

УДК 622.24:622.143

UDC 622.24:622.143

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ БУРЕНИЕМ СКВАЖИН**MATHEMATICAL MODEL OF SPEED OF THE DRIVING FOR OPTIMUM CONTROL OF DRILLING OF WELLS**

Цуприков Александр Александрович

Tsouprikov Aleksandr Aleksandrovich

к.т.н., доцент

Cand.Tech.Sci., associate professor

РИНЦ SPIN-cod=6454-3658

RSCI SPIN-code=6454-3658

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия**Kuban state technology university, Krasnodar, Russia*

Известные математические модели механической скорости проходки являются функциями двух основных параметров управления – осевой нагрузки на долото и скорости вращения долота. Третий параметр – расход бурового раствора, от которого зависит очистка скважины от выбуренной породы, содержится в явном или неявном виде только в модели А.А. Погарского. На буровой управление процессом проводки скважины выполняется регулированием только одного параметра – нагрузки на долото, при этом остальные параметры поддерживаются постоянными согласно проекту на бурение. Однако, практика бурения свидетельствует, что функция скорости бурения имеет экстремумы и для скорости вращения долота, и для расхода раствора. В работе выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных бурения для получения математической модели механической скорости проходки как функции трёх параметров управления, при этом получены модели скорости бурения, зависящие отдельно от каждого из параметров при поддержании двух остальных постоянными. Построены графики приближающих функций с точками данных бурения из рапортов буровых мастеров.

Описана методика адаптивного оптимального управления процессом с помощью полученной модели трёх переменных: по текущим данным бурения через заданный интервал времени с помощью метода наименьших квадратов постоянно пересчитываются коэффициенты модели бурения – тем самым модель постоянно подстраивается под условия на забое скважины. По адаптированной модели определяются оптимальные параметры управления бурением, они устанавливаются на буровом станке и производится разбуривание забоя в оптимальном режиме. При смене породы коэффициенты модели снова подстраиваются под забойные условия, определяются оптимальные для данной породы параметры управления и т.д. Поскольку модель постоянно адаптируется к забою, в качестве модели можно взять стандартный полином второй степени и пересчитывать его коэффициенты. Это позволит также определять новые виды моделей для управления процессом бурения

Known mathematical models of mechanical speed of a driving are functions of two key parameters of management – axial load of a chisel and speeds of rotation of a chisel. The third parameter – a consumption of boring solution on which cleaning of a well of destroyed breed depends exists only in the A.A. Pogarsky model in an obvious or implicit way. The drilling management of the process of conducting of the well is carried out by regulation only of one parameter – loads of a chisel, thus other parameters are supported by constants according to the project on drilling. However, practice of drilling testifies that function of speed of drilling has extremum and for the speed of rotation of a chisel, and for a solution consumption. In work the regression analysis of experimental data of drilling for receiving mathematical model of mechanical speed of a driving is made as functions of three parameters of management, thus are received the models of speed of drilling depending separately on each of parameters at maintenance of two others constants. Schedules of the approaching functions with points of data of drilling from official reports of drilling foremen are constructed. The technique of adaptive optimum control of process by means of the received model of three variables is described: according to the current data of drilling through the set time interval by means of a method of the smallest squares drilling model coefficients constantly are recalculated - thereby the model is constantly arranged under conditions on a well face. Optimum parameters of management of drilling are determined by the adapted model, they are established on the drilling rig and the face drilling in the optimum mode is made. At breed change coefficients of model are again arranged under bottomhole conditions, optimum parameters of management for this breed, etc. are defined. As the model constantly adapts to a face, as a model it is possible to take a standard polynomial of the second degree and to recalculate its coefficients. It will also allow defining new types of models for management of drilling process

Ключевые слова: МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ БУРЕНИЯ. АДАПТИВНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Keywords: MODEL OF MECHANICAL SPEED OF DRILLING. ADAPTIVE OPTIMUM CONTROL

Модель Погарского А.А. [3] для механической скорости бурения v_m позволяет неявно учитывать влияние расхода и давления промывочной жидкости и имеет вид:

$$v_m = \frac{a \cdot n^\alpha \bar{G}^2}{1 + b^4 \bar{G}^4},$$

где G – осевая нагрузка на долото,

n – скорость вращения долота,

Q – расход бурового раствора,

a – коэффициент буримости породы,

b и α – коэффициенты, задающие аналитическую форму модели.

Коэффициент b зависит от расхода раствора Q и гидравлической мощности, приложенной к долоту N_d и для максимальной скорости $v_m = \max$ определяется как $b = 1/\bar{G}$.

Математическая модель механической скорости проходки (1) доработана автором и отличается от модели Погарского тем, что в неё явно введён параметр Q , что является важным для системы управления процессом бурения.

$$v_m = k_\sigma \frac{n^\alpha G^2 Q^\beta}{1 + b^4 G^4}, \quad (1)$$

где β – показатель степени, задающий форму функции $v_m = f(Q)$,

В практике бурения принято, что основным параметром управления является нагрузка на долото G , остальные параметры принимаются постоянными, их значения зависят от интервала проходимых пород и изменяются в проекте на бурении только при смене твёрдости породы. Поэтому мо-

дель (1) отражает принятые бурением принципы – управлять осевой нагрузкой G при фиксированных оборотах n и расходе Q .

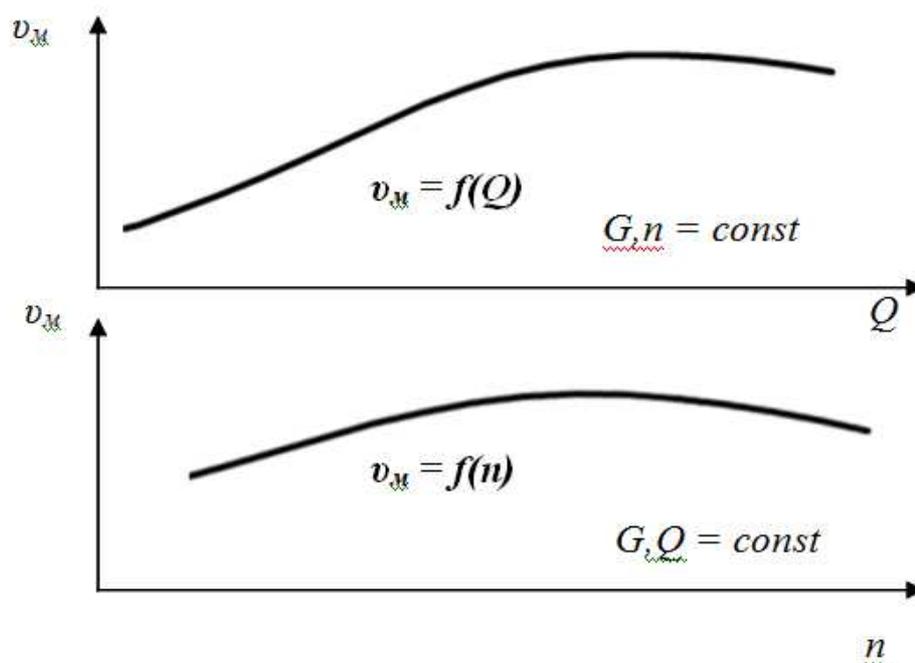


Рисунок 1 Зависимости $v_m = f(Q)$ при $G, n = const$;

$$v_m = f(n) \text{ при } G, Q = const$$

Зависимость (1) пригодна для поиска оптимальных параметров бурения, однако она позволяет найти только локальный максимум функции скорости по параметру G_{opt} , т.к. он определяется для фиксированных оборотов долота n и расхода раствора Q .

Известно, что зависимости $v_m = f(n)$ и $v_m = f(Q)$ также являются кривыми выпуклого вида, т.е. имеют свои максимумы (рис. 1).

Физически это объясняется тем, что если $G = const$, то при малых оборотах долота его зубья недостаточно сцепляются с забоем и скорость бурения мала. При больших n происходит проскальзывание долота по забою, что также снижает механическую скорость. Аналогично для расхода раствора Q : при небольших величинах расхода он не обеспечивает качественную очистку забоя, происходит повторное перемалывание шлама и ско-

рость бурения невелика. При больших расходах напор бурового раствора препятствует вращению долота, т.к. ему приходится преодолевать дополнительное гидравлическое сопротивление в промывочных отверстиях долота и на забое.

Для поиска глобального максимума можно использовать в САУ математическую модель, которая имеет экстремумы для всех трёх параметров управления G , n и Q .

$$v_m = k_b \frac{nG^2Q}{(1 + b_n n^4)(1 + b_G G^4)(1 + b_Q Q^4)}, \quad (2)$$

где

b_n, b_G, b_Q -коэффициенты, определяющие аналитическую форму функции $v_m = f(G, n, Q)$

Ограничения:

$$0 \leq G \leq G_{max};$$

$$0 \leq n \leq n_{max};$$

$$0 \leq Q \leq Q_{max},$$

где $G_{max}, n_{max}, Q_{max}$ – максимально возможные по ресурсам бурового станка значения G, n, Q .

Модель получена автором в результате регрессионной обработки данных проводки 22 скважин в филиале "Краснодар бурение" ООО "Газ-промбурение". Сводные данные по пробуренным скважинам приведены в таблице 1. В ней для определения функции $v_m = f(Q)$ были выделены однородные по буримости пород интервалы и фрагменты, в которых осевая нагрузка G и обороты ротора n поддерживались постоянными, изменялись только значения расхода Q и механической скорости v_m – столбец $v_m(Q)$. Аналогично выделялись фрагменты с постоянными G и Q для получения зависимости $v_m = f(n)$ - столбец $v_m(n)$.

Полученная приближающая функция имеет вид:

$$v_m = 2,4 \cdot 10^{-5} \frac{nG^2Q}{(1 + 10^{-8}n^4)(1 + 10^{-5}G^4)(1 + 1,2 \cdot 10^{-7}Q^4)} \quad (3)$$

Приближающие функции для $v_m = f(G)$, $v_m = f(n)$ и $v_m = f(Q)$ имеют вид:

$$v_m(G) = 2 \cdot 10^{-5} \frac{nG^2Q}{(1 + 10^{-5}G^4)} \quad (4)$$

$$v_m(n) = 10^{-8} \frac{nG^2Q}{(1 + 10^{-8}n^4)}, \quad (5)$$

$$v_m(Q) = 2 \cdot 10^{-5} \frac{nG^2Q}{(1 + 1,2 \cdot 10^{-7}Q^4)}, \quad (6)$$

Таблица 1

G	n	Q	$v_m(G)$	$v_m(n)$	$v_m(Q)$	$v_m(G,n,Q)$
1	2	3	4	5	6	7
1	40	12	0,04	3,6	1,6	0,01
2	45	14	0,55	4,8	3,2	0,05
3	45	17	0,33	4,8	3,8	0,15
4	45	18	0,89	5,8	4,1	0,28
5	60	19	1,22	5,7	5,3	0,56
6	60	20	1,31	5,7	5,5	0,84
7	60	21	1,77	6,2	5,7	1,18
8	65	22	1,67	6,8	5,9	2,15
9	65	23	2,81	6,8	6,1	3,02
10	70	26	3,76	6,0	6,7	3,48
12	70	27	4,81	7,0	6,8	4,50
13	75	28	5,26	6,0	7,0	5,16
14	75	30	5,24	6,0	7,3	5,86
15	80	31	5,23	6,5	6,5	5,44
16	80	32	5,72	6,0	6,6	5,75
17	85	35	5,85	5,9	6,9	5,65
18	86	36	5,80	5,9	7,0	5,32
19	90	37	5,50	5,8	6,1	5,20
20	95	41	5,39	5,6	6,3	5,02
21	100	50	5,24	5,4	6,0	4,41
22	120	61	5,06	4,4	4,8	2,47

По уравнениям (3) - (6) рассчитаны данные таблицы 2. В ней приняты обозначения:

K_b, k_n, k_Q, k_G – размерные коэффициенты пропорциональности для определения регрессионных зависимостей $v_m = v_m(G), v_m = v_m(n), v_m = v_m(Q)$ и $v_m = v_m(GnQ)$.

b_G, b_n, b_Q - коэффициенты формы кривых для соответствующих функций.

Графики опытных данных бурения и их приближающих функций приведены на рис. 2.

Таблица 2

K_b	G	n	Q	$v_m(G)$	$v_m(n)$	$v_m(Q)$	$v_m(G,n,Q)$
1	2	3	4	5	6	7	8
2,4E-05	1	40	12	0,04	4,4	2,8	0,01
	2	44	14,5	0,15	4,7	3,3	0,06
b_G	3	48	17	0,33	5,1	3,9	0,17
0,00001	4	52	19,5	0,59	5,4	4,4	0,36
	5	56	22	0,92	5,7	4,9	0,65
b_n	6	60	24,5	1,31	5,9	5,4	1,06
1E-08	7	64	27	1,77	6,1	5,8	1,60
	8	68	29,5	2,27	6,3	6,2	2,24
b_Q	9	72	32	2,81	6,3	6,5	2,94
1,2E-07	10	76	34,5	3,36	6,4	6,8	3,67
	12	80	37	4,41	6,4	7,0	4,91
k_n	13	84	39,5	4,86	6,3	7,0	5,41
2,1E-05	14	88	42	5,24	6,2	7,0	5,72
	15	92	44,5	5,53	6,0	7,0	5,81
k_Q	16	96	47	5,72	5,8	6,8	5,71
0,00002	17	100	49,5	5,83	5,6	6,6	5,44
	18	104	52	5,85	5,4	6,4	5,04
k_G	19	108	54,5	5,80	5,1	6,1	4,56
1,3E-05	20	112	57	5,69	4,9	5,8	4,04
	21	116	59,5	5,54	4,6	5,5	3,52
	22	120	62	5,36	4,4	5,2	3,03

Графики показывают хорошую точность аппроксимации кривых с

опытными данными проводки скважин. Выявленный характер зависимостей известен в практике бурения, он совпадает с кривыми, приводимыми в трудах [1, 2, 3, 4 и др.].

На роль основного уравнения модели механического разрушения породы долотом при гидравлической промывке забоя для детерминировано-адаптивной системы управления процессом бурения могут претендовать зависимости (1) и (2). В практике бурения принято, что управление процессом выполняется, в основном, регулированием осевой нагрузки G при фиксированных n и Q , заданных проектом, однако предпочтение следует отдать модели (2), т.к. она позволяет определять глобальный максимум механической скорости по трём параметрам управления, а не по одному.

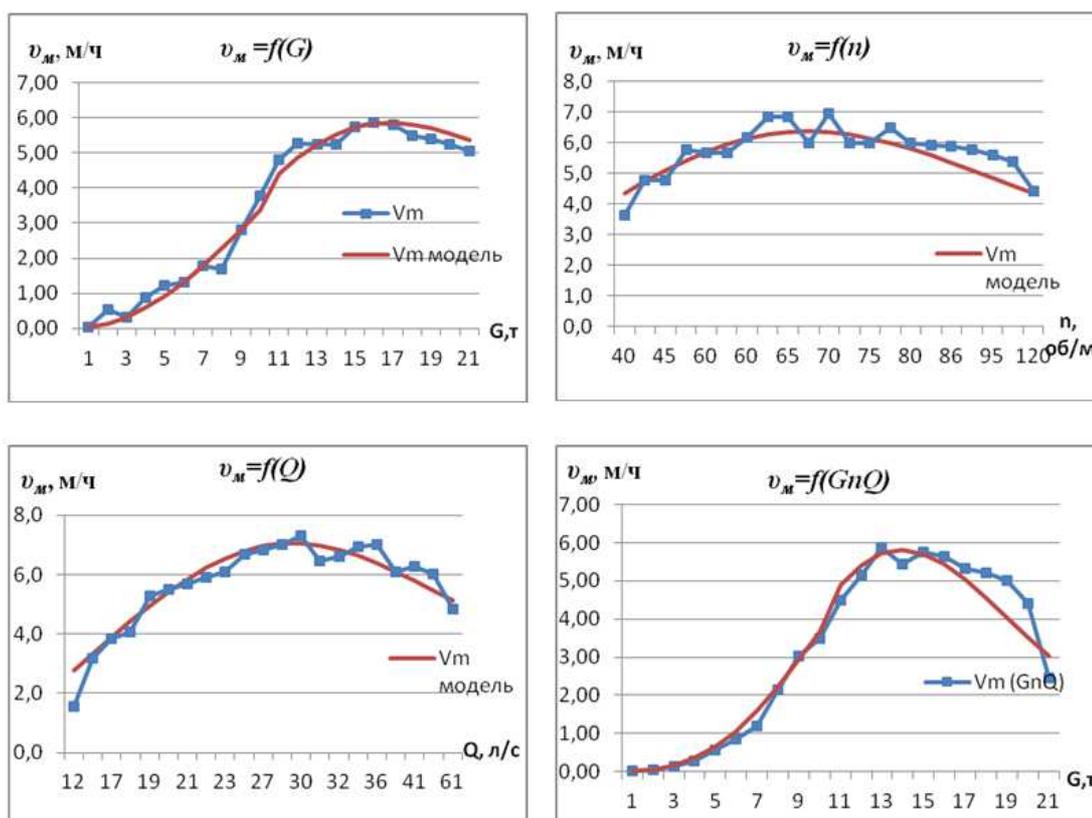


Рисунок 2 Графики опытных данных бурения и их приближающих функций для $v_m = f(G)$, $v_m = f(n)$, $v_m = f(Q)$ и $v_m = f(G,n,Q)$

Детерминированность системы обусловлена использованием для управления модели скорости проходки как определённого (детерминированного, не стохастического) уравнения, а адаптивность – тем, что модель подстраивается под условия в скважине изменением её параметрических коэффициентов и показателей степени. Модель используется для постоянного решения на буровой обратной задачи – вычисления параметров модели k_b , b_n , b_G и b_Q в ходе процесса бурения с целью оперативного определения управляющих параметров G , n и Q по их текущим значениям в ходе проводки скважины.

Принцип адаптации модели к забойным условиям заключается в следующем: при поступлении новых значений v_m , G , n и Q через заданный интервал опроса датчиков САУ, например, через каждые 10 мин. параметры k_b , b_n , b_G , b_Q пересчитываются, т.е. модель постоянно уточняется для текущих условий бурения. При каждом пересчёте по заданному критерию, например, "максимум рейсовой скорости" находятся оптимальные управляющие параметры G_{opt} , n_{opt} и Q_{opt} и передаются оператору бурения (буровому мастеру) для их установки на пульте управления бурением. В течение 10 мин. бурение проводится на этих оптимальных в данное время параметрах, затем полученные реальные значения v_m , G , n и Q вновь снимаются с датчиков и вводятся в управляющую программу САУ, модель снова уточняется, находятся оптимальные параметры и т.д. Контроль достижения оптимума производится по минимуму вибрации бурильной колонны.

Немаловажным является и тот факт, что постоянная адаптация модели к условиям на забое снижает требования к точности описания моделью реального процесса, т.к. оперативная подстройка параметрических коэффициентов модели нивелирует все погрешности модели и увеличивает её достоверность.

Поскольку модель постоянно адаптируется к забойным условиям, то в принципе не существенно, какой вид имеет функция $v_m = f(G, n, Q)$. Кроме

детерминированной модели ТП бурения, в качестве базовой можно использовать стандартный многочлен, например, второго порядка в виде

$$v_m = a_0 + a_1 G + a_2 n + a_3 Q + a_4 G n + a_5 G Q + a_6 n Q + a_7 G^2 + a_8 n^2 + a_9 Q^2 \quad (7)$$

и корректировать его коэффициенты a_0, \dots, a_9 как описано выше. При этом происходит кусочно-степенная аппроксимация многочленом (7) реальной функции изменения механической скорости в ходе бурения. При этом возможно получение новых видов моделей для описания ТП бурения.

В принципе для адаптивного управления возможно применение и многочлена первой степени

$$v_m = a_0 + a_1 G + a_2 n + a_3 Q$$

с кусочно-линейной аппроксимацией функции $v_m = f(G, n, Q)$ по коэффициентам a_0, \dots, a_3 , однако точность отработки такой линейной модели в процессе управления бурением может оказаться ниже. Использование многочлена третьей степени не целесообразно, т.к. ведёт к излишней подробности описания процесса бурения и к переусложнению системы пересчёта адаптивных коэффициентов (появятся ещё 9 переменных a_{10}, \dots, a_{18} при третьих степенях параметров G, n, Q).

Литература

1. Бревдо Г.Д. Проектирование режима бурения. – М.: Недра, 1988. -200 с.: ил.
2. Бревдо Г.Д., Гериш К. Оптимизация параметров режима бурения. Обзорная информация, сер. "Бурение", М., ВНИИОЭНГ, 1980. – 59 с.
3. Григулецкий В.Г. Оптимальное управление при бурении скважин. - М.: Недра, 1988, 229 с.: ил.
4. Справочник инженера по бурению. Под ред. В.И. Мищевича и Н.А. Сидорова. Т. 1, М.: Недра, 1973, 516 с.

References

1. Brevdo G.D. Proektirovanie rezhima bureniia. – M.: Nedra, 1988. -200 s.: il.
2. Brevdo G.D., Gerish K. Optimizatsiia parametrov rezhima bureniia. Obzornaia informatsiia, ser. "Burenie", M., VNIIOENG, 1980. – 59 s.
3. Griguletskii V.G. Optimal'noe upravlenie pri burenii skvazhin. - M.: Nedra, 1988, 229 s.: il.
4. Spravochnik inzhenera po bureniiu. Pod red. V.I. Mishchevicha i N.A. Sidorova. T. 1, M.: Nedra, 1973, 516 s.