

КОНТРОЛЬ СТАНІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ЗАДОВОЛЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ

Р.Б. Вовк, В.І. Шекета, В.Р. Процюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42127,
e-mail: wolf@wolf.if.ua

Введено формалізацію процесу контролю нештатних ситуацій у процесі буріння свердловин на нафту і газ у вигляді інформаційно-пошукових задач на основі обмежень. Представлено описи технологічних параметрів в вигляді змінних, доменів, обмежень та лінгвістичних правил.

Ключові слова: буріння свердловин, нештатні ситуації, обмеження, прихоплення бурильної колони, лінгвістичні значення, домени, правила.

Описана формализация процесса контроля нештатных ситуаций при бурении скважин на нефть и газ в виде информационно-поисковых задач на основе ограничений. Представлено описания технологических параметров в виде переменных, доменов, ограничений и лингвистических правил.

Ключевые слова: бурение скважин, нештатные ситуации, ограничения, прихват буровой колонны, лингвистические значения, домены, правила.

Formalization of process for emergencies control in drilling of oil and gas in the form of information retrieval task based on constraints is proposed. Descriptions of technological parameters are considered in the form of variables, domains, constraints and linguistic rules.

Keywords: drilling, abnormal situations, constraints, freeze-in of drilling column, linguistic values, domains, rules.

Як свідчить аналіз літературних джерел [1, 2, 3], у процесі буріння свердловин на нафту і газ технологічний процес характеризується виникненням ряду надзвичайних (позапланових, позаштатних) ситуацій, таких як: падіння бурового інструменту чи сторонніх предметів у свердловину, обрив бурової колони, прихоплення бурильних труб чи обсадних труб, розкручування різьбових з'єднань бурильних і обсадних труб, припикання породоруйнівного інструменту та інші специфічні аварії. Дані технологічні проблеми та їх стани моделюються на основі систем диференціальних рівнянь, теорії нечітких множин та інших методів. Проте при побудові інтелектуальної тьюторної системи для проведення технологічних тренінгів обслуговуючого персоналу бурових установок, існуючі формальні підходи не є достатніми з точки зору опису та формалізації саме технологічних нештатних ситуацій, хоча вони здебільшого дозволяють представляти знання предметної області. Як показують дослідження [4, 5, 6] одним з можливих ефективних методів виділення та опису технологічних помилок є інформаційно-пошукові задачі на основі обмежень. Загалом випадку інформаційно-пошукова задача формулюється у вигляді набору змінних із встановленням для кожної змінної окремого домену. Множина накладених обмежень визначає набори значень, які можуть одночасно приймати введені змінні. В нашому випадку в якості множини змінних можна розглядати множини технологічних параметрів і причини виникнення аварійних нештатних ситуацій інтерпретувати як випадок порушення накладених обмежень, їх множин, систем та ієрархій.

Таким чином, невирішеною залишається проблема моделювання технологічних задач, що характеризуються множиною станів (в тому числі нештатних) у вигляді підходу на основі представлення та задоволення обмежень.

Метою даного дослідження є побудова формального представлення для опису технологічних процесів буріння нафти і газу у вигляді інформаційно-пошукових задач на основі обмежень.

Під інформаційно-пошуковою задачею на основі обмежень [7, 8] розуміють кортеж (V, D, C) , де: V – множина змінних (v_1, \dots, v_m) ; D – множина скінчених областей, які відповідають кожній змінній $v_i \in D_i$; C – множина обмежень $\{C_{K_1}, \dots, C_{K_n}\}$, які обмежують граничні значення, що змінні можуть приймати одночасно, де $K_i = (v_{K_{i1}}, \dots, v_{K_{im}})$ є кортежами змінних з V , і кожний C_{K_i} задається як $(C_{K_i} \subseteq D_{K_{i1}} \times \dots \times D_{K_{im}})$.

З точки зору технології буріння причиною виникнення надзвичайних ситуацій є вихід виділених технологічних параметрів за встановлені граничні значення (домени). Опис такого процесу можна представити у вигляді задачі задоволення обмеження, якщо в якості її змінних розглядати технологічні параметри контролю процесу буріння, такі як:

$V^1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_{n_1}^1\} = \{витрата_бурового_розчину_на_виході_із_свердловини, \text{ крутний_момент_на_роторі, осьове_навантаження_на_долото, навантаження_на_гаку, тиск_на_викиді_насосів, швидкість_обертання_ротора, механічна_швидкість_проходки}\}$

Введення для набору змінних V^1 множини доменів D^1 та множини обмежень C^1 дасть змогу описувати технологічний процес буріння свердловин на нафту і газ (позначимо даний процес через TP^1) в термінах представлення та задоволення обмежень. Аварійні надзвичайні ситуації в даному процесі будемо розглядати як його стани TPS_{set}^1 :

$TP^1.PPS_{set}^1 = \{обрив_бурової_колони, \text{ прихоплення_бурильних_і_осадних_труб, падіння_бурового_інструменту_і_сторонніх_предметів_у_свердловину, припікання_породоруйнівного_інструменту}\}$

Оскільки процес буріння є надзвичайно складним та динамічним процесом, який не можливо повністю формалізувати, тому контроль окремих його станів, можна виділяти в окремі технологічні процеси, зокрема важливим є технологічний процес контролю прихоплення бурової колоні (TP^2). Контроль даного процесу можна описувати власним набором технологічних параметрів (змінних):

$V^2 = \{v_1^2, v_2^2, \dots, v_{n_2}^2\} = \{заклинення_колоні_труб, осідання_шламу, перепад_тиску, звуження_перерізу_стовбура, коефіцієнт_тертя_із_кіркою, обвал_порід, диференційний_тиск, плин_порід, сальникоутверення, площа_контакту_колоні_труб}\}$

Для множини V^2 введемо множину обмежень:

$C^2 = \{перепад_тиску_в_інтервалі_проникного_пласта, перебування_колоні_труб_в_нерухомому_стані, застосування_бурильних_труб_надмірного_діаметру, великий_перепад_тиску, вміст_твердої_фази_в_буровому_розчині, швидкість_фільтрації_бурового_розчину, циркуляція_бурового_розчину, перевищення_гідравлічного_тиску_над_пластовим}\}$

Друга категорія виникнення прихоплень, може бути формалізована як

$V^{21} = \{операція_обертання, операція_спуску, операція_піднімання, буріння_в_м'яких_породах, буріння_в_гірських_породах, абразивний_знос_долота}\}$

$C^{21} = \{спуск_нового_долота, заклинювання_колоні_труб, компоновка_низу_колоні_великої_жорсткості, наявність_місцевих_опорів, падіння_сторонніх_предметів, жолобні_виробки, затягування_бурильної_колоні_в_жолоб, зони_жолобоутворення, зони_викривлення,}\}$

Прихоплення третьої категорії уможливають таку формалізацію у вигляді змінних та обмежень:

$V^{31} = \{сповзання_шламу, обвалоутворення, припинення_циркуляції, підвищення_температури, протитиск_бурового_розчину, звуження_стовбурів,}\}$

$C^{31} = \{відповідність_бурового_розчину_типу_породи, нестійкий_стан_порід, пластичний_плин, глинисті_відкладення,}\}$

$D^{31} = \{підвищення_тиску_нагнітання, поглинання_бурового_розчину, винос_шламу, утворення_пробок, затяжка_інструменту, інтенсивні_промивки_стовбура}\}$

Процес сальникоутверення, можна описати власною системою обмежень:

$V^{41} = \{порушення_режиму_циркуляції, розбурювання_глинистих_відкладень, підвищення_температури, відкладення_фільтраційної_кірки,}\}$

$C^{41} = \{ \text{негерметичність}_\text{ бурової}_\text{ колони, забруднення}_\text{ стовбура}_\text{ свердловини, незадовільне}_\text{ промивання, втрата}_\text{ циркуляції, забруднення}_\text{ приймальних}_\text{ ємностей, накопичення}_\text{ осаду, залипання}_\text{ з}_\text{ фільтраційною}_\text{ кіркою, наявність}_\text{ вимоїн, зниження}_\text{ тиску, зниження}_\text{ температури} \}$

$D^{41} = \{ \text{періодичність}_\text{ відриву}_\text{ долота, припинення}_\text{ циркуляції, глинисті}_\text{ відкладення, розміри}_\text{ каверн}_\text{ і}_\text{ жолоба, ступінчастість}_\text{ стовбура, прояви}_\text{ затягування} \}$

Загалом основні технологічні параметри (змінні задачі задоволення обмежень), на основі яких можна описати причини виникнення прихоплень бурової колони, такі:

$V^{51} = \{ v^1, v^2 \dots v^{18} \} = \{ v^1 = \text{жорсткість}_\text{ низу}_\text{ бурової}_\text{ колони, } v^2 = \text{вид}_\text{ мастильної}_\text{ добавки, } v^3 = \text{дотримання}_\text{ технічних}_\text{ норм}_\text{ і}_\text{ правил, } v^4 = \text{фізико- механічні}_\text{ властивості}_\text{ бурового}_\text{ розчину, } v^5 = \text{величина}_\text{ перепаду}_\text{ тиску, } v^6 = \text{пористість}_\text{ породи, } v^7 = \text{швидкість}_\text{ висхідного}_\text{ потоку}_\text{ бурового}_\text{ розчину, } v^8 = \text{вміст}_\text{ мастильної}_\text{ добавки}_\text{ в}_\text{ буровому}_\text{ розчині, } v^9 = \text{площа}_\text{ поверхні}_\text{ контакту}_\text{ колони}_\text{ труб, } v^{10} = \text{час}_\text{ нерухомого}_\text{ контакту}_\text{ бурового}_\text{ інструменту}_\text{ зі}_\text{ стінкою}_\text{ свердловини, } v^{11} = \text{викривлення}_\text{ стовбура}_\text{ свердловини, } v^{12} = \text{тип}_\text{ бурового}_\text{ розчину, } v^{13} = \text{коефіцієнт}_\text{ тертя}_\text{ в}_\text{ зоні}_\text{ контакту, } v^{14} = \text{температура}_\text{ в}_\text{ стовбурі}_\text{ свердловини}_\text{ в}_\text{ момент}_\text{ прихоплення, } v^{15} = \text{фізико- механічні}_\text{ властивості}_\text{ фільтраційних}_\text{ кірок, } v^{16} = \text{абсолютна}_\text{ величина}_\text{ гідростатичного}_\text{ тиску, } v^{17} = \text{тип}_\text{ пластового}_\text{ флюїду, } v^{18} = \text{проникність}_\text{ породи}_\text{ в}_\text{ зоні}_\text{ прихоплення} \}$

$C^{51} = \{ c^1, c^2 \dots c^5 \} = \{ c^1 = \text{динаміка}_\text{ руху}_\text{ бурової}_\text{ колони, } c^2 = \text{проникність}_\text{ породи, } c^3 = \text{гідростатичний}_\text{ тиск, } c^4 = \text{пластовий}_\text{ тиск, } c^5 = \text{властивості}_\text{ промивальних}_\text{ рідин} \}$

$D^{51} = \{ d^1, d^2 \dots d^{10} \} = \{ d^1 = \text{діаметр}_\text{ поперечного}_\text{ перерізу}_\text{ свердловини, } d^2 = \text{обвал}_\text{ порід, } d^3 = \text{осідання}_\text{ порід, } d^4 = \text{жолоби, } d^5 = \text{сальники, } d^6 = \text{каверни, } d^7 = \text{осідання}_\text{ шлама, } d^8 = \text{застосування}_\text{ обважнювачів, } d^9 = \text{посадка}_\text{ колони, } d^{10} = \text{затяжка}_\text{ колони} \}$

Як свідчить аналіз літературних джерел та підтверджує досвід експертів виробничої сфери, для виділених технологічних параметрів в більшості випадків не вдається встановити точний робочий діапазон їх зміни, який можна було би використати для побудови контрольованих діапазонів і показників технологічних параметрів буріння нафти і газу, тому введення доменів зміни значень змінних з накладеними обмеженнями є ефективним методом ідентифікації можливих аварійних ситуацій на основі контролю значень технологічних параметрів у межах визначених доменів та накладених обмежень.

Згідно формалізації, представленої в [5, 6], ефективним методом вирішення проблем представлення та задоволення обмежень в нафтогазовій предметній області є звуження просторів пошукових задач. У випадку введеного формулювання (V^{51}, D^{51}, C^{51}) можемо отримати звужене формулювання з такою множиною змінних:

$V^{51'} = \{ v^1 = \text{вага}_\text{ бурового}_\text{ інструменту, } v^2 = \text{крутний}_\text{ момент}_\text{ обертання, } v^3 = \text{механічна}_\text{ швидкість}_\text{ проходки, } v^4 = \text{витрати}_\text{ бурового}_\text{ розчину}_\text{ на}_\text{ вході, } v^5 = \text{витрати}_\text{ бурового}_\text{ розчину}_\text{ на}_\text{ виході, } v^6 = \text{тиск}_\text{ бурового}_\text{ розчину}_\text{ нагнітання} \}$

Технологічно аварійна ситуація розглядається як наслідок відхилення значень контрольованих технологічних параметрів від встановлених діапазонів зміни (довірчих інтервалів).

В нашому підході аварійна ситуація розглядається як наслідок порушення змінними (технологічними параметрами) накладеної множини (системи, ієрархії) обмежень. Накладені обмеження впорядковуються експертами промислового буріння за ступенем їх значущо-

сті або, іншими словами, релевантності технологічній проблемі.

Згідно результатів опитування експертів, наведених у роботі [1], в нашому випадку отримаємо відповідні впорядковані системи обмежень за ступенем їх релевантності:

$$C^1 = \{c^5, c^{10}, c^9, c^{18}, c^{15}, c^3, c^{16}, c^{11}, c^8, c^{13}, c^{12}, c^4, c^1, c^2, c^7, c^6, c^{17}, c^{14}\}; C^2 = \{c^{11}, c^3, c^1, c^9, c^{13}, c^{12}, c^8, c^2, c^4, c^{15}, c^{10}, c^{18}, c^5, c^{16}, c^7, c^{14}, c^6, c^{17}\}; C^3 = \{c^4, c^{12}, c^7, c^3, c^8, c^{15}, c^2, c^{18}, c^{11}, c^{16}, c^{13}, c^5, c^9, c^{10}, c^{14}, c^1, c^6, c^{17}\}$$

Як свідчать побудовані множини обмежень, останні входження в кожній з них можна об'єднати в нову систему обмежень з низькою релевантністю, що означатиме, що їх можна відкинути в процесі послаблення початкового формулювання пошукової задачі. В той же час, обмеження, що йдуть на початку списку, мають високий рівень релевантності, і для них можна встановлювати в системі високі ступені переважності, що означатиме необхідність їх першочергового задоволення.

Ранжовані системи обмежень можна використовувати для виконання класифікації технологічних проблем в рамках технологічного процесу. Виконаний огляд літературних джерел свідчить, що в якості базової класифікаційної системи обмежень для технологічних проблем, пов'язаних з прихопленням бурової колони, можна розглядати наступну систему обмежень

$$C^{class.} = \{c^1, c^2 \dots c^7\}, \text{ де}$$

- c^1 - неможливість обертання бурової колони, c^2 - неможливість переміщення бурової колони, c^3 - затrudнення обертання бурової колони, c^4 - зменшення циркуляції розчину, c^5 - припинення циркуляції розчину, c^6 - різке зростання потужності, c^7 - збільшення тиску на викиді.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє сформулювати технологічну проблему контролю стану бурової колони у вигляді набору змінних

$$V^6 = \{v^1, v^2 \dots v^8\}, \text{ де}$$

- v^1 - механічна швидкість, v^2 - швидкість обертання, v^3 - переміщення бурової колони, v^4 - витрата бурового розчину на виході, v^5 - витрата бурового розчину на вході, v^6 - осьове навантаження на долото, v^7 - тиск бурового розчину на викиді, v^8 - потужність обертання бурової колони.

В роботах [1-3] дані змінні розглядаються як параметри стану бурової колони. Сам процес буріння як технологічна проблема в нашому випадку описуватиметься такими параметрами:

$$V^7 = \{v^1, v^2 \dots v^8\}, \text{ де}$$

- v^1 - частота обертання, v^2 - осьове навантаження на долото, v^3 - тиск бурового розчину, v^4 - глибина вибою, v^5 - середня швидкість буріння, v^6 - витрата бурового розчину на виході, v^7 - витрата бурового розчину на вході, v^8 - крутильний момент ротора.

В нашому підході контроль та запобігання процесу виникнення прихоплення бурової колони можна здійснити шляхом накладання систем обмежень

$$C^7 = \{C^{71}, c_2^7, c_3^7, c_4^7, c_5^7\}$$

$$C_1^{71} = \{c_1^{71}, c_2^{71}, \dots, c_7^{71}\},$$

де: C^{71} - система обмежень для змінних параметрів бурової колони $V_1^{71} = \{v_1^{71}, v_2^{71} \dots v_7^{71}\}$, де v_1^{71} - діаметр бурових труб, v_2^{71} - параметр компоновки низу бурової колони, v_3^{71} - діаметр центратора, v_4^{71} - діаметр долота, v_5^{71} - довжина бурової колони, v_6^{71} - азимут, v_7^{71} - зенітний кут; c_2^7 - вхідні керуючі впливи, c_3^7 - оснащення долота, c_4^7 - фізико-механічні властивості породи, c_5^7 - абразивні властивості породи.

Оскільки ряд технологічних процесів і технологічних проблем в області буріння характеризується невизначеністю, то доцільним є введення формулювання пошукових задач на основі обмежень з введеними мітками для змінних та обмежень, виду $(V : L_V^{set}, D, C : L_C^{set})$,

$$V : L_V^{set} = \{v_1 : l_V^1, v_2 : l_V^2, \dots, v_{n_1} : l_V^{n_1}, \lambda_{n_1, ON}\},$$

$$C : L_C^{set} = \{c_1 : l_C^1, v_2 : l_C^2, \dots, v_{n_2} : l_C^{n_2}, \lambda_{n_2, ON}\}.$$

Множина змінних, для яких слід ввести мітки, що описують невизначеність у випадку технологічної проблеми контролю прихоплення бурової колони, матиме вигляд: $V^{72} = \{v_1, v_2, \dots, v_8, V_1^{72}\}$ v_1 - властивості гірських порід, v_2 - азимут свердловини, v_3 - зенітний кут свердловини, v_4 - динаміка бурової колони, v_5 - талева система, v_6 - похибка вимірювання, v_7 - дискретність вимірювань, v_8 - періодичність контролю; V_1^{72} - параметри бурового розчину.

Для технологічної проблеми контролю прихоплення бурової колони вирішальне значення має утримання технологічних параметрів (змінних) в межах довірчих інтервалів, а саме: $V_D^8 = \{v_{d_1}^1, v_{d_2}^2, \dots, v_{d_8}^8\}$, де $\{d_i, OD_i\}_{i=1..8}$ для (V^8, D^8, C^8) , де d_i - довірчий інтервал змінної v_i , i - механічна швидкість буріння, v^2 - швидкість обертання бури, v^3 - тиск розчину на вході, v^4 - вага бурильного інструменту, v^5 - момент обертання, v^6 - витрати розчину на вході, v^7 - витрати розчину на виході, v^8 - проходка.

Усі визначені змінні, які відповідають технологічним параметрам процесу буріння, можна розділити на дві категорії:

- змінні числового типу, значеннями яких є дійсні числа;
- змінні, що приймають текстові або лінгвістичні значення.

Основні змінні I типу це: витрата бурового розчину на вході в свердловину, диференційні витрати бурового розчину, тиск на вході в свердловину, температура бурового розчину на вході, температура бурового розчину на виході, механічна швидкість буріння, об'єм бурового розчину, осьове навантаження на долото.

Прикладами змінних II типу є: якість бурової установки, якість інструменту, стан обладнання, стан приладів, стан бурової установки, дотримання технологічних норм, дотримання правил експлуатації.

Оскільки існуючі солвери пошукових задач на основі обмежень вимагають зведення пошукової задачі до числового представлення, то відповідно до значення змінних та обмежень в текстовій та лінгвістичній формі слід переводити в числове представлення згідно визначених шкал перетворень.

Найбільш вживаними лінгвістичними значеннями є: $\{задовільно, достатньо, добре\}$, $\{поганий, задовільний, нормальний\}$, $\{занижений, нормальний, завищений\}$, $\{низький, середній, нормальний, високий, надвисокий, критичний\}$ і т.д.

В роботі [1] представлено задачу запобігання прихопленням бурової колони у вигляді:

1) введення множини прихоплення бурової колони $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}_{k \in ON}$;

2) введення множини параметрів технологічного процесу $X = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}_{l \in ON}$, що визначають структуру контролю процесу прихоплення бурової колони;

3) опис діапазонів зміни кожного з введених параметрів $x_i \in [x_i^1; x_i^2]_{i=1..l}$;

4) введення функцій належності m_i для представлення поведінки параметрів x_i ;

5) введення матриці знань $KnowledgeMatrix$.

В запропонованому підході дана задача може бути описана у вигляді формальної структури представлення та задоволення обмежень з наступними кроками:

1. введення технологічних проблем, пов'язаних з виникненням прихоплення бурової колони $TP^{set} = \{TP^1, TP^2, \dots, TP^k\}_{k \in ON}$;

2. введення множини змінних $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}_{l \in ON}$, що відповідають контрольованим технологічним параметрам процесу;

3. введення множини доменів $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}_{l \in ON}$, що визначають області зміни для змінних з області V , і субдоменів $d_i \in MD_i$, що відповідають довірчим інтервалам технологічних параметрів, що представлені змінними $v_i, i = 1..N$;

4. введення системи нечітких обмежень $C^{fuzzy} = \{c_1 : l_{v_1}, c_2 : l_{v_2}, \dots, c_l : l_{v_l}\}$, де

$$l_{v_i} \hat{L}_{v_i}^{set} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{"Критичний"}}{[1.00;1.00]}, \frac{\text{"Надвисокий"}}{[0.98;0.99]}, \\ \frac{\text{"Високий"}}{[0.83;0.97]}, \frac{\text{"Нормальний"}}{[0.68;0.82]}, \\ \frac{\text{"Вище середнього"}}{[0.33;0.67]}, \frac{\text{"Середній"}}{[0.18;0.32]}, \\ \frac{\text{"Нище середнього"}}{[0.03;0.17]}, \frac{\text{"Низький"}}{[0.01;0.02]}, \frac{\text{"Найнищий"}}{[0.00;0.00]} \end{array} \right\}$$

у вигляді множини обмежень з лінгвістичними мітками;

5. побудова множини рішень $Solution^{set}$ в очікуваному просторі рішень $SolutionSpace$ на основі стандартного або модифікованого солвера для отриманого формулювання інформаційно-пошукової задачі на основі обмежень: $Solution^{set} = Sol(V, D, C^{fuzzy})$.

За допомогою обмежень можна також моделювати контрольовані технологічні параметри, що стосуються бурового обладнання [1,2,3]. Отримаємо таку множину змінних:

$$V^{equip} = \{v_1, v_2, \dots, v_{13}\},$$

де: v_1 - осьове навантаження на буровий інструмент, v_2 - подача бурового інструменту, v_3 - навантаження на гаку, v_4 - положення талевого блоку, v_5 - витрата бурового розчину, v_6 - тиск нагнітання бурового розчину, v_7 - частота обертання ротора, v_8 - крутний момент на гаку, v_9 - крутний момент на роторі, v_{10} - рівень розчину, v_{11} - витрата бурового розчину на виході v_{12} -

температура бурового розчину, v_{13} - густина бурового розчину.

Для введеної множини змінних може бути використана наступна множина доменів (довірчих інтервалів)

$$D^{equip.} = \{D_1, D_2, \dots, D_{13}\}, \text{ де}$$

$$\begin{aligned} & [d_1..400] \text{ H } D_1, [d_2..20] \text{ H } D_2, [1250..400] \text{ H } D_3, \\ & [d_4..40] \text{ H } D_4, [d_5..0.1] \text{ H } D_5, [d_6..25.4] \text{ H } D_6, \\ & [d_7..300] \text{ H } D_7, [d_8..60] \text{ H } D_8, [d_9..60] \text{ H } D_9, \\ & [d_{10}..1.6] \text{ H } D_{10}, [d_{11}..100] \text{ H } D_{11}, [d_{12}..100] \text{ H } \\ & \text{H } D_{12}, [800..2600] \text{ H } D_{13}. \end{aligned}$$

Введення системи обмежень уможливить контроль технологічного процесу:

$$C^{equip.} = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\},$$

де: c_1 - крутильний момент на роторі, c_2 - витрата бурового розчину на вході, c_3 - осьове навантаження на долото, c_4 - витрата бурового розчину на виході, c_5 - частота обертання ротора, c_6 - подача бурового інструменту, c_7 - тиск бурового розчину.

На основі фактичних даних виробничих процесів буріння нафти і газу, наведених в роботі [1], представимо процес ідентифікації можливого прихоплення бурової колони на основі введення змінних, їх доменів та накладання системи обмежень:

$$V^{ident.} = \{v_1, v_2, \dots, v_{13}\},$$

де: v_1 - пластовий тиск, v_2 - перепад тиску, v_3 - місце знаходження долота, v_4 - густина бурового розчину, v_5 - статична напруга зсуву, v_6 - статична напруга зсуву з затримкою, v_7 - в'язкість, v_8 - водовіддача, v_9 - зазор "бурова труба - стінка свердловини", v_{10} - довжина бурильної труби, v_{11} - викривлення стовбура свердловини, v_{12} - вміст змащувальної добавки, v_{13} - температура в зоні прихоплення.

Для введених змінних визначимо множину доменів:

$$D^{ident.} = \{D_1, D_2, \dots, D_{13}\}, \text{ де}$$

$$\begin{aligned} & [4.6..700] \text{ H } D_1; [1.0..270] \text{ H } D_2; [301..4785] \text{ H } \\ & \text{H } D_3; [1.16..2.05] \text{ H } D_4; [5..210] \text{ H } D_5; [11..300] \\ & \text{H } D_6; [36..200] \text{ H } D_7; [2.0..16.5] \text{ H } D_8; [7.0..77.5] \\ & \text{H } D_9; [10..247.3] \text{ H } D_{10}; [0..32] \text{ H } D_{11}; [1..18] \text{ H } \\ & \text{H } D_{12}; [24..110] \text{ H } D_{13}. \end{aligned}$$

Система обмежень в даному випадку визначатиметься трьома множинами обмежень $C^{ident.} = \{C_1^{ident.}, C_2^{ident.}, C_3^{ident.}\}$. Множина обмежень $C_1^{ident.}$ описує технологічні проблеми прихоплення як наслідок звуження перерізу стовбура, утворення сальників, процесу осідання

шламу та обважнювача; множина обмежень $C_2^{ident.}$ описує технологічні проблеми прихоплення як наслідок перепадів тиску, а множина $C_3^{ident.}$ описує технологічні проблеми, пов'язані із заклинюванням колони труб.

Таким чином можна виділити наступні системи обмежень, що описуватимуть категорії прихоплення:

$$C^1 = \{C_1^{ident.}, C_2^{ident.}, C_3^{ident.}\}, C^2 = \{C_3, C_{12}\},$$

$$C^3 = \{C_1, C_2\}, C^4 = \{C_4, C_7, C_5, C_6, C_8, C_{12}\},$$

$$C^5 = \{C_{10}, C_9, C_{11}\}$$

В роботі [1] представлено приклади лінгвістичних правил, які використовуються під час прийняття рішення щодо управління процесом буріння. Структура таких правил визначається введеними лінгвістичними значеннями. Покажемо, що такі правила на основі лінгвістичних змінних можна легко перетворити на обмеження на основі лінгвістичних змінних:

правило 1: якщо осьове навантаження на долото і бурову колону перевищує граничні значення, то можливе виникнення нештатної ситуації;

обмеження 1: граничні значення осьового навантаження долота і бурової колони визначають коректність процесу буріння;

правило 2: якщо спостерігається значне збільшення моменту на буровій колоні і значне збільшення тиску бурового розчину і зменшення механічної швидкості буріння, то існує висока ймовірність прихоплення бурової колони;

обмеження 2: прихоплення бурової колони визначається значним збільшення моменту на буровій колоні, тиску бурового розчину, зменшення механічної швидкості буріння.

правило 3: якщо спостерігається значне зменшення моменту і значне збільшення механічної швидкості буріння, то висока ймовірність переходу в зону аномально високого пластового тиску;

обмеження 3: перехід технологічного процесу з аномально високим тиском, визначається значним зменшенням моменту та значним збільшенням механічної швидкості буріння;

правило 4: якщо бурова колона переходить в зону з аномально високим тиском або змінюється сила опору обертанню бурової колони, то процес контролю стає некоректним;

обмеження 4: процес контролю вважається некоректним у випадку зони аномально високого пластового тиску або зміни опору обертанню бурової колони.

Крім того, обмеження є частиною формального апарату представлення та задоволення обмежень та інформаційно-пошукових задач на основі обмежень, практична цінність та перевага їх використання полягає також у використанні описів обмежень, форма яких наближається до природномовних описів.

Висновки. Пропоноване дослідження зосереджено на питаннях побудови формальної моделі представлення надзвичайних нештатних ситуацій в технологічних процесах буріння свердловин на нафту і газ у вигляді множин обмежень. Обробка таких обмежень здійснюється на основі контролю стану виділених технологічних параметрів з точки зору належності їх значень встановленим доменам. Таким чином, весь процес зводиться до опису задачі задоволення обмежень. Введені формальні представлення на основі наборів змінних, доменів та множин обмежень дозволяють формалізувати технологічний процес шляхом виділення технологічних проблем та їх станів, зокрема виділити надзвичайні нештатні стани. Наведено аналіз прикладу контролю прихоплень бурової колони, для якого виділено технологічні параметри у вигляді множини змінних з накладеними обмеженнями та введеними доменами зміни значень. Побудований приклад показує, що контроль значень змінних на основі накладених обмежень може бути використаний як ефективний метод ідентифікації нештатних ситуацій за виділеними технологічними параметрами.

Подальші дослідження даного напрямку будуть зосереджені на імплементації одержаного формального представлення у вигляді програмного механізму обробки обмежень та правил в інтелектуальній тьюторній системі технологічних тренінгів нафтогазової предметної області.

1 Шавранський М.В. Система контролю для запобігання прихоплень бурильної колони в процесі буріння: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Шавранський Михайло Васильович. - Івано-Франківськ, 2003. – 168 с.

2 Ясов В.Г. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: учебное пособие / В.Г. Ясов. – Ивано-Франковск: Факел, 2002. – С. 146-191.

3 Самотой А.К. Прихваты колонн при бурении / А.К. Самотой. – М.: Недра, 1984. – 205 с.

4 Шекета В.І. Інформаційна система для прогнозування нафтогазоносних покладів: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Шекета Василь Іванович. – Херсон, 1999. – 130 с.

5 Шекета В.І. Побудова інформаційної предикатної схеми як середовища виконання трансформації запитів користувача по напівструктурованій інформації нафтогазової предметної області / В.І. Шекета // Науковий Вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2003. – №2(6). – С.50-57.

6 Шекета В.І. Дослідження коректних трансформацій інформаційної предикатної схеми на множині об'єктів нафтогазової предметної області / В.І. Шекета // Науковий Вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – №3(9). – С.85-90.

7 Tsang, E. Foundations of Constraint Satisfaction. - Academic Press. – 1993. – 354 p.

8 R. Dechter. Constraint Processing. – Morgan Kaufmann Publishers. – 2003. – 500 p.

*Стаття поступила в редакційну колегію
18.08.10*

*Рекомендована до друку професором
В. М. Юрчишиним*