

УДК 681.5:622.24.054.33

НЕЧІТКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АЛМАЗНИХ ДОЛІТ ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

Г.Н. Семенцов, Л.Я. Чизур

76019 м. Івано-Франківськ, вул.Карпатська, 15, тел. 80342246067, 80342559697,
e-mail: chygur@ac.ifdtung.if.ua

Традиционные методы контроля не позволяют оценить работоспособность алмазных долот в процессе бурения скважины. Поэтому в данной статье анализируются возможности применения методов теории нечетких множеств и нечеткой логики для решения этой задачи. Предлагается детерминированную модель дополнить базой знаний экспертов. На базе такой модели разработан нечеткий контроллер и система поддержки принятия решений по управлению процессом бурения скважины на нефть и газ.

Відомо [1], що без бурового долота не обходиться жодна бурова установка і ефективність його роботи прямо впливає на собівартість 1 м проходки свердловини. Оскільки долото є специфічним виробом одноразового використання, який не підлягає ремонту чи реставрації, то до його працездатності та пошуку резерву в збільшенні ресурсу роботи висуваються підвищені вимоги. Статистика свідчить, що на буріння однієї глибокої свердловини (понад 4000 м) у середньому зараз витрачають у США - 19 доліт, в Європі - 60 доліт, у країнах СНД (у т.ч. і в Україні) - близько 300 доліт.

Долота працюють в стисненому просторі зі складною кінематикою і динамікою навантаження всіх робочих елементів. При цьому осьове навантаження на долото становить 20÷400 кН, частота його обертання знаходиться в діапазоні 0,7÷20 с⁻¹, долото працює в абразивному і корозійно-активному середовищі за умов значної динамічності прикладання навантажень та вібрації компоновки низу бурильної колони. До цього необхідно додати, що робота долота протікає за високого гідростатичного тиску, який іноді досягає 6000-8000 МПа. На долото передається крутний момент до 2,8 кН·м, очисний агент витікає із насадки зі швидкістю 50÷100 м/с. Важкі енергетичні і гідравлічні умови роботи, а також конструктивні особливості зумовлюють низьку стійкість та підвищення спрацювання бурових доліт.

У зв'язку з цими обставинами актуальними є роботи щодо контролю за технічним станом долота в процесі буріння свердловини, в тому числі алмазних доліт і доліт, в опорах яких використовуються алмазні підшипники, доліт з алмазним покриттям твердосплавних зубців.

The traditional monitoring methods can not estimate the technical condition of diamond bit in the drilling process. The methods based on fuzzy set theory and fuzzy logic have been analyzed in our article solving this problem. We offer to add the knowledge base of experts the determined model. A fuzzy controller and expert system have been developed on the base of such model. This system can support and make control decisions during well drilling.

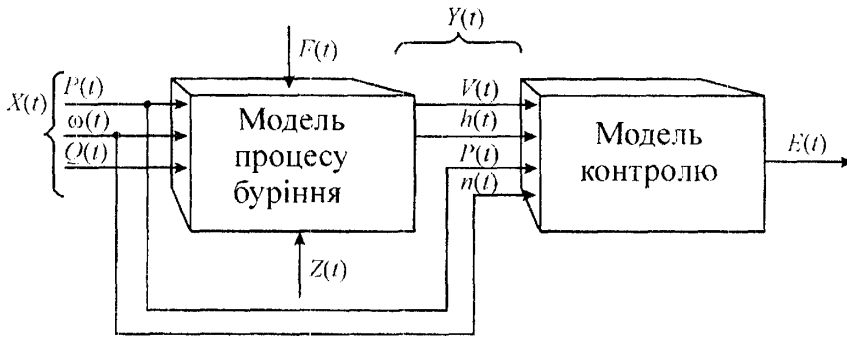
Алмаз має унікальні властивості: він володіє зносостійкістю, яка в тисячу разів перевищує зносостійкість твердого сплаву і при цьому відводить тепло від поверхонь тертя в п'ять разів швидше.

Тому у вирішенні завдання підвищення ефективності буріння свердловин на нафту і газ доцільно зосередити увагу на цьому технологічному процесі. Зважаючи на те, що буріння свердловин - це складний технологічний процес, особливістю якого є нестационарність і взаємозв'язок більшості процесів, що виникають у стовбурі свердловини і оточуючому масиві гірських порід, найважчим у математичній формалізації являється опис роботи долота на вибій свердловини. Це завдання ускладнюється ще й тим, що поглиблення свердловини алмазними долотами описується математичним співвідношенням, відмінним від виведених для тришарових доліт. При цьому критерії якості процесу незіставними.

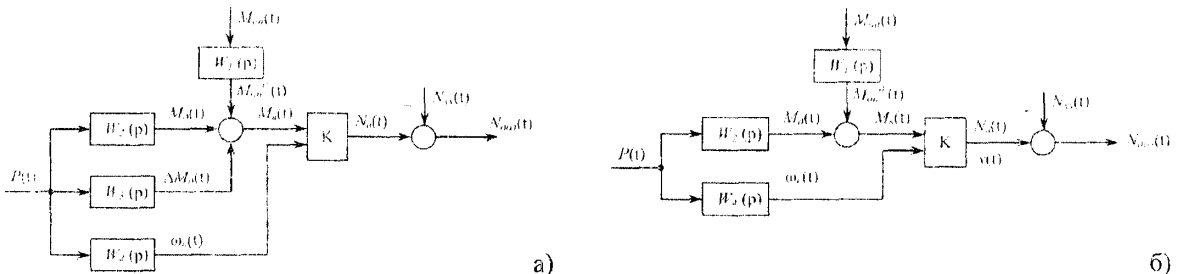
Отже, в цьому випадку представляє інтерес розробка більш загального і універсального критерію оптимізації відпрацювання доліт, що базується на енергетичному підході до моделювання системи "долото - гірська порода" [2], а також більш загальні і універсальні критерії оптимізації відпрацювання алмазного породоруйнівного інструменту. Одним із них є мінімум питомих енерговитрат на метр проходки, або на кубічний метр вибуреної породи, який базується на енергетичному підході до моделювання, системи "долото - порода".

Уперше цей критерій був запропонований в 1965 році [4] і для його реалізації був створений давач питомих енерговитрат [3,5,6]. Пізніше було доведено [7], що питоми енерговитрати є важливим інформативним параметром, який характеризує твердість гірських порід. Проте невирішеним залишається питання мо-





$F(t), Z(t)$ – контрольовані і неконтрольовані збурюючі впливи
Рисунок 1 – Структура моделі об'єкта контролю



$P(t)$ – осьове навантаження на долото; $M_{on}(t)$ – момент статичного опору на долоті; $N_b(t)$ – механічна потужність на валі електродвигуна; $M_b(t)$ – момент на валі електродвигуна – стаціонарні випадкові процеси,

Рисунок 2 – Структури формування потужності на валі двигуна електробура: а) з урахуванням діаметра долота; б) без урахування зміни діаметра долота в міру його зношення

делювання процесу поглиблення свердловини алмазними долотами на енергетичних засадах. Тому актуальним є розгляд динаміки процесу руйнування породи на вибої свердловини електробуром з алмазними долотами і створення інформаційної моделі для контролю відпрацювання породоруйнівного інструменту та оцінювання твердості гірських порід.

Метою даної роботи є удосконалення методу контролю технічного стану алмазних доліт під час буріння свердловин електробурами за рахунок використання критерію "мінімум питомих енерговитрат", експертних знань, методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки.

Врахуємо, що породоруйнівний інструмент - це динамічна ланка, яка своїми властивостями наближається до реальної інтегруючої ланки з позиції теорії автоматичного керування, тому що в породоруйнівному інструменті накопичується знос оснащення і опір залежно від виконаної роботи в процесі поглиблення свердловини. Проходка на долото h також є інтегралом механічної швидкості буріння v . Враховуючи це, модель процесу руйнування породи алмазним долотом представимо у вигляді структури, що зображена на рис. 1. Вхідними впливами $x(t)$ є швидкість обертання долота $\omega(t)$, осьове навантаження на долото $P(t)$ і витрата бурового розчину $Q(t)$. Вихідними величинами $y(t)$ слугують механічна швидкість буріння $v_w(t)$, проходка $h(t)$, питомі енерговитрати $E(t)$, що характеризують результат дії керуючих впли-

вів $X(t)$ на долото і підведеної потужності $N(t)=kP(t)\omega(t)$, де k – коефіцієнт пропорційності.

Потужність, що витрачається на руйнування породи вибоєм свердловини, залежить від осьового навантаження на долото P і швидкості його обертання ω , причому ця залежність визначається властивостями механічної характеристики привода долота $\omega=f(M)$, де M - момент на валі двигуна, і фізико-механічними властивостями розбурюваних порід.

Найбільш точно оцінювання технічного стану алмазних доліт і фізико-механічних властивостей гірських порід у процесі буріння може бути здійснено під час буріння свердловин електробурами, коли потік енергії, що підводиться до двигуна, є носієм інформації про процеси, що відбуваються на вибої свердловини.

Представимо структуру формування потужності на валі двигуна електробура у такому вигляді (рис. 2):

$$W_1(p) = \frac{M_{on}^o(p)}{M_{on}(p)};$$

$$W_2(p) = \frac{M_o(p)}{P(p)};$$

$$W_3(p) = \frac{\Delta M_o(p)}{P(p)};$$



$$W_4(p) = \frac{\omega_g(p)}{P(p)}$$

де: $M_{on}(p)$, $M_{on}^0(p)$, $P(p)$, $\omega_g(p)$ – зображення за Лапласом відповідно до моменту статичного опору $M_{on}(t)$ на долоті, моменту електродвигуна $M_{on}^0(t)$, законів зміни осьового навантаження на долото $P(t)$ і кутової швидкості обертання $\omega_g(t)$ вала електродвигуна; $M_o(p)$ – зображення за Лапласом динамічного моменту на валі електродвигуна, рівного

$$M_o(t) = I \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де: I – сумарний момент інерції долота і шпинделя, зведений до вала електродвигуна електрорура; $\Delta M_o(p)$ – зображення за Лапласом складової динамічного моменту на валі двигуна, що залежить від кута повороту α

$$\Delta M_o(p) = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI}{d\alpha}. \quad (2)$$

Враховуючи рівняння зв'язку моменту на валі $M_o(t)$ з потужністю $N_g(t)$ на валі двигуна електрорура,

$$N_g(t) = \omega_g(t)M_o(t), \quad (3)$$

а також враховуючи формули (1) і (2), одержимо, використовуючи рівняння Д'Аламбера, вираз для потужності на валі двигуна електрорура

$$N_g(t) = \omega_g(t) \left[M_{on}(t) + I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI}{d\alpha} \right], \quad (4)$$

що відповідає структурі формування потужності на валі двигуна електрорура, яка зображена на рис. 2.

Якщо знехтувати зміною діаметра долота в міру його зношення, то тоді

$$\Delta M_o(t) = 0 \text{ і } W_3(p) = 0, \quad (5)$$

і, отже, структура, зображена на рис. 2 а, може бути спрощена (рис.2б).

На рисунку 2б прийняті такі позначення: $N_{вт}(t)$ – втрати потужності на тертя в підшипниках, шпинделі та ін.; $N_{доп}(t) = \frac{dA}{dt} = Ap$ – меха-

нічна потужність, яка підводиться до долота, Дж/с; A – робота, що витрачається на знос долота. Дж; p – оператор перетворення Лапласа

$$p = \frac{d}{dt}.$$

Потужність $N_{вт}(t)$, що витрачається на обертання долота, витрачається не тільки на руйнування породи вибою, але й на руйнування стінок свердловини, подолання сил тертя до вибою та стінок свердловини. Тому треба враховувати ККД передачі енергії від долота до гірської породи. Він для шарошкових доліт дорівнює $ККД_{ш} \approx 0,1 \div 0,15$; для алмазних доліт $ККД_{А} \approx 0,01 \div 0,02$.

Дослідженнями [7] доведено, що найбільш інформативним параметром, який має кореляційний зв'язок з твердістю породи і технічним станом долота, є питомі витрати енергії на по-

глиблення свердловини. Вони пов'язані з параметрами режиму буріння і долота такою формулою:

$$w = \frac{\eta \frac{M\omega}{975} + Fv}{c v d^2 (1 + k v d^2 Q^{-1})} \left[\frac{\kappa B m \cdot \omega d}{\text{м}^3} \right], \quad (6)$$

де: η – коефіцієнт корисної дії породоруйнівного інструменту; M – момент на долоті; ω – швидкість обертання долота; F – осьове навантаження на долото; v – механічна швидкість проходки; c – константа, яка дорівнює 0,1; d – діаметр долота; k – коефіцієнт, який залежить від властивостей бурового розчину; Q – витрата бурового розчину.

З виразу (6) випливає, що коефіцієнт твердості w є комплексним показником, який враховує властивості породи, параметри режиму буріння F , ω , Q , діаметр долота d , механічну швидкість проходки v , момент на долоті M , а також властивості бурового розчину та особливості його подавання на вибій свердловини.

Одразу ж можна зазначити, що питомі енерговитрати (ПЕВ) є одним із важливих техніко-економічних показників процесу поглиблення свердловин на нафту і газ. Він використовується для оцінки фізико-механічних властивостей гірських порід, технічного стану інструменту, а також як критерій оптимальності процесу буріння. Його контроль дає змогу оперативно здійснювати керування технологічним процесом буріння і прогнозувати кінцевий результат.

Залежно від потужності двигунів привода бурової лебідки і роторного стола, або електрорура ПЕВ можуть змінюватись у діапазоні від $B=10 \div 15$ кВт·год/м до $B=100$ кВт·год/м і більше. Вони залежать від великої кількості параметрів, що характеризують фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід на різних глибинах свердловини, технічного стану породоруйнівного інструменту, параметрів режиму буріння та ін. Тому контроль ПЕВ під час буріння свердловин роторним способом з використанням дизельного або електричного привода, пов'язаний зі значними методологічними та технічними труднощами і повинен відповідати вимогам польових умов щодо температури та вологості [7].

У моделях, розроблених різними авторами, що пов'язують проходку на долото, механічну швидкість проходки, інтенсивність спрацювання оснащення долота, термін служби опор долота з параметрами режиму буріння, цей показник відображений у вигляді сталих коефіцієнтів рівняння математичної моделі процесу поглиблення свердловини. Це дало можливість сформулювати задачу ідентифікації параметрів моделі роботи долота на вибій свердловини і розробити основні засади методу контролю технічного стану алмазних доліт і твердості порід на основі інформації про питомі енерговитрати.



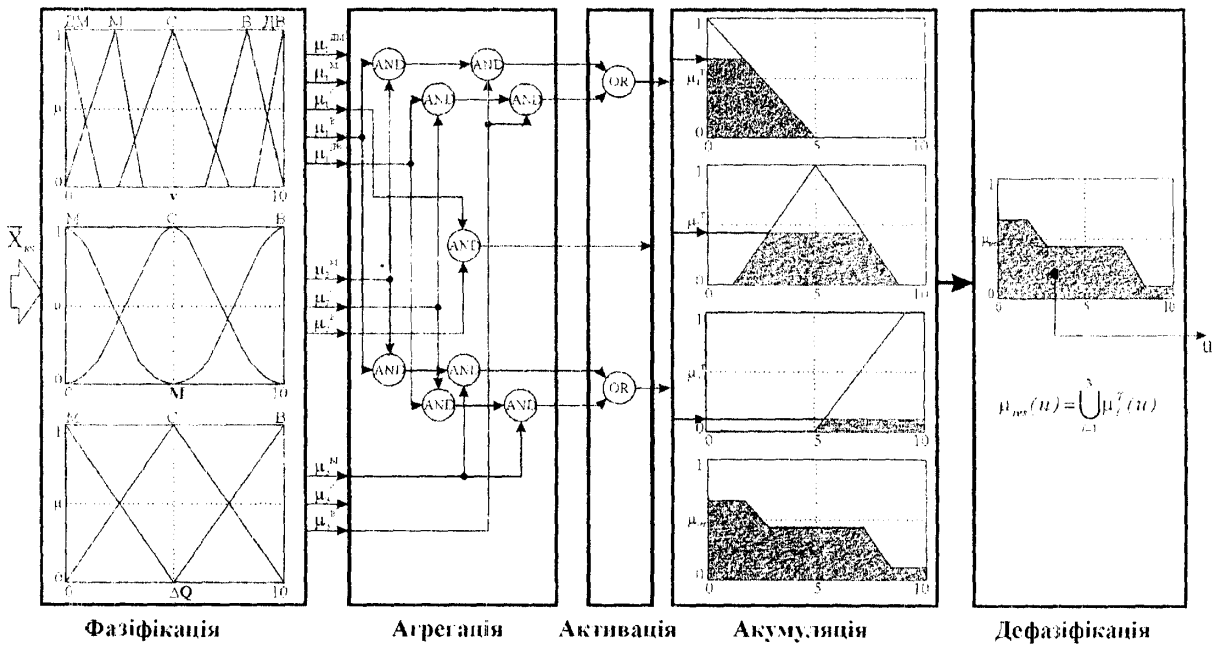


Рисунок 3 – Фазі-проект системи контролю технічного стану алмазних доліт під час буріння свердловин електробурами

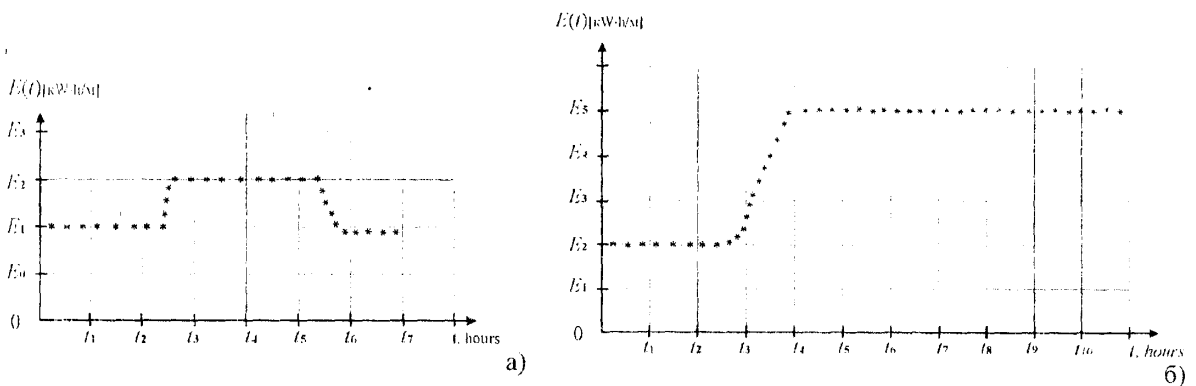


Рисунок 4 – Графіки зміни $E(t)$: а) під час переходу алмазним долотом у більш тверді породи в інтервалі часу $t_2 \pm t_3$ і повернення в м'які породи в інтервалі $t_5 \pm t_6$; б) внаслідок катастрофічного зношення алмазного долота

Враховуючи певну невизначеність інформації та її нечіткість, використані методи логічної обробки інформації на базі нечіткої логіки.

Розроблено фазі-проект системи контролю, основними складовими якого є процедури фазіфікації, інференціювання і дефазіфікації (рис. 3).

Перша частина (блок фазіфікації) призначена для того, щоб з чітких величин вектора контрольованих параметрів $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ отримати нечіткі діапазони. Наприклад, осьове навантаження на долото: "невелике", "середнє", "велике".

У другому блоці здійснюється інференціяція (логічна обробка) за допомогою правил, що мають таку структуру: ЯК-ЩО...ТО...ІНАКШЕ...

Правила містять знання експертів про те, що треба робити, якщо стала справедливою од-

на з властивостей, сформульована при фазіфікації.

Даними для дефазіфікації є нечіткі дані, що поступають після інференціяції і цифрові та аналогові сигнали. Задачі дефазіфікації зворотні задачам фазіфікації, але перетворити нечіткий результат логічної обробки в аналоговий сигнал досить складно.

Система контролю такого типу дає змогу використовувати не тільки вимірювальну інформацію на основі класичного спостерігача, але й досвід експертів у вигляді бази знань.

Це підвищує ефективність і вірогідність оцінки технічного стану алмазних доліт і твердості порід у процесі поглиблення свердловини.

У зв'язку з тим, що буріння алмазними долотами здійснюється на постійних параметрах режиму $P=const, \omega=const, Q=const$, то внаслідок особливостей закономірності зношування алма-



зних доліт, зміни механічної швидкості проходки спостерігаються лише в разі зміни технічного стану долота або фізико-механічних властивостей гірських порід. На рис. 4 зображено графік зміни в часі питомих енерговитрат під час буріння свердловини алмазним долотом.

У разі катастрофічного зношення алмазного долота механічна швидкість проходки практично дорівнює нулю $v_n \approx 0$, і тому питомі енерговитрати сильно зростають і тримаються на такому рівні тривалий час аж до підйому долота з вибоку або його руйнування (рис. 6).

Отже, величина $E(t)$ є сталою в кожному однорідному пласті і змінюється після переходу межі пластів. Для визначення цього переходу врахували, що $E(t)$ являє собою стаціонарний випадковий процес, математичне сподівання якого стрибком змінює своє значення після переходу долота із однієї породи в іншу. Оскільки величина $E(t)$, що спостерігається, пошкоджена, то в кожен момент часу треба прийняти рішення про перехід долота в інший пласт.

Для цього використали рекурентний алгоритм [5]

$$G = \sqrt{1 - n^{-1}} G_{n-1} + \frac{g_n - \sigma_{E,i}^2}{\sigma_{E,i}^2 \sqrt{2n}}, \quad (7)$$

де $g_n = (E_i - \bar{E})^2$;

$\bar{E} = n^{-1} \sum_{i=1}^n E_i$ - оцінка математичного сподівання випадкової величини E_i ;

$$\sigma_{E,i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2$$
 - дисперсія,

n - кількість спостерігаючих значень.

Математичне сподівання функції G до моменту зміни пласта дорівнює нулю, а після зміни пласта монотонно зростає в часі. Для визначення межі пластів застосована процедура порівняння на кожному кроці обчислень величини G з деяким пороговим значенням Δ . Оцінкою моменту переходу долота в інший пласт є виконання умови $G \geq \Delta$. Оскільки випадкові величини G_n до переходу долотом межі пластів розподілені нормально з математичним сподіванням 0 і дисперсією 1, то з вірогідністю 0,98 усі значення G_n знаходяться в інтервалі $-2,5 \div +2,5$, тобто значення $\Delta = 2,5$.

Проте зміна показника $G_n(t)$ може бути зумовлена не тільки зміною фізико-механічних властивостей порід, але і зміною технічного стану алмазного долота, створенням різних перед аварійних ситуацій і ускладнень [2,5]. Тому створюється нечітка ситуація, яка вирішується шляхом використання знань експертів.

Сформована база правил, а саме:

(8) ЯКЩО $G_j \in LE_1^j$ І $E \in LE_2^j$ ТОДІ $T \in LE_3^j$,
 $j=1, \dots, M$,

де: LE_k^j ($k=1,2,3$) є лінгвістичними змінними відповідно "малий", "середній", "великий" і т.д.; M - кількість правил, T - технічний стан долота, E - питомі енерговитрати.

Висновок. На відміну від відомих методів контролю технічного стану бурових доліт запропоновано використати новий критерій оцінювання технічного стану алмазних доліт - мінімум питомих енерговитрат на буріння погонного метра свердловини або на 1 м^3 вибуреної породи. Враховуючи, що ознаки спрацювання алмазного долота іноді збігаються з ознаками переходу долота в породи з іншими фізико-механічними властивостями, запропоновано використати додатково нечітку модель і нечіткий контролер. Це дало можливість у реальному часі оцінювати не тільки технічний стан алмазних доліт, але й визначати межі гірських порід і деякі аварійні ситуації та ускладнення. Розроблений метод контролю сприяє підвищенню вірогідності і точності оцінки технічного стану алмазних доліт у процесі буріння свердловин на нафту і газ електробурами змінного та постійного струмів.

Література

1 Марік В.Б., Крижанівський Е.І., Довжок В.Є., Гук Р.Й. Актуальні проблеми тришарошкових доліт //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - 2003. - Вип. №2(7). - С.109-113.

2 Стетюха Е.И., Голев А.А. Моделирование и оптимизация процесса отработки долота //Автоматизация и телемеханизация в нефтяной промышленности. - М: ВНИИОЭНГ - 1984. - Вип.2. - С.14-19.

3 Семенов Г.Н., Бестелесный А.Г. Результаты исследований статического преобразователя удельных энергозатрат (СПУЭ) //Элементы и системы автоматики в нефтяной промышленности. - Киев: Техніка. - 1974. - С.145-150.

4 Семенов Г.Н., Петров И.П., Ситников Н.Б. Датчик удельного расхода электроэнергии и результаты его испытаний // Изв. ВУЗов Горный журнал. - 1965. - №9. - С. 60-65.

5 Семенов Г.Н. Автоматизация процесса бурения свердловин: Навчальний посібник з курсу "Автоматизация процесса бурения свердловин". - Івано-Франківськ. - 1998. - 300с.

6 Семенов Г.Н., Бестелестый А.Г. Результаты исследований статического преобразователя удельных энергозатрат. //Тезисы докладов научно-технич. конференции АЗИНЕФТЕХИМ. - Баку - 1970. - С. 83-84.

7 Семенов Г. Н., Кузь Т. Я. Інформаційна модель контролю питомих енерговитрат на поглиблення свердловин // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2001. -№ 1. - С. 76-80.

