

Юрій ХОХА, Мирослава ЯКОВЕНКО

**ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ OPENFOAM ДЛЯ  
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МАСОТЕПЛООБМІНУ В ЗАБОЇ  
СВЕРДЛОВИНИ**

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, м. Львів,  
e-mail igggk@mail.lviv.ua

Ефективна робота бурового обладнання, особливо його робочої частини, неможлива без забезпечення достатнього охолодження та винесення залишків породи на поверхню. Із цією метою використовують бурові розчини, які мають різноманітний склад – відповідно й різні фізико-хімічні характеристики. З іншого боку, ефективність використання бурових розчинів залежить й від конструкції бурового обладнання, насамперед – долота, а також від режимів його підведення.

Таким чином можна стверджувати, що для вирішення оптимізаційних бурових задач, нам необхідно враховувати одночасно багато факторів, які можна звести до:

- геометрія долота;
- діаметри бурових колон;
- температурний розподіл по буровій рідині та робочій частині обладнання;
- гідродинаміка руху бурової рідини.

Враховуючи складність і різноманітність факторів, зазначених вище, можна стверджувати, що рішення цього завдання в аналітичній формі досягнути практично неможливо. Проте існує можливість провести розрахунок всіх параметрів системи, яка складається з бурового обладнання та бурового розчину, що рухається із заданими характеристиками, без застосування складного аналітичного апарату або ж критеріальних рівнянь, які використовуються в обмеженому діапазоні швидкостей, температур і досить чутливі до геометрії.

Таке рішення – це застосування комп'ютерного моделювання із використанням перевірених на практиці методів, таких, як метод скінчених елементів (МСЕ). Суть методу докладно описана у відповідній літературі, отже ми зупинимось на основному – його реалізації у програмному забезпеченні і засобах візуалізації отриманих результатів. Сучасна комп'ютерна індустрія пропонує чимало програмних пакетів, які використовують метод скінчених елементів для потреб науки та промисловості, наприклад широко відомий ANSYS, Solid Edge и т.д. Переважно це пропріетарне (власницьке) програмне забезпечення з високою вартістю ліцензії. Серед відкритих платформ для вільного розповсюдження нас зацікавила OpenFOAM, яка підтримується некомерційною організацією The OpenFOAM Foundation. Програма дозволяє вирішувати чимало задач з механіки суцільних середовищ, таких як: розрахунок на міцність; гідродинаміка ньютонівських та неньютонівських рідин в різноманітних наближеннях; різні моделі теплопровідності і т.д., у тому числі й проблеми, де вирішуються декілька задач одночасно.

До таких задач належить вибраний нами теплообмін в буровій рідині при її русі через робочий простір свердловини. З метою тестування OpenFOAM обрана псевдодвовимірна геометрія, що імітує вибій свердловини із введеною колоною меншого діаметру, по якій подається бурова рідина. Для перевірки отриманих результатів у якості бурової рідини вибрана вода. Лінійна швидкість подачі бурового розчину – 0,1 м/с, температура стінок забою свердловини 363,15 К, початкова температура води – 293,15 К.

Для моделювання гідродинаміки обирались різні моделі з широкого арсеналу, який надають вирішувачі (solvers). Перші моделі імітувались у ламінарному режимі руху. Встановлено, що для геометрії свердловини вони непридатні і у випадку нестационарної задачі немає збіжності. Перехід на моделі турбулентного руху дав хороші результати: як для стаціонарних, так і для нестационарних вирішувачів. Перевірка засвідчила, що з певного моменту реального часу моделі збігаються, якщо вибрані належні параметри – число Куранта, точності для розрахунку окремих біжучих змінних і т.д. З огляду на економне використання комп'ютерного часу встановлено, що застосування  $k-\epsilon$  моделі дає найкращі результати при мінімумі ітерацій. Окрім того нами випробовувались такі наближення як *RANS* (рівняння Нав'є-Стокса, усереднені за Рейнольдсом) та модель Бусінеска. Всі вони показали хороші збіжні результати.

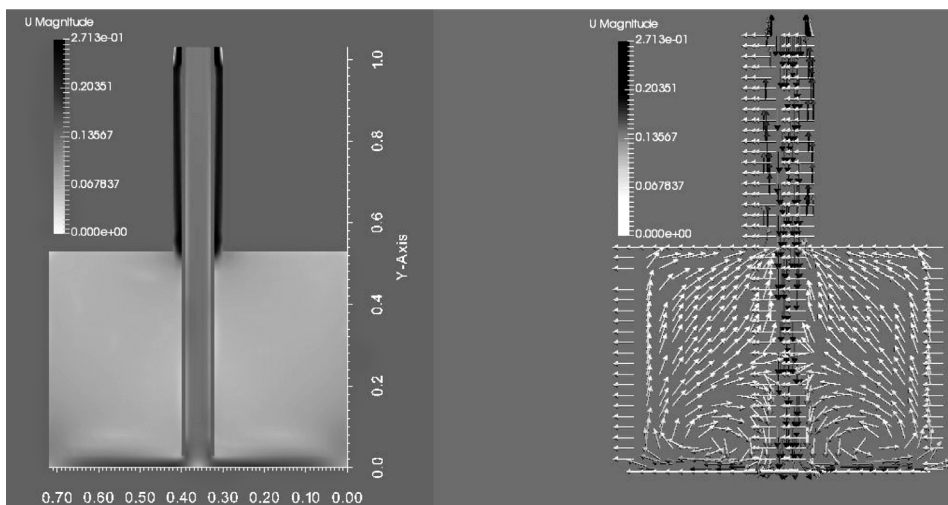


Рисунок. Візуалізація результатів, одержаних у програмному пакеті OpenFOAM за допомогою засобів ParaFOAM

Одночасне моделювання теплоперенесення проводилось за стандартним диференціальним рівнянням теплопровідності. При моделюванні враховувалась зміна термодинамічних параметрів води із зміною температури, рівняння стану взято поліноміального виду. Так само поліном був застосований й для опису залежності теплоємності, коефіцієнту теплопровідності та в'язкості від температури. Вихідні відомості для виведення коефіцієнтів поліномів взяті із бази даних NIST (National Institute of Standards and Technology, США). Візуалізація отриманих результатів проводилась засобами ParaFOAM, які надаються в стандартному пакеті програм.

Отримані результати в двох варіантах візуалізації наведені на рисунку.

Окрім наведених, зображення ParaFOAM будує графіки залежностей всіх параметрів, які обчислюються, в кожен момент часу та на будь-якому зрізі моделі. Широкі можливості по виведенню результатів у різних формах роблять цей пакет надзвичайно зручним для використання як з науковою, так і з інженерною метою.

Слід звернути увагу на недостатню ознайомленість українських фахівців з цим програмним пакетом. Доречність його застосування в наших умовах пов'язана не тільки із можливостями – в пропітарних продуктах вони не гірші, навіть дещо кращі. Основне – цей пакет абсолютно безкоштовний, та частково документований. В англomовному середовищі є декілька потужних форумів, де фахівці обговорюють деталі застосування OpenFOAM на практиці.

Таким чином можна стверджувати, що безкоштовний пакет програмного забезпечення OpenFOAM, який надає широкі можливості для моделювання геологічних завдань, цілком придатний для встановлення режимів масо- та теплообміну в забої свердловини. Окрім цього, він потенційно придатний для рішення низки суто наукових проблем – тектонічних, геофізичних і т.д. Цей продукт має відкритий код, отже кожен фахівець може його змінювати залежно від поставленої задачі. Застосування OpenFOAM допоможе зменшити витрати на розробку нового, сучасного, вітчизняного геологічного устаткування та зекономити кошти на лабораторних дослідженнях.

**Оксана ЧЕРЕМИССЬКА, Неля ЦІЖ, Мирослав ПЕТРУНЯК**

**ЛІТОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА  
ВІДКЛАДІВ БУРДИГАЛ-ЛАНГІЙСЬКОГО ЧАСУ  
КАРПАТСЬКОГО СЕГМЕНТУ ПАРАТЕТИСУ**

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, м. Львів,

e-mail: [o.chremisska@gmail.com](mailto:o.chremisska@gmail.com)

<sup>2</sup>Українське мінералогічне товариство, м. Львів,

e-mail: [miroslaw\\_p@mail.ru](mailto:miroslaw_p@mail.ru)

Осадова товща бурдигал-лангійських відкладів характеризується складними структурно-фаціальними співвідношеннями в межах Самбірської зони Передкарпатського прогину. Кореляційні побудови показують, що вирвинський і надвірнянський фаціальні комплекси, включно з відкладами балицької світи складають єдине формаційне утворення стебницької світи, яке сформувалося протягом одного тектоно-седиментаційного циклу.

Літологічний набір відкладів стебницької світи представлений наступними типами порід: конгломератами, гравелітами, пісковиками, алевролітами, туфітами, туфами, глинами, мергелями, вапняками, гіпсами та соляноглинистими брекчіями.

**Конгломерати** зустрічаються в основі розрізу світи на північному заході Передкарпатського прогину і трансгресивно залягають на поверхні сіроколірної глинистої товщі. Їх гранулометричний склад по простяганню різ-