

РЕОДИНАМІКА У ТЕХНОЛОГІЯХ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

М. А. Мислюк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

Надійшла до редакції 19.08.05

Резюме: Описано методику і пакет програм для обробки даних ротаційної віскозиметрії. Показано, що використання строгих розв'язків основного рівняння ротаційної віскозиметрії та урахування інформаційної змістовності дослідів вагомо впливають на оцінки реологічної моделі і властивостей досліджуваного середовища. Узагальнені результати реодинаміки технологій буріння свердловин.

Ключові слова: методика обробки даних ротаційної віскозиметрії, реологічно стаціонарні моделі, пакет програм, реодинаміка технологічних процесів буріння свердловин.

М. А. Мыслюк. РЕОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЯХ БУРЕНИЯ СКВАЖИН.

Резюме: Описаны методика и пакет программ для обработки данных ротационной вискозиметрии. Показано, что использование строгих решений основного уравнения ротационной вискозиметрии и учет информационной содержательности опытов существенно влияют на оценки реологической модели и свойств исследуемой среды. Обобщены результаты реодинамики технологий бурения скважин.

Ключевые слова: методика обработки данных ротационной вискозиметрии, реологически стационарные модели, пакет программ, реодинамика технологических процессов бурения.

M. A. Myslyuk. RHEODYNAMICS IN BOREHOLE DRILLING TECHNOLOGIES.

Abstract: The methodology and software application for processing data coming from the rotational viscosimetry are described. It is shown that using of exact solution of the rotational viscosimetry basic equation and consideration informational relevance of the experiments significantly influes on estimation of the rheological model and properties of researched environment. The rheodynamical results of borehole drilling technologies are generalized.

Key words: methodology of processing data coming from the rotational viscosimetry, rheologically static models, software application, rheodynamics of borehole drilling technologies.

У сучасних технологіях буріння свердловин широко застосовуються системи бурових і тампонажних розчинів, а також спеціальних технологічних рідин. Ефективність технологій буріння свердловин у значній мірі залежить від динамічних характеристик течій бурових розчинів, що накладає відповідні обмеження та потребує контролю і регулювання їх реологічних властивостей.

Наукові засади технологій буріння ґрунтуються на вивченні реологічних властивостей бурових і тампонажних розчинів, які відносяться до складних реологічних систем. У практиці буріння нафтогазових свердловин на даний час реологічні властивості визначають за даними ротаційної віскозиметрії. При цьому використовують спрощені методи обробки результатів вимірювань [1–4].

Відсутнє також належне обґрунтування вибору реологічної моделі досліджуваного середовища.

У цій статті наведено обґрунтування методики визначення реологічних властивостей за даними ротаційної віскозиметрії та узагальнені деякі результати стосовно реодинаміки технологій буріння свердловин [3, 5–10].

ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Реологічні властивості бурових і тампонажних розчинів оцінюють за даними ротаційної віскозиметрії, теоретичною основою методик обробки яких служить рівняння течії Куетта в зазорі між коаксіальними циліндрами [5, 8]

$$\omega = \frac{1}{2} \int_a^{\tau} \frac{\dot{\gamma}(\xi)}{\xi} d\xi, \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість обертання зовнішнього циліндру;

$$a = \begin{cases} \alpha^2 \tau, & \text{якщо } \tau \geq \tau_0 / \alpha^2; \\ \tau_0, & \text{якщо } \tau = [\tau_0, \tau_0 / \alpha^2]; \end{cases} \quad (2)$$

τ , a – напруження зсуву на внутрішньому і зовнішньому циліндрах; $\alpha = R_B / R_3$; R_B , R_3 – радіуси внутрішнього і зовнішнього циліндрів; τ_0 – динамічне напруження зсуву (межа текучості) рідини; $\dot{\gamma}(\cdot)$ – реологічна модель рідини.

Суть методики обробки даних віскозиметрії полягає у виборі за результатами вимірювань $\tau = \{\tau_i\}$ та $\omega = \{\omega_i\}$, $i = \overline{1, N}$ (N – кількість швидкостей обертання зовнішнього циліндра) моделі \hat{v} досліджуваної рідини із деякого апріорно відомого їх класу \mathfrak{D} і побудові оцінок \hat{a}_v реологічних властивостей. Клас \mathfrak{D} сформований із реологічно стаціонарних моделей, які допускають явний аналітичний розв'язок виду $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$.

Вважаючи, що розбіжність між вектором експериментальних вимірювань напружень зсуву τ і його теоретичним полем $A(\omega, a_v)$ адитивна, задачу обробки даних ротаційної віскозиметрії формалізовано у вигляді

$$\tau = \begin{cases} \text{або } A(\omega, a_1) + \varepsilon_1, \\ \dots \dots \dots, \\ \text{або } A(\omega, a_v) + \varepsilon_v, v \in \mathfrak{D}, \\ \dots \dots \dots, \end{cases} \quad (3)$$

де ε_v – вектор випадкової компоненти, зумовленої похибками вимірювань з нормальним законом розподілу їх ймовірностей.

Тоді процедура обробки даних ротаційної віскозиметрії буде визначатись видом матриці C коваріацій випадкової компоненти в (3). Досить цікаво розглянути випадки, коли матриця C відома з експерименту та визначає інформаційну змістовність дослідів і коли випадкова компонента центрована, стаціонарна і незалежна у всіх точках спостережень. Останній випадок пов'язаний з оперативною оцінкою реологічних властивостей при обмеженому експериментальному матеріалі і також вимагає спільного оцінювання дисперсії σ_v^2 випадкової компоненти в матриці коваріацій $C = \sigma_v^2 I$, де I – одинична матриця.

Враховуючи відзначене, алгоритм обробки даних ротаційної віскозиметрії будується на послідовному розв'язку задач оцінки вектора \hat{a}_v реологічних властивостей для кожної моделі із класу \mathfrak{D} і наступного розпізнавання індексу \hat{v} моделі. При цьому використовується принцип максимуму функції правдоподібності, який еквівалентний правилам:

$$\min_{a_v} \|C^{-1/2} (\tau - A(\omega, a_v))\| \Rightarrow \hat{a}_v, \quad \forall v \in \mathfrak{D}, \quad (4)$$

$$\min_{\mathfrak{D}} \|C^{-1/2} (\tau - A(\omega, \hat{a}_v))\| \Rightarrow \hat{v}. \quad (5)$$

В [6] наведені ефективні алгоритми побудови розв'язків задач $\tau = A(\omega, a_v)$ для деяких нелінійних в'язкопластичних рідин.

Для реологічної моделі Ньютона задача (4) розв'язується аналітично. В інших випадках реологічні властивості у відповідності до (4) визначають з використанням збіжного ітераційного процесу за О. І. Кобруновим

$$a_v^{n+1} = a_v^n + \beta_n \Phi,$$

де $\Phi = \Lambda^2 A'^*(\omega, a_v^n) C^{-1} (A(\omega, a_v^n) - \tau)$; Λ – діагональна матриця з елементами λ , які визначають апріорні середньоквадратичні відхилення a_v^n від шуканого розв'язку \hat{a}_v ; $A'(\omega, a_v^n)$ – матриця похідних; A'^* – транспонована матриця A' ; β_n – параметр релаксації, який визначається

$$\beta_n = - \frac{\langle C^{-1} (A(\omega, a_v^n) - \tau) | A'(\omega, a_v^n) \Phi \rangle}{\langle C^{-1} A'(\omega, a_v^n) \Phi | A'(\omega, a_v^n) \Phi \rangle};$$

$\langle \cdot | \cdot \rangle$ – позначення скалярного добутку.

Процедура обробки даних ротаційної віскозиметрії за (4) і (5) включає формування класу ϑ можливих моделей, побудову розв'язків задач (4) для кожної моделі, вибір із умови максимуму функції правдоподібності (5) найбільш адекватної реологічної моделі та детально описана в [5, 8].

ПАКЕТ ПРОГРАМ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ РОТАЦІЙНОЇ ВІСКОЗИМЕТРІЇ

Алгоритм (4)–(5) реалізований у пакеті програм "Реометрія" [9, 10] для обробки даних ротаційної віскозиметрії у класі ϑ моделей Ньютона, Шведова–Бінгама, Оствальда, Гершеля–Балклі та Шульмана–Кессона. Клас ϑ сформований із реологічних моделей, які в найкращій мірі описують течію бурових і тампонажних розчинів.

Для визначення реологічних властивостей використовуються такі дані:

- результати вимірювань (частоти зовнішнього обертання циліндра і кути закручування внутрішнього циліндра);
- параметри віскозиметра (відносний зазор α і постійна для переведення кута закручування у напруження зсуву);
- клас ϑ реологічних моделей, для якого здійснюється обробка даних;
- вид матриці C коваріацій випадкової компоненти (стаціонарна некорельована, нестаціонарна корельована, нестаціонарна некорельована);
- параметри алгоритму розв'язку задач (4) оцінки реологічних властивостей (задаються користувачем або приймаються за замовчуванням).

Для формування класу ϑ моделей передбачена (при бажанні користувача) побудова графічної залежності $\tau = \tau(\omega)$ за експериментальними даними.

Обернення матриці C коваріацій виконано з допомогою методу квадратного кореня, а погано обумовлені матриці C обернені з урахуванням їх регуляризації. Передбачено введення інформації про матриці C , C^{-1} та CC^{-1} .

З допомогою пакета програм можна, за бажанням користувача, одержати необхідну інформацію про результати обробки даних ротаційної віскозиметрії. Основні результати надаються у числовому і графічному вигляді:

- оцінки реологічних властивостей для кожної моделі класу ϑ ;
- середньоквадратичні відхилення і коефіцієнти кореляцій оцінок реологічних властивостей;
- величину трансформованої нев'язки за (4), або (при $C = \sigma_v^2 I$) дисперсію випадкової компоненти;
- графіки експериментальних і теоретичних (згладжених) даних $\tau = A(\omega, \hat{a}_v)$;
- дані про збіжність ітераційного процесу.

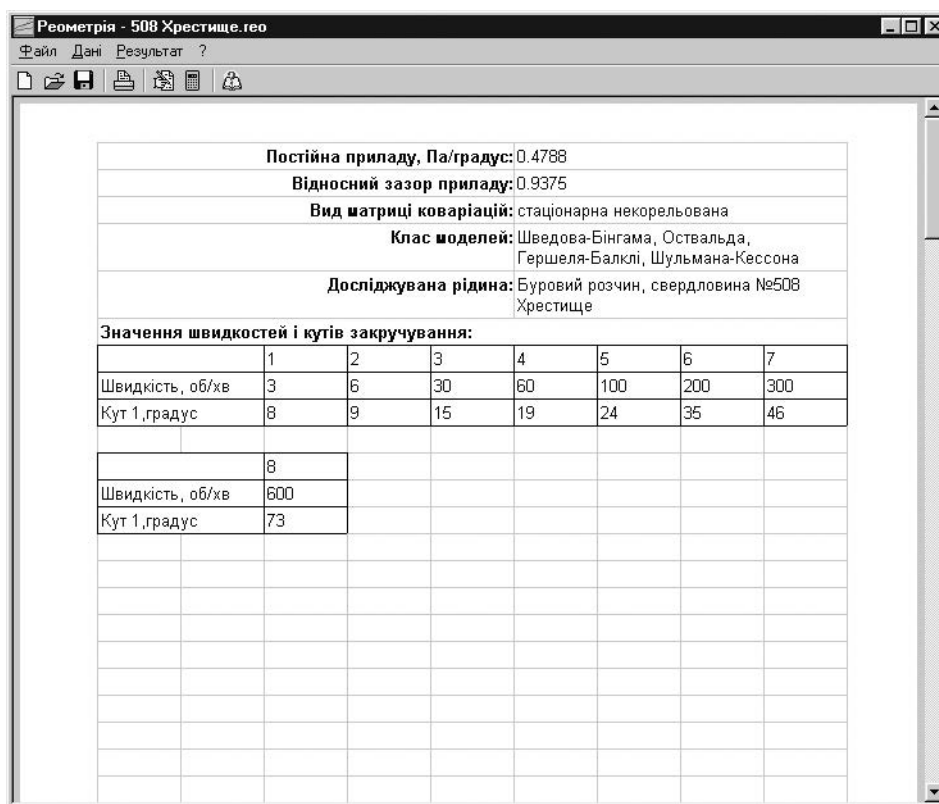


Рис. 1. Відображення вхідних даних у програмі "Реометрія"

Інформація про елементи коваріаційної матриці оцінок реологічних властивостей може бути використаною в статистичному моделюванні гідродинамічних процесів в бурінні свердловин, а також у прийнятті статистичних рішень в реометрії.

Передбачено також і розв'язок прямої задачі $\tau = A(\omega, p_v)$ ротаційної віскозиметрії для довільних поєднань вихідних даних. Результати виводяться у числовому і графічному вигляді.

Пакет програм "Реометрія" написаний на мові Object Pascal (Delphi), оформлений у вигляді виконавчого модуля і орієнтований на експлуатацію у середовищі Windows 95/98/2000/NT. Пакет програм має зручний

інтерфейс (мови спілкування з користувачем – англійська, російська і українська) і забезпечений довідковою інформацією для його експлуатації.

На рисунках 1 і 2 в якості ілюстрації наведені відображення вхідних даних реометрії та результатів їх обробки для моделі за умовою (5).

Досвід використання пакету програм "Реометрія" вказує на її цінність як у практичних задачах реотехнологій в бурінні, так і при вирішуванні задач дослідницького характеру [9, 10]. Слід відзначити, що використання єдиної методики для обробки даних ротаційної віскозиметрії є важливою метрологічною вимогою.

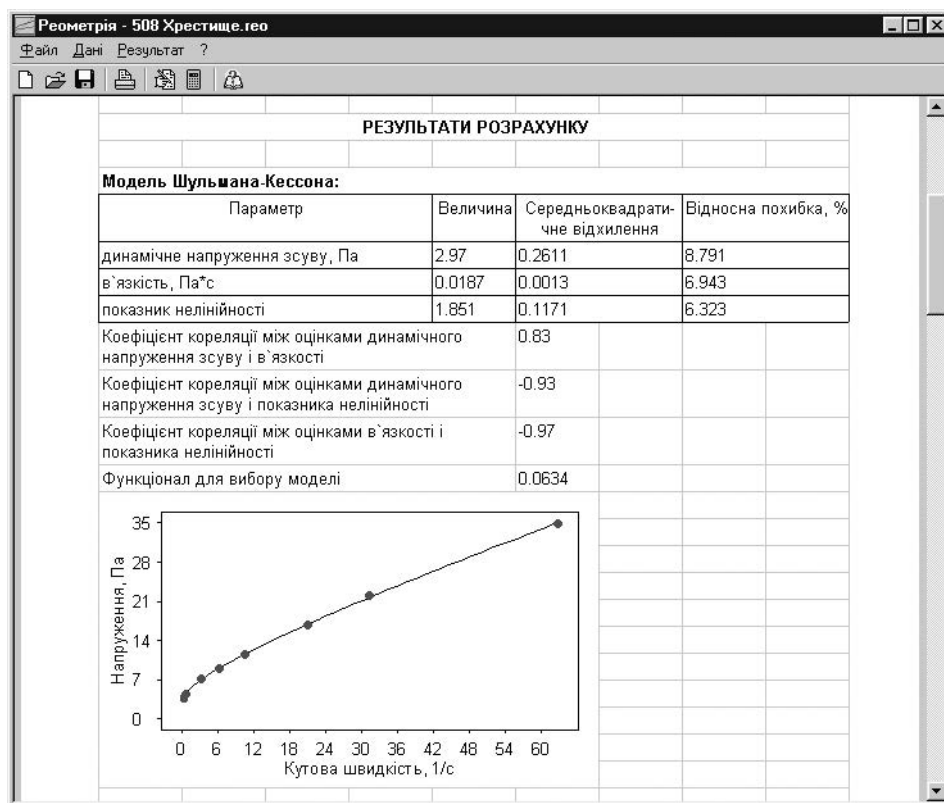


Рис. 2. Результати обробки даних реометрії

АНАЛІЗ МЕТОДИК ОБРОБКИ ДАНИХ РОТАЦІЙНОЇ ВІСКОЗИМЕТРІЇ

Інтерпретаційні можливості запропонованої методики обробки даних ротаційної віскозиметрії [8] продемонструємо порівняльним аналізом результатів обробки та впливом інформаційної змістовності дослідів (виду матриці коваріацій C) на результати оцінок реологічних властивостей.

В першому випадку скористаємось розрахунковими даними для заданих реологічної моделі і властивостей, обробка яких виконувалась за методикою з наближеним обчисленням градієнта швидкості зсуву [1, 4], методикою Д. А. Голубева [2] і методикою

М. А. Мислюка [8] при $C = \sigma^2 I$ для тих самих моделей. В таблиці 1 наведені основні результати обробки розрахункових даних.

У рядку 0 наведені теоретично розраховані напруження τ_i зсуву при кутових швидкостях ω_i (вихідні дані) для відповідної реологічної моделі v та властивостей a_v . У рядках 1–3 наведені оцінки \hat{a}_v реологічних властивостей, розрахункові значення напружень зсуву $\hat{\tau}_i$ при цих оцінках та максимальні відносні похибки оцінок реологічних властивостей δ_a і напружень δ_τ за відповідними методиками.

Із таблиці 1 випливає, що методика [8] забезпечує найбільш високу точність оціню-

Таблиця 1. Порівняльний аналіз результатів обробки змодельованих даних реометрії

| Классификация | Напряження зсуву τ_i [Па] при кутовій швидкості ω_i [с ⁻¹] | | | | Оцінки $\hat{\alpha}_i$ реологічних властивостей | Похибка, % | | |
|---------------------------|---|--------|--------|---------|--|--|------------|------------|
| | 0,02 | 2 | 10 | 20 | | 40 | δ_a | δ_t |
| Модель Шведова - Бінгама | | | | | | | | |
| 0 | 6,098 | 7,134 | 10,416 | 14,518 | 22,723 | $\tau_0 = 6$ Па, $\eta = 0,02$ Па·с | - | - |
| 1 | 6,429 | 7,380 | 10,673 | 14,801 | 23,047 | $\hat{\tau}_0 = 6,23$ Па, $\hat{\eta} = 0,0201$ Па·с | 3,83 | 5,43 |
| 2 | 6,389 | 7,335 | 10,667 | 14,831 | 23,159 | $\hat{\tau}_0 = 6,18$ Па, $\hat{\eta} = 0,0203$ Па·с | 3,00 | 4,77 |
| 3 | 6,015 | 7,052 | 10,358 | 14,490 | 22,755 | $\hat{\tau}_0 = 5,92$ Па, $\hat{\eta} = 0,0201$ Па·с | 1,33 | 1,36 |
| Модель Оствальда | | | | | | | | |
| 0 | 0,020 | 0,789 | 2,858 | 4,976 | 8,664 | $n = 0,8, k = 0,04$ Па·с ⁿ | - | - |
| 1 | 0,020 | 0,799 | 2,893 | 5,033 | 8,757 | $\hat{n} = 0,799, \hat{k} = 0,0407$ Па·с ⁿ | 1,75 | 1,22 |
| 2 | 0,010 | 0,673 | 2,962 | 5,608 | 10,618 | $\hat{n} = 0,921, \hat{k} = 0,0219$ Па·с ⁿ | 45,3 | 50,0 |
| 3 | 0,020 | 0,791 | 2,860 | 4,975 | 8,655 | $\hat{n} = 0,799, \hat{k} = 0,0403$ Па·с ⁿ | 0,75 | 0,10 |
| Модель Гершеля - Балклі | | | | | | | | |
| 0 | 6,161 | 7,491 | 10,598 | 13,775 | 19,307 | $n = 0,8, \tau_0 = 6$ Па, $k = 0,06$ Па·с ⁿ | - | - |
| 1 | 8,111 | 12,527 | 16,891 | 19,733 | 23,406 | $\hat{n} = 0,37, \hat{\tau}_0 = 6,83$ Па, $\hat{k} = 1,314$ Па·с ⁿ | 2090 | 67,23 |
| 2 | 6,470 | 7,635 | 10,657 | 14,008 | 20,175 | $\hat{n} = 0,88, \hat{\tau}_0 = 6,34$ Па, $\hat{k} = 0,037$ Па·с ⁿ | 39,1 | 5,02 |
| 3 | 6,155 | 7,493 | 10,606 | 13,782 | 19,301 | $\hat{n} = 0,797, \hat{\tau}_0 = 5,99$ Па, $\hat{k} = 0,061$ Па·с ⁿ | 1,75 | 0,10 |
| Модель Шульмана - Кессона | | | | | | | | |
| 0 | 8,157 | 16,199 | 26,166 | 33,926 | 45,547 | $n = 3,3, \tau_0 = 6$ Па, $\eta = 0,004$ Па·с | - | - |
| 1 | 10,739 | 33,797 | 72,077 | 106,689 | 164,129 | $\hat{n} = 3,0, \hat{\tau}_0 = 6,79$ Па, $\hat{\eta} = 0,055$ Па·с | 1263 | 260,1 |
| 2 | 11,290 | 18,180 | 26,362 | 32,557 | 41,652 | $\hat{n} = 3,0, \hat{\tau}_0 = 9,35$ Па, $\hat{\eta} = 0,0028$ Па·с | 55,8 | 38,4 |
| 3 | 8,333 | 16,028 | 25,876 | 33,666 | 45,471 | $\hat{n} = 3,18, \hat{\tau}_0 = 6,22$ Па, $\hat{\eta} = 0,0042$ Па·с | 3,64 | 2,16 |

Примітка: 0 - вихідні дані при $\alpha = 0,91$; 1, 2, 3 - відповідно результати обробки за методикою з наближеним визначенням градієнта швидкості зсуву $\dot{\gamma} = 2\omega/(1 - \alpha^2)$, методикою Д.А.Голубева і методикою М.А.Мислюка; $\delta_a = 100 \max|a_i - a_i|/a_i$; $\delta_t = 100 \max|\tau_i - \hat{\tau}_i|/\tau_i$

Інновації при видобуванні та транспортуванні природного газу

вання реологічних властивостей. Це очевидно, оскільки дана методика ґрунтується на строгому розв'язку основного рівняння ротаційної віскозиметрії (1). Значно важливішою є ілюстрація можливих похибок в оцінюванні реологічних властивостей нелінійних в'язкопластичних рідин з допомогою наближених методик, які можуть бути надзвичайно високими (див. табл. 1).

Результати обробки змодельованих даних реометрії показують, що еволюція похибок наближених методик [1, 2, 4] суттєво залежить від зазору віскозиметра та реологічних властивостей. При використанні методики [8] відносна похибка оцінок реологічних властивостей для нелінійних в'язкопластичних рідин звичайно не перевищує 5 ... 7 %.

Для аналізу впливу інформаційної змістовності дослідів, тобто виду матриці коваріацій C випадкової компоненти, на результати оцінок реологічних властивостей

Таблиця 2. Матриці коваріацій випадкової компоненти

| Буровий розчин | Елементи матриці C , Па ² | | | | | |
|----------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--|
| ВМКР | $2,0 \cdot 10^{-4}$ | | | | | |
| | $-1,2 \cdot 10^{-3}$ | $2,3 \cdot 10^{-2}$ | | | | |
| | $-2,1 \cdot 10^{-4}$ | $-1,1 \cdot 10^{-2}$ | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | | | |
| | $-1,7 \cdot 10^{-3}$ | $5,8 \cdot 10^{-3}$ | $3,1 \cdot 10^{-3}$ | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | | |
| | $-1,2 \cdot 10^{-3}$ | $2,4 \cdot 10^{-8}$ | $-8,4 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | $2,3 \cdot 10^{-2}$ | |
| ААР | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | | | | | |
| | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $4,5 \cdot 10^{-2}$ | | | | |
| | $2,9 \cdot 10^{-3}$ | $4,5 \cdot 10^{-2}$ | $6,3 \cdot 10^{-2}$ | | | |
| | $-5,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,9 \cdot 10^{-8}$ | $9,0 \cdot 10^{-3}$ | $7,2 \cdot 10^{-2}$ | | |
| | $-1,4 \cdot 10^{-3}$ | $-8,8 \cdot 10^{-9}$ | $-1,6 \cdot 10^{-2}$ | $-1,3 \cdot 10^{-2}$ | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | |

використані лабораторні дані ротаційної віскозиметрії для високомінералізованого калієвого (ВМКР) з добавкою 0,1 % оксигенцелюлози та алюмоакрилового (ААР) з добавкою 0,5 % аніліса бурових розчинів. Досліди виконували на віскозиметрі ВСН-3 ($\alpha = 0,91$) і для побудови матриці коваріацій використовували заміри по 5-и пробах бурового розчину. В таблиці 2 наведені матриці C ,

Таблиця 3. Вплив інформаційної змістовності дослідів на оцінки реологічної моделі і властивостей

| Буровий розчин | Схема обробки | Напруження зсуву τ_i (Па) при кутовій швидкості ω_i (с ⁻¹) | | | | | Оцінки реологічної моделі і властивостей | |
|----------------|---------------|--|-------|-------|-------|-------|--|--|
| | | 0,021 | 20,94 | 31,42 | 41,89 | 62,83 | $\hat{\nu}$ | \hat{a}_v |
| ВМКР | 0 | 0,33 | 6,20 | 7,84 | 10,15 | 12,90 | - | - |
| | 1 | 1,16 | 5,40 | 7,48 | 9,57 | 13,73 | 2 | $\hat{\tau}_0 = 1,12$ Па, $\hat{\eta} = 0,017$ Па·с |
| | 2 | 0,44 | 7,04 | 8,62 | 9,96 | 12,22 | 4 | $\hat{n} = 0,52$, $\hat{\tau}_0 = 0,24$ Па, $\hat{\eta} = 0,40$ Па·с ⁿ |
| | 3 | 0,33 | 6,64 | 7,93 | 8,99 | 10,73 | 3 | $\hat{n} = 0,44$, $\hat{k} = 0,578$ Па·с ⁿ |
| ААР | 0 | 4,10 | 6,70 | 8,98 | 11,52 | 15,17 | - | - |
| | 1 | 4,11 | 6,87 | 8,78 | 10,88 | 15,55 | 4 | $\hat{n} = 1,29$, $\hat{\tau}_0 = 4,11$ Па, $\hat{\eta} = 0,002$ Па·с ⁿ |
| | 2 | 4,10 | 6,81 | 8,68 | 10,73 | 15,28 | 4 | $\hat{n} = 1,29$, $\hat{\tau}_0 = 4,10$ Па, $\hat{\eta} = 0,002$ Па·с ⁿ |
| | 3 | 4,10 | 6,86 | 8,76 | 10,87 | 15,53 | 4 | $\hat{n} = 1,29$, $\hat{\tau}_0 = 4,10$ Па, $\hat{\eta} = 0,002$ Па·с ⁿ |

які внаслідок симетрії представлені неповторюваними елементами.

Обробка даних виконувалась з допомогою розробленої програми в класі ϑ , представленою моделями: $\nu = 2$ – Шведова–Бінгама, $\nu = 3$ – Оствальда, $\nu = 4$ – Гершеля–Балклі та $\nu = 5$ – Шульмана–Кессона. Застосовувались такі схеми обробки:

- при відсутності інформації про матрицю коваріацій (вважалось, що дані одержані за замірами по одній пробі, які відповідають середнім значенням напружень і матриця $C = \sigma_v^2 I$);
- матриця коваріацій нестационарна і некорельована (представлена тільки елементами головної діагоналі з таблиці 2, а інші – нулі);
- матриця коваріацій нестационарна і корельована (представлена як у таблиці 2).

В таблиці 3 наведені основні результати обробки даних ротаційної віскозиметрії за методикою [8]. Аналіз результатів обробки показує, що вид матриці коваріацій випадкової компоненти (тобто інформаційна змістовність дослідів) може оказати суттєвий вплив на оцінки реологічної моделі і властивостей. Так, наприклад, для першого розчину (див. табл. 3) залежно від виду матриці C одержані різні оцінки реологічної моделі, а для останнього – однакові. Це пояснюється різною інформаційною вагою дослідних даних у правилах прийняття рішень (4) і (5), що підвищує інтерпретаційні можливості методики [8].

ДЕЯКІ ЗАДАЧІ РЕОДИНАМІКИ У ТЕХНОЛОГІЯХ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Успішність проходження свердловин в ускладнених умовах залежить від гідродинамічних процесів, які протікають в системі свердловина–пласт. Особливості взаємодії

цієї системи під час виконання різних технологічних операцій визначають причини можливих ускладнень та способи керування гідродинамічною ситуацією з метою їх запобігання.

Задачі реодинаміки у технологіях буріння зводяться до визначення швидкостей або тисків при усталеній (неусталеній) течії бурових розчинів у довільному елементі циркуляційної системи свердловини. При цьому виникає необхідність розрахунку ламінарних і турбулентних течій, оцінок режиму течії, впливу умов свердловини та інформаційної невизначеності на реодинаміку технологічних процесів.

В класі ϑ реологічно стаціонарних моделей побудовані алгоритми розрахунку їх течій в круглих і кільцевих трубах [5, 6].

Так, наприклад, для концентричних кільцевих труб ламінарна течія рідин описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} d_2 = d_1 + \frac{4l\tau_0}{\Delta p}; \\ \tau_1 = \frac{\Delta p(d_1 d_2 - d^2)}{4ld}; \\ \tau_2 = \frac{\Delta p(D^2 - d_1 d_2)}{4lD}; \\ \int_{\tau_0}^{\tau_1} \dot{\gamma}(\tau) \varphi(\tau) d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_2} \dot{\gamma}(\tau) \psi(\tau) d\tau; \\ Q = \pi \left(\frac{l}{\Delta p} \right)^3 \left[\int_{\tau_0}^{\tau_1} \dot{\gamma}(\tau) f(\tau) d\tau + \int_{\tau_0}^{\tau_2} \dot{\gamma}(\tau) g(\tau) d\tau \right], \end{cases} \quad (6)$$

де d, D – відповідно внутрішній і зовнішній діаметри поверхонь кільцевої труби; Δp – перепад тиску на довжині l кільцевої труби; Q – об'ємна витрата рідини; d_1, d_2 – внутрішній і зовнішній діаметри ядра потоку; τ_0 – динамічне напруження зсуву рідини; τ_1, τ_2 – напруження на внутрішній і зовнішній поверхнях кільцевої труби;

$$\varphi(\tau) = 1 - \frac{\tau}{a}; \quad \psi(\tau) = 1 + \frac{\tau}{a}; \quad f(\tau) = \frac{(\tau - a)^3}{a};$$

$$g(\tau) = \frac{(\tau + a)^3}{a}; \quad a = \sqrt{\tau^2 + d_1 d_2 \left(\frac{\Delta p}{2l_1} \right)^2}.$$

Система рівнянь (6) подана в зручному для числового розв'язку виді ($\tau_1 > 0$; $\tau_2 > 0$) і для моделі Ньютона допускає аналітичний розв'язок. Для інших реологічних моделей класу ϑ розроблений алгоритм $Q = A(\Delta p)$ її розв'язку із заданою точністю, на основі якого побудований алгоритм $\Delta p = A^{-1}(Q)$.

Обґрунтовані напрямки регулювання реологічних властивостей бурових розчинів з метою попередження ускладнень за гідравлічними причинами [7]. На основі розв'язків задач реодинаміки розроблені рекомендації та програмне забезпечення для керування гідродинамічною ситуацією у свердловині при виконанні різних технологічних операцій (промивання, механічне буріння, спуско-підіймальні операції тощо) [7]. В умовах інформаційної невизначеності для прийняття технологічних рішень використані методи статистичного моделювання [5, 7].

Регулювання реологічних властивостей бурових розчинів і керування гідродинамічною ситуацією є складовими технологій попередження ускладнень [7], які успішно впроваджені у практику буріння газових свердловин на площах бурового управління "Укрбургаз".

ВИСНОВКИ

В класі реологічно стаціонарних моделей, які допускають явний аналітичний розв'язок виду $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$, розроблена методика обробки даних ротаційної віскозиметрії. Показано, що використання строгого розв'язку основного рівняння ротаційної віскозиметрії та врахування інформаційної змістовності дослідів

значимо впливають на результати оцінок реологічної моделі і властивостей досліджуваного середовища. За інтерпретаційними можливостями методика переважає вітчизняні і світові аналоги.

Створено пакет програм для обробки даних ротаційної віскозиметрії в класі ϑ реологічних моделей Ньютона, Шведова–Бінгама, Оствальда, Гершеля–Балклі та Шульмана–Кессона.

Узагальнені результати реодинаміки технологій буріння свердловин. В класі ϑ реологічних моделей побудовані алгоритми розв'язку задач $Q = A(\Delta p)$ та $\Delta p = A^{-1}(Q)$ у круглих та кільцевих трубах. Науково обґрунтовані рекомендації з метою керування гідродинамічною ситуацією у свердловині при виконанні різних технологічних операцій, які впроваджені у практику буріння газових свердловин.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Задворных В. Н., Литвинов А. И.** Особенности инженерной реометрии неньютоновских буровых растворов // Тр. ВНИИБТ. – Вып. 66. – М., 1989. – С. 125–141.
2. **Голубев Д. А.** Построение истинных реологических кривых по данным ротационной вискозиметрии // Нефтяное хозяйство. 1979, №8. – С.18–21.
3. **Гукасов Н. А., Брюховецкий О. С., Чихоткин В. Ф.** Гидродинамика в разведочном бурении. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 1999. – 304 с.
4. **Миронова Е. В., Леонов Е. Г.** Совершенствование методики выбора реологических моделей буровых растворов по данным экспериментальных исследований на ротационных вискозиметрах // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: "ВНИИОЭНГ", 2002. – № 9. – С. 31–35.
5. **Мислюк М. А., Рибчич І. Й., Яремійчук Р. С.** Буріння свердловин: Довідник: У 5т. Т.2.: Промивання свердловин. Відробка доліт. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2002. – 303 с.
6. **Мыслук М. А.** Об алгоритмах расчета некоторых стационарных течений неньютоновских жидкостей // Разведка и разработка нефтяных и газовых

- месторождений. Вып.27. Львов:Вища школа, 1990. – С. 58–63.
7. **Мислюк М. А., Рыбчич І. Й., Яремійчук Р. С.** Буріння свердловин: Довідник: У 5 т. Т.5: Ускладнення. Аварії. Екологія. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 376 с.
8. **Мислюк М. А.** О методике определения реологических свойств дисперсных сред по данным ротационной вискозиметрии // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т.54. – №6. – С. 975–979.
9. **Мислюк М. А., Рыбчич І. Й., Салыжин Ю. М. и др.** Пакет программ для обработки данных ротационной вискозиметрии // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: "ВНИИОЭНГ", 2002. – № 10. – С. 24–26.
10. **Мислюк М. А., Стефурак Р. И., Рыбчич І. Й., Василюк Ю. М.** Совершенствование технологии отработки трехшарошечных долот при роторном бурении скважин. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2005. – 212 с.