

622.244
С16

Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

Салижин Юрій Мирославович

(043)
УДК 622.244.442.063

**РОЗРОБКА ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ
ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЦЕПТУР
ОБРОБКИ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ**

05.15.10 - Буріння свердловин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Івано-Франківськ - 2006

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мислюк Михайло Андрійович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
професор кафедри буріння
нафтових і газових свердловин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мойсишин Василь Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
завідувач кафедри вищої математики

кандидат технічних наук
Лужаниця Олександр Васильович,
Полтавське відділення Українського державного
геолого-розвідувального інституту,
директор

Провідна установа
ДП «Наука

нафти і газів

Захист відбудеться
спеціалізованої вченої ради
технічного університету нафти і газу
76019, Україна

нафти і газів
асіданні
ального

З дисертації
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
за адресою:
76019, Україна

бібліотеці
і газу

Автореферат

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ковбасюк І.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Промивання свердловин включає комплекс технологічних процесів та операцій з приготування, очищення, обробки та циркуляції бурового розчину і є невід'ємною складовою сучасних технологій спорудження нафтових і газових свердловин. Ефективність і якість їх спорудження у значній мірі залежить від властивостей робочого агенту промивання свердловин – бурового розчину, а саме їх відповідності гірничогеологічним умовам буріння.

Промиванню свердловин приділяється особлива увага зарубіжних і вітчизняних дослідників. Разом з тим, як показує аналіз вітчизняного досвіду та науково-технічної інформації, рівень методик вибору рецептур обробки бурового розчину є ще недостатнім. Зокрема, при виборі рецептур обробки бурового розчину недостатньо обґрунтовується їх оптимальність за тими чи іншими критеріями.

Розробка і використання науково обґрунтованих методик вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів зменшить витрати на їх приготування і обробку, а також підвищить якість свердловин і техніко-економічні показники буріння.

Оптимізаційні задачі вимагають залучення сучасних числових методів із використанням обчислювальної техніки. Світовий досвід показує, що для вирішення прикладних задач у різних сферах людської діяльності широко застосовують експертні системи, тобто програмні засоби для накопичення знань і продукування рішень в нових проблемних ситуаціях. Створення експертної системи для вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів дозволить зменшити затрати не тільки на регулювання параметрів бурового розчину і пошук оптимальних рецептур, а також на ліквідацію ускладнень при бурінні свердловин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з програмою науково-дослідних робіт ДК «Укргазвидобування» НАК «Нафтогаз України» (договір № 168/00).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є підвищення ефективності буріння свердловин за рахунок вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів.

Задачі дослідження:

- 1) аналіз сучасного стану проблеми керування властивостями бурових розчинів;
- 2) розробка методики вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів;
- 3) створення експертної системи для вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів;
- 4) апробація експертної системи у промислових умовах.

Об'єкт дослідження – буровий розчин.

Предмет дослідження – процес керування властивостями бурового розчину.

Методи дослідження. Вибір оптимальних рецептур обробки бурового розчину здійснюється з використанням методів програмування. Рецептура обробки вибирається на основі методів аналізу експертної системи і математичного моделювання з допомогою бази даних



Наукова новизна одержаних результатів полягає в узагальненні моделі вибору рецептури обробки бурового розчину, яке ґрунтується на новій формалізації задачі пошуку із гнучким вибором критерію оптимальності залежно від геолого-технологічних умов буріння. Модель органічно поєднує використання регресійних залежностей і сплайн-функцій для опису впливу концентрацій реагентів на технологічні властивості бурового розчину, а також методів числового, експериментального та інформаційного пошуку оптимальної рецептури обробки бурового розчину, що гарантовано забезпечує розв'язок задачі за умови його існування.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні експертної системи «MudExpert» для реалізації моделі вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину у відповідних умовах буріння свердловин. Це забезпечить підвищення якості спорудження свердловин, а також показників їх буріння за рахунок зменшення витрат на ліквідацію ускладнень та регулювання властивостей бурового розчину.

Програма «Experimenter» може бути використаною для вибору оптимальних рецептур бурових розчинів на етапі проектування спорудження свердловини.

Програма «Rheometry» забезпечує адекватну оцінку реологічної моделі та властивостей бурових розчинів і за інтерпретаційними можливостями переважає відомі вітчизняні та зарубіжні аналоги.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно, а особистий внесок у працях, опублікованих у співавторстві такий: [1–3] – участь у формалізації задачі вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину в загальному і частинних випадках, запропоновані методи її розв'язку, розроблено програму «Experimenter» і здійснено її апробацію; [4, 5] – розроблено програму для обробки даних ротатійної віскозиметрії, здійснено обробку даних експериментальних досліджень; [6] – розроблено експертну систему «MudExpert»; [7] – запропоновано використання методу штрафних функцій для розв'язку задачі вибору рецептури обробки бурового розчину, дано порівняння сплайнових і поліноміальних моделей впливу реагентів на параметри бурового розчину і на результати пошуку оптимальної рецептури обробки бурового розчину; [8] – формалізовано задачу пошуку оптимальної рецептури обробки бурового розчину в загальному випадку, окреслено напрямки її вирішення і основні вимоги до програмного забезпечення, яке для цього необхідне.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 2000 р.), науково-методичній конференції «Стан і перспективи розвитку бурових робіт та підготовки фахівців для нафтогазової галузі України» (Івано-Франківськ, 2002), 8-й міжнародній науково-практичній конференції «Нафта і газ України – 2004» (Судак, 2004 р.). У повному обсязі дисертаційна робота

доповідалась на наукових семінарах кафедри буріння нафтових і газових свердловин ІФНТУНГ (червень 2005 р., січень 2006 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 5 наукових статтях і 3 тезах доповідей.

Термінологія в дисертації є загальноприйнятою в науково-технічній літературі даного напрямку.

Автор щиро вдячний своєму науковому керівнику доктору технічних наук, професору Мислюку М.А. за цінні поради в науковій роботі. Автор дякує адміністрації дочірньої компанії «Укргазвидобування» та бурового управління «Укрбургаз» за надану інформацію та сприяння у проведенні промислової апробації методик вибору рецептур обробки бурового розчину.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** поданий аналіз використання бурових розчинів, матеріалів та реагентів для їх приготування і обробки в БУ «Укрбургаз» за 1996 – 2003 роки, дана оцінка рівня існуючих методик вибору рецептур обробки бурових розчинів, зроблено огляд експертних систем для вирішення практичних задач буріння свердловин.

У дисертації наведені дані про динаміку зміни об'ємів буріння, середніх глибин свердловин, використання типів бурових розчинів та витрат матеріалів і реагентів для їх приготування на площах БУ «Укрбургаз» за 1996 – 2003 роки.

На протязі аналізованого періоду спостерігається зростання обсягів буріння, середніх глибин свердловин (від 2866 до 3044 м), загальних витрат на реагенти (більш ніж в 2 рази), асортименту реагентів (коефіцієнт кореляції 0,75) та питомих витрат коштів на реагенти (коефіцієнт кореляції 0,65).

Зростання питомих витрат коштів на реагенти не пов'язане зі зміною їх вартості, оскільки витрати коштів на реагенти розраховувались на основі масових витрат реагентів і їх вартості станом на 2002 рік. Частково таке зростання можна пояснити кореляційним зв'язком між витратами коштів на метр проходки з середньою глибиною буріння свердловин (коефіцієнт кореляції 0,88), яка починаючи із 1999 року, постійно зростає, проте у кількісному плані несуттєво (в середньому 24 м на рік).

Серед можливих причини зростання питомих витрат коштів на реагенти розглядалася зміна структури проходки різними розчинами. Аналіз показує, що частки використання лігносульфонатного, гуматно-акрилового, калієвого і малоглинистого бурових розчинів за 1996 – 2003 роки є статистично незмінними, для частки глинистого спостерігається тенденція до зменшення (коефіцієнт кореляції -0,51), а для мінералізованого та інших типів бурових розчинів – до збільшення (коефіцієнти кореляції відповідно 0,58 та 0,81). Зважаючи на те, що частки глинистого та інших бурових розчинів є незначними (1,8 % і 0,6 %

відповідно), можна прийняти, що зміна структури проходки різними типами бурових розчинів незначуще впливає на питомі витрати коштів на реагенти.

Зростання асортименту реагентів, яке спостерігається на протязі вказаного періоду, повинно би сприяти підвищенню якості бурових розчинів і скороченню витрат коштів. Проте, через відсутність методик, які б дозволяли оптимізувати обробку бурового розчину цього не спостерігається.

Наведено критичний аналіз сучасного стану методик вибору рецептур бурових розчинів. Обґрунтовано необхідність розробки методики вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів та окреслено основні напрямки її розробки.

Описані експертні системи для вирішення практичних задач буріння свердловин, серед яких виявлено тільки одну, пов'язану з керуванням властивостями бурових розчинів (система «Mud», яка розроблена G. Kahn і J. McDermott). Визнано необхідною розробку експертної системи для вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів та обґрунтовано принципи її побудови.

Результати аналізу промислових даних БУ «Укрбургаз», методик вибору рецептур бурових розчинів та експертних систем дозволили визначитись в меті та основних задачах досліджень.

У другому розділі розроблена методика вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів [1–4, 7–8].

Обробку бурового розчину здійснюють, як правило, для забезпечення відповідності його технологічних параметрів гірничогеологічним умовам проходження свердловин. Різноманіття умов буріння визначають вимоги до підбору рецептур обробки бурових розчинів, а широкий асортимент матеріалів і хімічних реагентів забезпечують множину допустимих розв'язків задачі. Тому рецептура обробки бурового розчину повинна задовольняти деякі додаткові умови, які формулюються у вигляді критерію оптимальності.

З урахуванням викладеного вибір рецептури обробки бурового розчину зводиться до оптимізаційної задачі виду

$$\begin{cases} E(x^v) \rightarrow \min, v \in \mathcal{G}, x^v \in D^v; \\ \varphi(x^v) \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $E(x^v)$ – критерій оптимальності як функція концентрацій $x^v = (x_1^v, x_2^v, \dots, x_k^v)^T$ v -го набору реагентів; \mathcal{G} – клас можливих наборів реагентів; D^v – область визначення вектора x^v ; $\varphi(x^v)$ – система обмежень на концентрації реагентів.

Формалізація задачі (1) вимагає обґрунтування критерію оптимальності, формування класу \mathcal{G} наборів реагентів, побудови системи обмежень на впливові фактори x^v та області їх визначення D^v .

Задача (1) виглядає найбільш природною, якщо за критерій оптимальності прийняти вартість рецептури обробки одиниці об'єму бурового розчину, а на його

технологічні параметри накласти обмеження, які б забезпечили буріння інтервалу свердловини без ускладнень, збереження колекторських властивостей пласта та інші вимоги. Тоді задача (1) може бути формалізована у такому еквівалентному вигляді

$$\begin{cases} E(\mathbf{x}^v) = a_0^v + (\mathbf{x}^v)^T \mathbf{a}^v \rightarrow \min, \mathbf{x}^v \in D^v, v \in \mathcal{V}; \\ p_j^{\min} - p_j(\mathbf{x}^v) \leq 0, p_j(\mathbf{x}^v) - p_j^{\max} \leq 0, j = \overline{1, q}, \end{cases}$$

де a_0^v – витрати на обробку одиниці об'єму бурового розчину, які не залежать від концентрацій реагентів; q – кількість технологічних параметрів;

$\mathbf{a}^v = (a_1^v, a_2^v, \dots, a_n^v)^T$ – вартості одиниць концентрацій реагентів v -того набору;

p_j^{\min}, p_j^{\max} – відповідно, мінімальне і максимальне значення j -го технологічного параметру за регламентом на проведення бурових робіт;

$p_j(\mathbf{x}^v)$ – залежності, які відображають вплив концентрацій v -го набору реагентів на технологічні параметри розчину (інформацію про залежності $p_j(\mathbf{x}^v)$ одержують з експерименту).

При розбурюванні ускладнених інтервалів стовбура свердловини в умовах підвищених вимог до технологічних параметрів бурового розчину задача вибору оптимальної рецептури може бути формалізована у такому вигляді

$$\begin{cases} E(\mathbf{x}^v) = \sum_{j=1}^z \alpha_j (p_j(\mathbf{x}^v) - \hat{p}_j)^2 \rightarrow \min, \mathbf{x}^v \in D^v, v \in \mathcal{V}; \\ p_j^{\min} - p_j(\mathbf{x}^v) \leq 0, p_j(\mathbf{x}^v) - p_j^{\max} \leq 0, j = \overline{z+1, q}; \\ B(\mathbf{x}^v) - B_{\max} \leq 0, \end{cases}$$

де \hat{p}_j – необхідні технологічні властивості бурового розчину; $\alpha_j = 1/S_j^2$ – вагові коефіцієнти критерію оптимальності; S_j^2 – дисперсія j -го технологічного параметра;

z – кількість технологічних параметрів з жорсткими вимогами;

$B(\mathbf{x}^v), B_{\max}$ – вартість обробки одиниці об'єму бурового розчину і обмеження на неї.

Можливі також інші варіанти формалізації задачі вибору оптимальних рецептур бурових розчинів, серед яких мінімізація витрат на приготування всього необхідного об'єму бурового розчину, забезпечення термостійкості розчину тощо.

Для розв'язку поставленої задачі пропонуються такі підходи:

з допомогою регресійних залежностей технологічних параметрів від вмісту реагентів, який включає в себе проведення експериментів за планами дробового факторного експерименту (ДФЕ), повного факторного експерименту (ПФЕ), центрального композиційного плану (ЦКП) другого порядку, побудову за їх результатами регресійних залежностей та розв'язку задачі лінійного або нелінійного програмування;

з допомогою сплайн-функцій у поєднанні з латинським планом експерименту та методом дискретного пошуку мінімуму цільової функції;

з використанням експериментального пошуку оптимальної рецептури симплекс-методом;

на основі аналізу бази даних про результати обробок бурових розчинів.

Особливістю вибору рецептури обробки бурового розчину з допомогою регресійних моделей є забезпечення принципу поступового ускладнення плану експериментів (ДФЕ \rightarrow ПФЕ \rightarrow ЦКП) з перевіркою адекватності моделі, побудованої у вигляді поліномів першого або другого порядку і розв'язку оптимізаційної задачі методом штрафних функцій.

Суть методу штрафних функцій зводиться до наступного перетворення цільової функції задачі (1)

$$E^*(x^v) = E(x^v) + s(x^v) \rightarrow \min, v \in \mathcal{D}, x^v \in D^v,$$

де $s(x^v)$ – штрафна функція, яка приймає нульові значення в допустимій області, а за її межами додатньо визначена з тим більшими значеннями, чим далі розглядувана точка знаходиться від допустимої області.

Штрафна функція визначається таким чином

$$s(x^v) = \sum_{i=1}^q \rho_i s_i(x^v), \quad (2)$$

$$\text{де } s_i(x^v) = \begin{cases} (\varphi_i^+(x^v) - 1)^2 + 1, & \text{якщо } \varphi_i^+(x^v) > 1; \\ 1, & \text{якщо } \varphi_i^+(x^v) \leq 1; \end{cases}$$

$$\varphi_i^+(x^v) = \max\{0, \varphi_i(x^v)\};$$

ρ_i – параметри штрафу, які дозволяють компенсувати відмінності в метриках контрольованих параметрів бурового розчину.

Оптимальна рецептура вибирається із умови:

$$\min_{x^v \in D^v} E(x^v) \Rightarrow \bar{x}^v, v \in \mathcal{D};$$

$$\min_v E(\bar{x}^v) \Rightarrow \hat{v},$$

де \bar{x}^v – оптимальна рецептура знайдена для v -го набору реагентів; \bar{X} – множина знайдених рецептур; \hat{v} – оптимальний набір реагентів.

Вибір оптимальної рецептури обробки бурових розчинів з допомогою сплайн-функцій зводиться до проведення експерименту за латинським планом, побудови моделей впливу реагентів на параметри розчину у вигляді сплайнів і розв'язку оптимізаційної задачі методом одночасного порівняння значень функції в вузлах рівномірної сітки.

В задачі (1) використано аналітичне подання сплайну за В.А. Василенко (1983 р.)

$$p(x^v) = \sum_{j=1}^n b_j G_{m,k}(x^v - x_j^v) + \sum_{j=1}^{q_3} b_{n+j} (x^v)^{\alpha_j};$$

де b_j, b_{n+j} – параметри аналітичного подання сплайну;

n – кількість експериментальних точок;

$$G_{m,k}(x^v - x_j^v) = \begin{cases} \|x^v - x_j^v\|^{2m-k} \ln \|x^v - x_j^v\|, & \text{якщо } k \text{ парне;} \\ \|x^v - x_j^v\|^{2m-k}, & \text{якщо } k \text{ непарне;} \end{cases}$$

$$\|x^v - x_j^v\| = \left(\sum_{i=1}^k (x_i^v - x_{ij}^v)^2 \right)^{1/2}; \quad q_3 = (k+m-1)! / (m-1)! k!;$$

$x_j^v = (x_{1j}^v, x_{2j}^v, \dots, x_{kj}^v)^T$ – вектор концентрацій реагентів в j -му експерименті;

$\alpha_j = (\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{kj})$ – мультиіндекс; $(x^v)^{\alpha_j} = (x_1^v)^{\alpha_{1j}} (x_2^v)^{\alpha_{2j}} \dots (x_k^v)^{\alpha_{kj}}$; m – параметр варіаційного функціоналу.

Особливістю запропонованого методу експериментального пошуку оптимальної рецептури обробки бурового розчину є перетворення задачі з обмеженнями в задачу безумовної оптимізації з допомогою штрафної функції виду (2) для забезпечення можливості використання симплекс-методу.

З метою зменшення кількості дослідів використано такі процедури:

вихідна точка симплексу вибирається на основі лінійних регресійних моделей, побудованих за планом ДФЕ;

після кожного відбивання вершини симплексу будуються сплайнові моделі впливу реагентів на параметри розчину і з їх допомогою оцінюється розташування оптимальної рецептури. Якщо при цьому отримана рецептура обробки лежить в околі однієї із вершин симплексу або належить йому, то приймається рішення про зупинку руху симплексу.

Вибір рецептури обробки бурового розчину на основі аналізу бази даних ґрунтується на використанні методу розпізнавання образів.

Оскільки необхідно знайти найбільш придатну для ліквідації заданої невідповідності параметрів рецептуру обробки, то параметри цієї невідповідності приймаються за центр класу, а відібрані за типом бурового розчину і набором реагентів рецептури обробки з бази даних відсортовуються за мірою близькості до зазначеного центру класу

$$R = \sum_{i=1}^q \alpha_i (\bar{p}_i - p_i)^2 + \sum_{i=1}^q \beta_i (\Delta \bar{p}_i - \Delta p_i)^2,$$

де $\bar{p}_i, \Delta \bar{p}_i$ – значення параметрів бурового розчину, для якого необхідно підібрати рецептуру обробки та їх відхилення від проектних значень;

$p_i, \Delta p_i$ – значення параметрів бурового розчину для якого раніше вдалося підібрати рецептуру обробки, і їх зміна під час обробки розчину;

α_i, β_i – коефіцієнти, які дозволяють компенсувати різниці в метриках параметрів і задати пріоритетність вибору за деякими параметрами.

Вибрана даним способом рецептура обробки потребує уточнення з допомогою плану ДФЕ і лінійних регресійних моделей.

В третьому розділі описується експертна система «MudExpert», яка призначена для реалізації методики вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів.

Структура експертної системи і функції її складових показані на рис. 1.

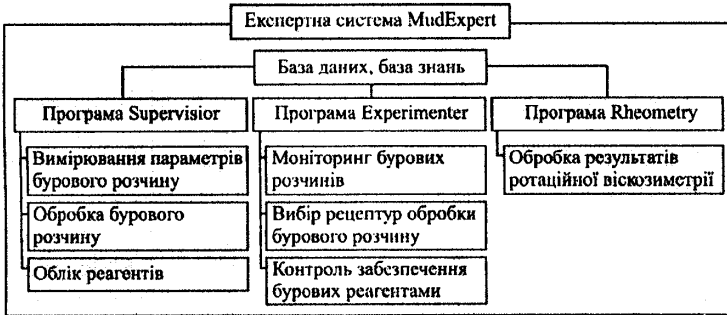


Рис. 1. Склад і функції експертної системи «MudExpert»

Програма «Supervisor» призначена для збору і обробки інформації з однієї свердловини, а програма «Experimenter» – для обробки отриманої з усіх свердловин інформації та вирішення поточних завдань лабораторії.

Програма «Experimenter» є основною в складі пакету програм «MudExpert» [6] і саме завдяки їй створений пакет програм може класифікуватись як експертна система. Її головне призначення полягає у забезпеченні реалізації вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину, при цьому взаємодія між різними методиками відбувається за схемою, показаною на рис. 2.

Окремим модулем забезпечується вибір рецептури обробки бурового розчину на основі бази даних.

База даних формується за результатами роботи програми «Experimenter», безпосереднього введення даних з допомогою програми «Supervisor» та програм для введення і перегляду довідкової і промислової інформації. Обмін інформацією між програмами відбувається шляхом розміщення її в базі даних і подальшого зчитування іншими програмами.

На практиці реологічні властивості бурових розчинів визначають в основному за даними ротаційної віскозиметрії. При цьому використовують різні методики, що базуються на строгих і наближених розв'язках рівняння течії Куетта в зазорі між коаксиальними циліндрами. Відомо що ці методики характеризуються різними ступенями точності оцінки реологічної моделі і властивостей досліджуваної рідини.

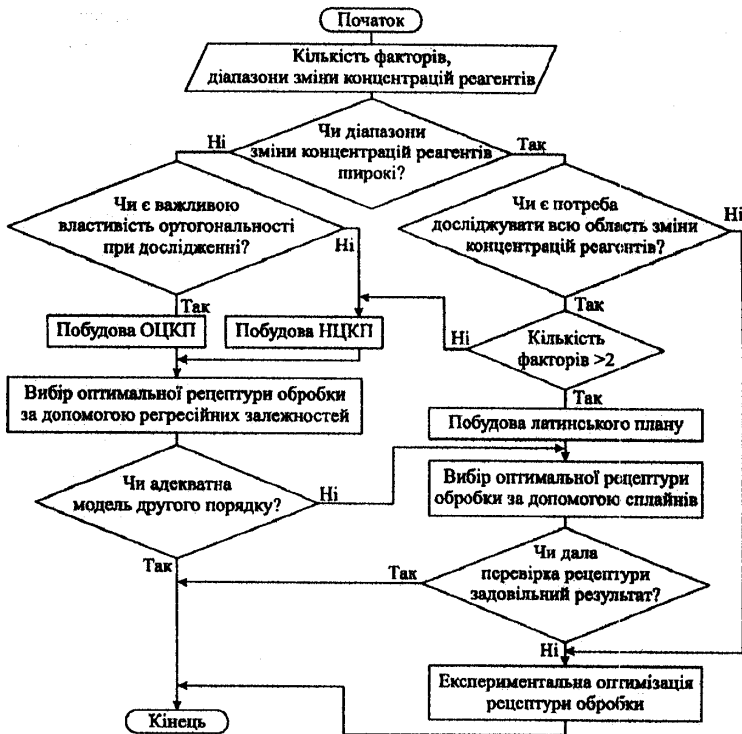


Рис. 2. Схема взаємодії методик вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину

З метою підвищення точності і внесення елементів стандартизації в процедуру обробки даних ротаційної віскозиметрії створена програма «Rheometry» [4, 5]. Дана програма реалізує методику М.А. Мислюка, яка базується на строгому розв'язку основного рівняння ротаційної віскозиметрії і враховує інформаційну змістовність дослідів.

Алгоритм обробки даних ротаційної віскозиметрії побудований на послідовному розв'язанні задач оцінки вектора реологічних властивостей \hat{p} , реологічних властивостей для кожної моделі v із класу Θ і наступного розпізнавання індексу \hat{v} моделі. При цьому використовується принцип максимуму функції правдоподібності. Для моделей Ньютона і Шведова-Бінгама (при $\tau \geq \tau_0/\alpha^2$) задача обробки даних ротаційної віскозиметрії допускає аналітичний розв'язок. В інших випадках реологічні властивості визначають з допомогою збіжного ітераційного процесу за О.І. Кобруновим.

Під час проведення пробних розрахунків з допомогою програми «Rheometry» виявлено, що в багатьох випадках виникають труднощі при оберненні матриці C коваріацій, яка характеризує випадкову нормальну компоненту в точках

спостережень. Це пов'язане з тим, що матриця C є погано обумовленою. З метою ліквідації даного недоліку в програмі реалізована регуляризація матриці C і її обернення методом квадратного кореня. Даний метод виявив високу надійність, в жодному з проведених на даний час розрахунків не дав хибних результатів.

В процесі програмної реалізації алгоритму обробки даних ротаційної віскозиметрії запропоновано метод пошуку матриці Λ , яка визначає апіорні середньоквадратичні відхилення p_v^0 від шуканого розв'язку \hat{p}_v . Даний метод дозволяє суттєво підвищити швидкість збіжності ітераційного процесу, а його суть полягає у виборі матриці Λ на основі умови

$$\min_{\Lambda \in L} \|C^{-1/2}(\tau - A(\omega, p_v^n(\Lambda)))\| \Rightarrow \hat{\Lambda},$$

де $\tau = \{\tau_i\}$, $\omega = \{\omega_i\}$, $i = \overline{1, N}$ – результати вимірювань; N – кількість швидкостей обертання віскозиметра; $A(\omega, p_v)$ – операція прямої задачі ротаційної віскозиметрії; p_1 – кількість кроків наближення ітераційного процесу; L – множина матриць Λ .

Деякі результати роботи алгоритму пошуку матриці $\hat{\Lambda}$ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати обробки даних ротаційної віскозиметрії

Свердловина, дата відбору проби розчину	Кути закручування, які відповідають частотам обертання: 3; 6; 30; 60; 100; 200; 300; 600, об/хв	Найбільш адекватна реологічна модель та її параметри	Функціонал для вибору моделі	Діагональні елементи матриці $\hat{\Lambda}$: $\lambda_{11}; \lambda_{22}; \lambda_{33}$	Кількість ітерацій при використанні	
					матриці $\hat{\Lambda}$	одиночної матриці
Голубиха 1, 18.04.03	14; 15; 21; 25; 31; 45; 59; 91	Гершеля-Балклі $\tau_0 = 5,86$ Па; $\eta = 0,142$ Па·с ^{0,801} ; $n = 0,801$	0,1286	100; 10; 1	4445	16179
Кобзівка 11, 29.05.03	2; 3; 11; 19; 29; 54; 77; 138	Оствальда $k = 0,172$ Па·с ^{0,856} ; $n = 0,856$	0,0644	1; 10	424	1774
Ланна 201, 09.07.03	7; 8; 15; 20; 27; 41; 54; 88	Гершеля-Балклі $\tau_0 = 2,62$ Па; $\eta = 0,1957$ Па·с ^{0,761} ; $n = 0,761$	0,0471	10; 1; 100	4511	9533

У четвертому розділі наведено результати апробації експертної системи в промислових умовах. При випробуванні методики використовувались різні варіанти пошуку оптимальної рецептури і всі вони показали свою ефективність для вирішення поставленої задачі.

Під час чергового контролю параметрів бурового розчину (9 липня 2003 року) лабораторією Хрестищенського ВБР на свердловині № 201 Ланнівської площі зафіксовані такі їх значення: густина – 1330 кг/м³, умовна в'язкість – 24 с, фільтрація – 10,8 см³/30 хв, товщина глинистої кірки – 0,3 мм, СНЗ₁ – 9 дПа,

СНЗ₁₀ - 18 дПа (за даними Фанн 800: СНЗ₁ - 38 дПа, СНЗ₁₀ - 53 дПа), рН - 9,55, вміст солей - 26,4 %, вміст іонів Са²⁺ - 0,12 %, вміст іонів Mg²⁺ - 0 %. Вибій свердловини знаходився на глибині 2805 м і такі значення параметрів не відповідали технологічним регламентам буріння.

Для усунення невідповідності параметрів бурового розчину проектним значенням прийнято рішення про обробку розчину реагентами КЛСТ, ЕКР, КМЦ НV. Вибір оптимальної рецептури обробки бурового розчину за критерієм її вартості виконано з допомогою системи «MudExpert».

Прийняті наступні інтервали зміни концентрацій реагентів:

КЛСТ - 0 - 4 % (товарного продукту);

ЕКР - 0 - 1,4 % (сухої речовини);

КМЦ НV - 0 - 0,3 % (сухої речовини).

Вартість реагентів: КЛСТ - 676 грн/т, ЕКР - 2700 грн/т, КМЦ НV - 12210 грн/т.

В процесі дослідження вирішено контролювати умовну в'язкість, фільтрацію, статичне напруження зсуву, для яких прийняті такі допустимі інтервали зміни значень:

умовна в'язкість - ≤ 90 с;

СНЗ₁ - 20...60 дПа;

фільтрація - ≤ 6 см³/30 хв;

СНЗ₁₀ - 20...70 дПа.

Для дослідження впливу реагентів на параметри бурового розчину за допомогою програми «Experimenter» було побудовано план експерименту у вигляді латинського квадрату з трьома рівнями зміни факторів (табл. 2).

Таблиця 2

Пробні рецептури обробки бурового розчину

Реагент	Дослід								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
КЛСТ, %	0	0	0	2	2	2	4	4	4
ЕКР, %	0	0,7	1,4	0	0,7	1,4	0	0,7	1,4
КМЦ НV, %	0	0,15	0,3	0,15	0,3	0	0,3	0	0,15

Таблиця 3

Параметри бурового розчину після пробних обробок

Параметр	Дослід								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Умовна в'язкість, с	24	38	62	42	64	64	48	58	72
Фільтрація, см ³ /30хв	10,8	6,3	4,8	8	5,6	6	7,5	7,2	5,4
СНЗ ₁ , дПа	38	34	53	38	48	77	48	72	77
СНЗ ₁₀ , дПа	53	62	81	62	115	96	86	101	105

3 метою виявлення наявності області допустимих рецептур з плану експерименту (табл. 2), вибрані та реалізовані випадковим чином досліді 1, 3, 4 і 8, результати яких відображені в табл. 3. За результатами вказаних дослідів побудовані лінійні регресійні залежності та оцінено наявність області допустимих рецептур (рис. 3, а).

Оскільки область допустимих рецептур існує, то прийнято рішення продовжити експеримент. Результати вимірювань наведені в табл. 3. За результатами експерименту отримано моделі впливу реагентів на параметри розчину у вигляді сплайнів (рис. 3, б – 3, в).

На рис. 3. виділено області допустимих значень параметрів і рецептур, яка утворена в результаті їх перетину. Залежність цільової функції від концентрацій реагентів показано на рис. 3, г.

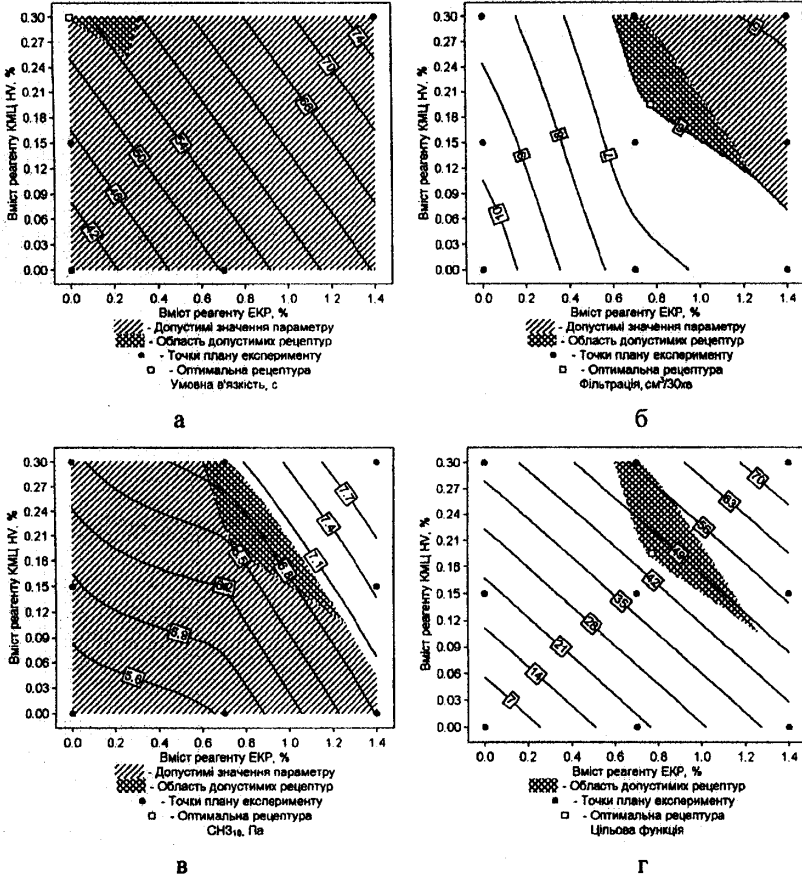


Рис. 3. Деякі результати обробки експериментальних даних

Оптимальну рецептуру обробки за критерієм її вартості знайдено з допомогою методу одночасного порівняння значень функції у вузлах рівномірної сітки.

Знайдена оптимальна рецептура обробки бурового розчину: ЕКР – 0,77 %, КМЦ НВ – 0,2 %, КЛСТ – 0 %. В перерахунку на обробку 1 м^3 бурового розчину витрата вказаних реагентів буде складати: ЕКР – $7,7 \text{ кг/м}^3$, КМЦ НВ – 2 кг/м^3 . В

даному випадку обробляти буровий розчин реагентом КЛСТ з економічних міркувань недоцільно.

В процесі експериментальної перевірки отриманої рецептури отримано такі значення параметрів: густина – 1330 кг/м³, умовна в'язкість – 58 с, фільтрація – 6 см³/30 хв, СНЗ₁ – 43 дПа, СНЗ₁₀ – 72 дПа. Оскільки отримані значення параметрів відповідають умовам задачі, то знайдену рецептуру обробки бурового розчину рекомендовано до застосування на свердловині. Вартість обробки 1 м³ бурового розчину за цією рецептурою складає 45,21 грн/м³.

Аналогічним чином проводилась апробація інших варіантів пошуку оптимальної рецептури обробки. На свердловині № 21 Кобзівського родовища (Хрестищенське ВБР) рецептура обробки бурового розчину вибрана за допомогою експериментальної оптимізації. На свердловині № 40 Байрацького родовища (Полтавське ВБР) рецептура переведення бурового розчину з гуматно-акрилового в гуматно-акрилово-калієвий підібрана за допомогою сплайнових моделей. На свердловині № 2 Гуцулівська (Калуська НГРЕ) рецептура обробки бурового розчину вибрана за методикою, яка базується на використанні регресійних залежностей.

Оптимізовано за критерієм термостійкості рецептуру гуматно-біополімерного бурового розчину* для умов Кобзівського родовища. При цьому задача вибору рецептури обробки бурового розчину формалізована у вигляді

$$\begin{cases} E(x^v) = \sum_{i=1}^z \alpha_i (\Delta p_i(x^v))^2 \rightarrow \min, x^v \in D^v, v \in \mathcal{V}; \\ p_j^{\min} - p_j(x^v) \leq 0, p_j(x^v) - p_j^{\max} \leq 0, j = \overline{1, q}; \\ B(x^v) - B_{\max} \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

де $\Delta p_j(x^v)$ – зміна параметрів бурового розчину в результаті дії підвищених температур.

Задача (3) враховує такі вимоги:

параметри бурового розчину повинні відповідати технологічним регламентам до і після дії на нього підвищених температур;

зміна технологічних параметрів бурового розчину в результаті дії на нього підвищених температур повинна бути мінімальною.

Для побудови критерію оптимальності вибрано найбільш важливі з точки зору технології буріння і водночас чутливі до температурних впливів параметри бурового розчину: фільтрація, реологічні властивості, статичне напруження зсуву.

Реологічні властивості відносяться до векторних величин і їх віднормована зміна може бути оцінена:

на основі багатовимірної функції щільності розподілу ймовірностей

* Рецептура гуматно-біополімерного бурового розчину розроблена в УкрНДІгаз

$$\Delta a^2 = (a_0 - a_1)^T C^{-1} (a_0 - a_1); \quad (4)$$

за реологічною кривою

$$\Delta \tau^2 = \frac{1}{S^2} \frac{1}{\omega_{\max}} \int_0^{\omega_{\max}} (\tau(a_0, \omega) - \tau(a_1, \omega))^2 d\omega,$$

де a_0, a_1 – вектори реологічних параметрів бурового розчину відповідно до i після дії на нього підвищених температур;

C^{-1} – матриця коваріацій оцінок реологічних параметрів бурового розчину в початковому стані;

S^2 – дисперсія оцінок напруження зсуву, які отримуються з допомогою реологічної моделі;

ω_{\max} – верхня межа діапазону швидкостей обертання циліндра віскозиметра, з допомогою якого визначаються реологічні властивості.

При виборі рецептури гуматно-біополімерного розчину зміна реологічних властивостей оцінювалась за критерієм (4).

В результаті пошуку отримана оптимальна рецептура гуматно-біополімерного бурового розчину: ВЛР – 8,5 %, поліпак UL – 0,3 %, Duovis – 0,15 %, яка забезпечує необхідні параметри (табл. 4).

Таблиця 4

Параметри оптимальної рецептури гуматно-біополімерного бурового розчину

Параметр	Значення параметрів	
	до термостатування	після термостатування
Умовна в'язкість, с	23	21
Фльтрація, см ³ /30хв	4,7	5,6
СНЗ ₁ , дПа	7	5
СНЗ ₁₀ , дПа	10	6
Динамічне напруження зсуву, Па	0,56	0,33
Міра консистенції, Па*с ⁿ	0,116	0,055
Показник нелінійності (n)	0,665	0,692

Для кожної із вибраних рецептур обробки виконана оцінка ймовірного економічного ефекту від їх реалізації (табл. 5).

Таблиця 5

Результати оцінок економічного ефекту від вибору оптимальних рецептур обробки

Розчин для якого підбиралась рецептура	Оцінка економічного ефекту, грн/м ³		Ймовірність випадкового одержання допустимої рецептури, %
	найбільш ймовірний	максимальний	
Ланна 201	5,56	11,70	0,5
Кобзівська 21	1,82	4,72	1,2
Байрацька 40	45,45	89,37	15,5
Гуцулівська 2	2,70	4,40	1,3
Гуматно-біополімерний	30,92	108,6	4,2

З табл. 5 стає очевидним те, що крім реалізації пошуку оптимальної рецептури обробки бурового розчину експертна система забезпечує результативність цієї

процедури, тобто навіть при невеликих розмірах області допустимих рецептур вдається знайти оптимальну рецептуру обробки розчину.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, у якій узагальнена модель оптимального вибору рецептури обробки бурового розчину, створена і апробована експертна система для її реалізації.

Основні результати дисертації зводяться до наступного.

1. Наведені результати статистичного аналізу даних про використання бурових розчинів, матеріалів і хімічних реагентів для їх приготування в БУ «Укрбургаз» за 1996–2003 роки. Виявлені стійкі тенденції зростання асортименту хімічних реагентів і матеріалів для приготування і регулювання властивостями бурових розчинів (коефіцієнт кореляції 0,75), а також підвищення питомих витрат на метр проходки (коефіцієнт кореляції 0,73).

Аналіз сучасного стану проблеми керування властивостями бурових розчинів вказує на відсутність науково-обґрунтованих методик вибору рецептур обробки бурових розчинів та програмного забезпечення для їх реалізації.

2. Узагальнена методика вибору рецептури обробки бурового розчину. Її особливість полягає у пошуку такої рецептури, яка забезпечує необхідні технологічні властивості бурового розчину і оптимальність прийнятого для заданих геолого-технологічних умов буріння критерію (вартість обробки одиниці об'єму бурового розчину, відповідність певних технологічних властивостей бурового розчину заданим, вартість обробки всього об'єму бурового розчину та ін.).

Методика базується на використанні різних моделей (регресійні, сплайн-функції) опису впливу вмісту хімічних реагентів на технологічні властивості бурового розчину і методів пошуку оптимальних рецептур (числові, експериментальні, інформаційні). Це дозволяє гарантовано знайти оптимальну рецептуру обробки бурового розчину за умови її існування.

3. Розроблена експертна система для вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів, яка включає:

програму для реалізації методики вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину;

програму для забезпечення контролю за параметрами бурового розчину на свердловині;

базу даних експертної системи і програмне забезпечення для роботи з нею;

програму для обробки даних ротаційної віскозиметрії.

Експертна система забезпечує вибір методів пошуку, побудову і супровід планів експериментів, математичну обробку експериментальних даних і пошук оптимальної рецептури обробки бурового розчину.

4. Проведено апробацію методики вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів в БУ «Укрбургаз» на свердловинах № 201 Ланнівського

родовища, № 21 Кобзівського родовища та № 40 Байрацького родовища. Апробація методики також проводилась на свердловині № 2 Гуцулівської площі (Калуська НГРЕ) і при виборі термостійкої рецептури гуматно-біополімерного бурового розчину для умов Кобзівського родовища. При випробуванні методики використовувались різні варіанти пошуку оптимальної рецептури, які показали свою ефективність для вирішення поставленої задачі.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО РОБОТІ

1. Мислюк М.А., Салижин Ю.М. Деякі задачі вибору рецептури обробки бурового розчину // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 2. – С. 74-75.
2. Мыслюк М.А., Салыжин Ю.М. О выборе оптимальной рецептуры обработки бурового раствора // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2003. – №4. – С. 35-38.
3. Мыслюк М., Салыжин Ю. Выбор оптимальных рецептур обработки буровых растворов // Wiertnictwo Nafta Gaz: Rocznik 21/1. – Krakow, 2004. – С. 273-276.
4. Пакет програм для обробки даних ротаційної віскозиметрії / М.А.Мислюк, І.Й.Рибчич, Ю.М.Салижин, Р.І.Стефурак, В.Ф.Янкевич // Стан і перспективи розвитку бурових робіт та підготовки фахівців для нафтогазової галузі України: Тези доповідей і повідомлень науково-методичної конференції, присвяченої 80-річчю кафедри буріння нафтових і газових свердловин, 19-21 вересня 2002. – Івано-Франківськ, 2003. – С. 40-41.
5. Пакет программ для обработки данных ротационной вискозиметрии / М.А.Мыслюк, И.И.Рыбчич, Ю.М.Салыжин, Р.И.Стефурак, В.Ф.Янкевич // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2002. – №10. – С.24-26.
6. Програмне забезпечення для вибору і прийняття раціональних технологічних рішень в бурінні / М.А. Мислюк, Ю.М. Василюк, Ю.М. Салижин та ін. // 8-а міжнародна науково-практична конференція «Нафта і газ України – 2004», м. Судақ, 29 вересня - 01 жовтня 2004р. – Судақ, 2004. – С. 411-412.
7. Салижин Ю.М. Вибір рецептури обробки бурового розчину з використанням сплайнних і поліноміальних моделей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 3. – С. 69-72.
8. Салижин Ю.М. До пошуку раціональної рецептури обробки бурового розчину // Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу університету. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2001. – С. 18-19.

АНОТАЦІЯ

Салижин Ю.М. Розробка експертної системи для вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.10 – Буріння свердловин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2006.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності буріння свердловин за рахунок вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів.

Розроблена методика вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів, яка базується на новій формалізації задачі пошуку із гнучким вибором критерію оптимальності залежно від геолого-технологічних умов буріння. Методика органічно поєднує використання регресійних залежностей і сплайн-функцій для опису впливу концентрацій реагентів на технологічні властивості бурового розчину, а також методи числового, експериментального та інформаційного пошуку оптимальної рецептури обробки бурового розчину.

Розроблена експертна система «MudExpert», яка забезпечує вибір методів пошуку, побудову і супровід планів експериментів, математичну обробку експериментальних даних і пошук оптимальної рецептури обробки бурового розчину, обробку даних ротаційної віскозиметрії. Експертна система включає засоби для накопичення промислової інформації та використання її при пошуку рецептур обробки бурових розчинів.

Проведено апробацію методики вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів в БУ «Укрбургаз».

Ключові слова: експериментальна оптимізація, експертна система, експертний пошук, контроль параметрів бурового розчину, методика вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину, обробка даних ротаційної віскозиметрії, регресійні моделі, сплайн-функції.

АННОТАЦИЯ

Салижин Ю.М. Разработка экспертной системы для выбора оптимальных рецептур обработки буровых растворов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.10 – Бурение скважин. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2006.

Диссертация посвящена повышению эффективности бурения скважин за счет выбора оптимальных рецептур обработки буровых растворов.

Приведены результаты статистического анализа данных об использовании буровых растворов, материалов и химических реагентов для их приготовления в буровом управлении «Укрбургаз» за 1996–2003 гг. Выявлены стойкие тенденции возрастания ассортимента химических реагентов и материалов для приготовления и

регулирования свойств буровых растворов (коэффициент корреляции 0,75), а также повышение удельных расходов на метр проходки (коэффициент корреляции 0,73).

Анализ современного состояния проблемы управления свойствами буровых растворов указывает на отсутствие научно-обоснованных методик выбора рецептур обработки буровых растворов и программного обеспечения для их реализации.

Разработана методика выбора оптимальных рецептур обработки буровых растворов, основанная на новой постановке задачи поиска с гибким выбором критерия оптимальности в зависимости от геолого-технологических условий бурения. Методика построена с использованием следующих стратегий поиска оптимальной рецептуры:

- с применением регрессионных зависимостей технологических параметров от содержания реагентов, включающее проведение экспериментов по планам дробного и полного факторного эксперимента, центрального композиционного плана второго порядка, построение по их результатам регрессионных зависимостей и решение задачи линейного или нелинейного программирования;

- с помощью сплайн-функций в сочетании с латинским планом эксперимента и методом дискретного поиска минимума целевой функции;

- с помощью экспериментального поиска оптимальной рецептуры симплекс-методом;

- на основе анализа базы данных о результатах обработок буровых растворов.

Разработана экспертная система «MudExpert», которая включает:

- программу для реализации методики выбора оптимальной рецептуры обработки бурового раствора;

- программу для обеспечения контроля параметров бурового раствора на скважине;

- базу данных экспертной системы и программное обеспечение для ее поддержки;

- программу для обработки данных ротационной вискозиметрии.

Экспертная система обеспечивает выбор методов поиска, построение и сопровождение планов экспериментов, математическую обработку экспериментальных данных и поиск оптимальной рецептуры обработки бурового раствора, обработку данных ротационной вискозиметрии. Экспертная система содержит средства для накопления промысловой информации с целью ее использования при поиске рецептур обработки буровых растворов.

Произведена апробация методики выбора оптимальных рецептур обработки буровых растворов в БУ «Укрбургаз» на скважинах № 201 Ланновского, № 21 Кобзевского и № 40 Байрацкого месторождений. Апробация методики также производилась на скважине № 2 Гуцуливской площади (Калушской нефтегазозразведочной экспедиции) и в процессе выбора рецептуры гуматно-биополимерного бурового раствора с учетом термостойкости для условий Кобзевского месторождения. При испытании методики использовались разные

варианты поиска оптимальной рецептуры и все они показали свою эффективность для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: контроль параметров бурового раствора, методика выбора оптимальной рецептуры обработки бурового раствора, обработка данных ротационной вискозиметрии, регрессионные модели, сплайн-функции, экспериментальная оптимизация, экспертный поиск, экспертная система.

ABSTRACT

Salyzhyn Yu.M. The design of expert system for the selection of the drilling mud conditioning optimal prescriptions. – Manuscript.

Thesis for a Candidate degree by specialty 05.15.10 – Hole drilling. – Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas. Ivano-Frankivsk, 2006.

The thesis is devoted to the problem of increasing the drilling efficiency by means of optimal selection of drilling mud conditioning prescriptions.

The designed methodology of the optimal prescription selection for drilling mud conditioning is based on the new formulation of the investigation task with the flexible selection of optimization criterion depending on the geotechnical conditions of drilling. The methodology combines the regression models and spline functions to describe the influence of reagents concentration on the technological properties of mud, and the methods of numerical, experimental and informational search of optimal prescription for mud treatment.

The expert system «MudExpert» was designed. It provides the selection of searching methods, making up the plans of experiments and their maintenance, the mathematical treatment of experimental data and the searching for optimal prescription of mud conditioning, the treatment of rotational viscosimetry data. The expert system includes facilities for accumulating of the industrial information and its usage during search of optimal prescription for mud conditioning.

The approbation of methodology for selection of optimal prescription for mud conditioning was carried out in the drilling company «Ukrburgas».

Key words: experimental optimization, expert system, informational search, methodology for selection of optimal prescription of drilling mud conditioning, mud parameters control, regression models, spline functions, treatment of rotational viscosimetry data.