствие изменения давления в однослойных и двумерных задачах фильтрации газа;

2) После автоматического создания дискретной сеточной области на основе введенных основных параметров программа реконструирует эту сеточную область на основе массива информации и выделяет рассматриваемую для расчета область, отображая форму области, указанную пользователем в интерфейсе, и местоположение скважин, при этом дебит скважин вводится на основе последовательности указания точек их расположения;

3) Указание точек расположения газовых скважин в выделяемой области (координаты указанных точек автоматически подставляются в интерфейс программы);

4) выберите основной параметр для визуализации, при этом рассматриваются 2 варианта: визуализация по изменению коэффициента пористости в пласте и визуализация по изменению давления в пласте;

5) выберите тип визуализации, при котором результат расчёта может быть представлен в виде анимации, трёхмерного графика и контурного графика;

6) выполните расчёт, после завершения расчёта в интерфейсе программы будет сформирован график или анимация на основе выбора в четвёртом и пятом пунктах по результатам расчёта.

7) Сохраните результаты расчёта, при этом сохранённые данные сохраняются с расширением .tag и с именем текущей даты и времени (Calc-hh.mm.ss-dd.mm.yyyy), если данные содержат изображения (.png) или анимации (.gif) и текстовые данные (.txt).

Модуль расчета 2 рассматривает задачу расчета изменения коэффициента пористости вследствие изменения давления в задачах двухслойной и двумерной фильтрации газа. Данный модуль имеет те же функциональные задачи и возможности, что и модуль 1, отличаясь лишь основными входными параметрами, используемыми в данной задаче.

Работа с программой осуществляется следующим образом:

- Выбор задачи.
- Подготовка исходных данных.
- Запуск программы.
- Просмотр и сохранение результатов работы программы в визуальном и числовом виде.
- Выход из системы.

Для решения задачи пользователь подготавливает исходные данные для выбранной задачи. При этом пользователь создает новый файл исходных данных в каталоге хранения данных или редактирует существующий.

На следующем этапе пользователь запускает задачу, выбранную из меню «Запуск программ». После запуска конкретного блока задач на экране появляется диалоговое окно «Отображение промежуточных результатов на экране»: «Да, Нет». Для просмотра промежуточных результатов необходимо выбрать «Да». При некорректной настройке исходных данных на экране появляется сообщение «Проверьте исходные данные». После полного завершения расчётного модуля на экране появляется сообщение «Завершение решения задачи».

На заключительном этапе пользователь видит таблицу или графики распределения поля давления, а также падение давления в скважинах.

Полный результат записывается в файл «Calc.txt» каждые 90 дней. Интерфейсы программы представлены на рисунках 4 и 5 ниже.

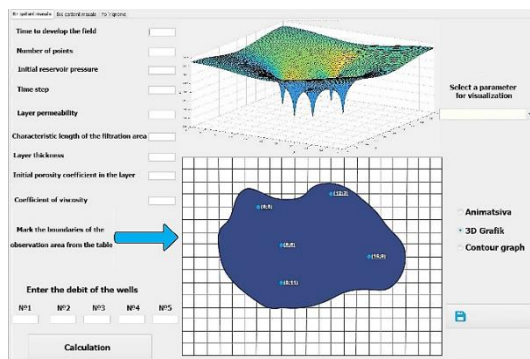


Рис. 4. Интерфейс модуля решения задачи однослойной фильтрации газа

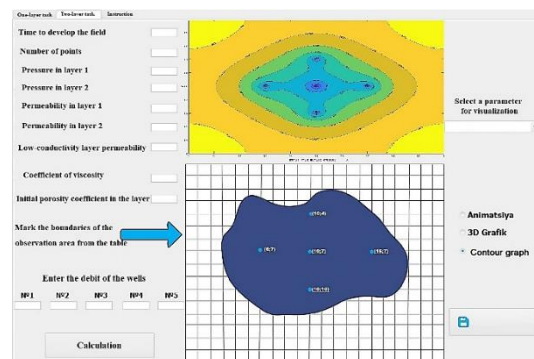


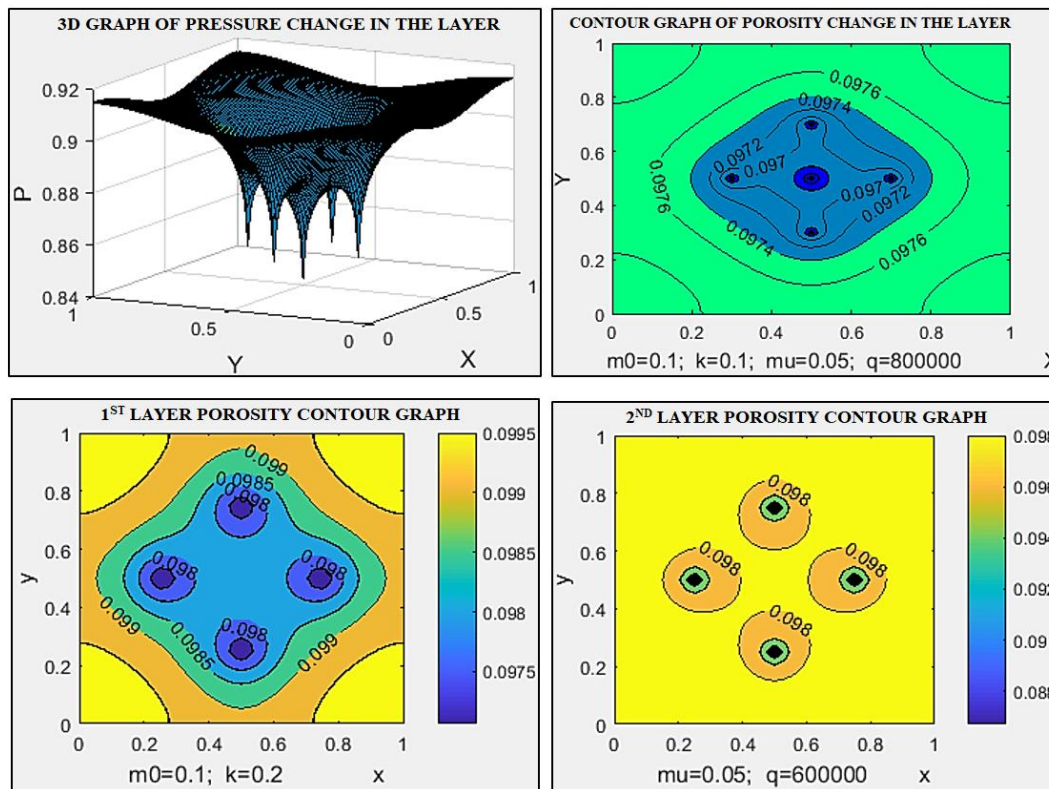
Рис. 5. Интерфейс модуля решения задачи двухслойной фильтрации газа

## 4 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Программа визуализирует численные результаты расчёта конфигурации поля фильтрации газовых месторождений простой и сложной формы в трёхмерной графике, а также сечения распределения давления и падения давления в скважинах. Наглядное представление численных результатов вычислительных экспериментов, в свою очередь, играет важную роль в визуализации процесса фильтрации, изучении гидродинамического состояния процесса их добычи в пластах газовых месторождений, особенно при проектировании, анализе и прогнозировании газовых месторождений.

Для проведения вычислительных экспериментов необходимо ввести исходные данные: время разработки скважины, давление, параметры газа – вязкость, проницаемость пласта, его размеры, а также количество скважин и их координаты, дебит скважин и начальные значения коэффициента пористости. В результате численного эксперимента составляется таблица распределения давления в пластах, для представления которой в графическом виде используются функции трёхмерной гра-

фики и анимации при использовании специальных графических систем. С их помощью подбираются необходимые графические представления. Это даёт возможность просматривать двумерные профили давления в разрезе пласта, трёхмерные графики всех процессов распределения в пласте. Кроме того, отображается падение давления в скважинах газового пласта и изменение пористости в зависимости от давления.



**Рис. 6.** Графики изменения давления и коэффициента пористости в пористых средах с 1 и 2 слоями при разработке газовых месторождений, полученные расчетным путем с использованием программного обеспечения

Для реализации анимации в программе предусмотрена функция, которая организует отображение изображения во времени или по слоям с заданным шагом. Анимация позволяет получить результаты расчётов в наглядном виде. После ввода всех входных параметров, количества скважин и выбора формы фильтрационного поля, запускается анимация с учётом времени работы газового месторождения, которая показывает изменение формы фильтрационного поля с течением времени. Кроме того, с помощью анимации можно наблюдать, как извлекается газ из скважин, как падает давление в пласте вокруг скважины.

Процесс расчета представлен графиками на рисунке 6, т.е. изменение давления в пласте в процессе фильтрации при разработке газового месторождения в течение 1080 суток. Первый график показывает 3D-график распределения давления в пласте при симметричном расположении 5 скважин. Второй график показывает контурный график распределения давления, третий график показывает изменение давления в разрезе, а четвертый график показывает падение давления в центральной скважине.

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа позволяет проводить комплексное исследование действующих и вновь вводимых в эксплуатацию газовых скважин. Обеспечивается возможность проведения вычислительных экспериментов в режиме реального времени и получения достоверной информации о месторождении. Пользователь программы сможет проводить различные вычислительные эксперименты по основным показателям при решении задач фильтрации газа в пористых средах и на основе полученных на компьютере результатов выполнять различные анализы и прогнозы, а также проводить научные исследования.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование финансировалось за счет средств Государственного бюджета Республики Узбекистан.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lopukh B.B. “Algorithmic Methods in Oil-Gas Flow Simulation”, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, vol. 42(3–4), pp.121–130.
- [2] Sergeev V.L., Nguyen T.H.P., Vu Q.D. “Models and algorithms for identification of oil and gas reservoirs by the adaptive method of deterministic pressure moments”, Dokladi TUSUR, 2018, vol. 21, N4, pp. 109-115, DOI: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-109-115
- [3] Nazirova E., Nematov A., Ismailov Sh., Artikbayeva G. “Method and Algorithm for the Numerical Solution of the Filtration Problem of Changing Porosity Depending on Gas Pressure in a Porous Medium”, AIP Conference Proceedings. Samarkand, 2024, vol. 3244, pp. 020010-1 - 020010-9.
- [4] Nematov A., Ismailov Sh., Artikbaeva G. “Numerical Simulation of the Boundary Problem of Filtration in Two-Layer Porous Media with Changing Porosity Coefficient Depending on Pressure”, IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russian Federation, 2024, pp. 920-925.
- [5] Назирова Э.Ш., Нейматов А., Исмаилов Ш., Артикбаева Г.К. «Математическое моделирование фильтрации газа с учетом изменения пористости породы в зависимости от давления». Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – №2(56). – С. 58-71.
- [6] Равшанов Н., Нейматов А., Артикбаева Г.К., Исмаилов Ш. «Математическое моделирование процесса изменения коэффициента пористости в зависимости от давления в динамически связанных газовых слоях». Проблемы механики, №3, 2024, -с. 44-57.
- [7] Zakirov S.N., Lapuk B.B. Design and development of gas fields. Nauka, Moscow, 1974, 376 p.
- [8] Bellman R. and Kalaba R. (1965) Quasilinearization and Nonlinear Boundary-Value Problems. American Elsevier Publishing Company, New York, 1965.
- [9] Ravshanov N., Nazirova E.Sh., Ne'matov A. “Mathematical model and numerical algorithm for solving problems of gas filtration in two formation porous media with a low-permeability jumper”, Journal of Problems of Computational and Applied Mathematics, 2020, vol. 3 (27). pp. 20–39.
- [10] Нейматов А., Назирова Э.Ш. «Разработка вычислительного алгоритма и программного обеспечения исследований основных показателей нефтяных месторождений на компьютере» // Проблемы вычислительной и прикладной математики. Ташкентю 2015. № 2. – С. 12-18.
- [11] Shukurova M., Nazirova E. “Development of Software Tools for the Visualization of Multiphase Filtration in Heterogeneous Porous Media”, International Journal of Petroleum and Energy Research, 2023, vol. 9(4), pp.120–129.
- [12] Ne'matov A., Mahmudova M.M., Artikbayeva G.K. “Uch o'lovli parabolik tipdagi differensial tenglamaga qo'yilgan chegaraviy masalani yechish algoritmi va sonli natijani vizuallashtirish”. TATU xabarlari. 2022, №1 (61)/64-76 b.
- [13] Nazirova E.Sh., Sadikov R.T., Ne'matov A.R., Ismailov Sh.R. “Visualization of the Results of Computing Experiments for Monitoring and Analysis of Filtration Processes in A Non-General Layer of Oil Fields”. // International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2021
- [14] Nazirova E., Shukurova M., Artikbayeva G. “Visualization of the Results of Numerical Calculations in Graphical Object View in the Design of Oil and Gas Systems”. // AIP Conference Proceedings. Samarkand. – 2024. – Vol. 3244. – P. 020014-1 - 020014-10.

Поступила в редакцию 21.04.2025

**Цитирование:** Назирова Э., Артикбаева Г., Исмаилов Ш. (2025). Алгоритм и программа решения задачи фильтрации газовых месторождений с изменением пористости в зависимости от давления. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 8(3), –С. 15-22. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v8i3.281>.

## ALGORITHM AND PROGRAM FOR SOLVING THE PROBLEM OF GAS RESERVOIR FILTRATION WITH POROSITY DEPENDENCE ON PRESSURE

<sup>+</sup> *Nazirova E.<sup>1</sup>, Artikbaeva G.<sup>2</sup>, Ismailov Sh.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Tashkent university of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup> Mamun Academy of Khorezm, Khorezm, Uzbekistan

<sup>+</sup> [elmira\\_nazirova@mail.ru](mailto:elmira_nazirova@mail.ru)

**Abstract.** This article presents the development of an algorithm and a program based on a numerical model for calculating the main parameters of gas reservoir development, taking into account the variation of porosity depending on pressure. It also discusses the creation of an information array to generate initial data required for the program operation and a user interface that ensures convenient interaction. Furthermore, the development and structure of software modules are examined. Solving these tasks will help to improve the reliability of calculating the main parameters, enable visual representation of numerical results in various graphical forms, and provide insight into the filtration process.

**Keywords:** algorithm, program, interface, gas, hydrodynamic parameters, porous media, filtration.