

УДК 622.24:622.143

UDC 622.24:622.143

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ
НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН****THE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MOD-
ELS OF MECHANICAL SPEED OF DRIVING
FOR OPTIMIZATION OF PROCESS OF DRILL-
ING OF OIL AND GAS WELLS**

Цуприков Александр Александрович

Tsouprikov Aleksandr Aleksandrovich

к.т.н., доцент

Cand.Tech.Sci., associate professor

РИНЦ SPIN-код=6454-3658

RSCI SPIN-code=6454-3658

*Кубанский государственный технологический уни-
верситет, Краснодар, Россия**Kuban state technology university, Krasnodar, Russia*

Анализ моделей проведён с позиции определения для системы оптимального управления бурением базовой математической модели, по которой возможен расчёт оптимальных режимных параметров. Основным уравнением для управления процессом бурения скважин является математическая модель механической скорости проходки как функция от осевой нагрузки на долото, скорости вращения долота и расхода бурового раствора для очистки скважины от выбуренной породы. Основным параметром является осевая нагрузка на долото, графически зависимость скорости бурения от нагрузки имеет вид S - образной кривой Бингхэма, которая имеет выпуклый математический экстремум. В статье рассмотрены отечественные и зарубежные модели бурения, построены их графики по опытными данным проводки скважин. Модели являются степенными, т.е. отражают только линейный участок кривой Бингхэма, данные промышленного бурения хорошо аппроксимируются с начальным и линейными участками кривых. Таким образом, по ним можно производить только рациональное управление процессом, а оптимальный режим существует только на границе области определения функции. Для оптимального управления пригодна только модель А.А. Погарского, имеющая математический максимум и S-образную форму кривой. Все модели зависят от двух параметров управления – нагрузки на долото и скорости вращения долота и не учитывают третий по влиянию на скорость бурения параметр - расход бурового раствора. Поэтому модель Погарского была доработана включением в неё в явном виде расхода бурового раствора. Проверка модели с помощью регрессионного анализа опытных данных бурения из рапортов буровых мастеров показала её достоверность на 71-99%. Модель позволяет проводить оптимальное управление бурением по параметру "осевая нагрузка на долото"

The analysis of models is carried out from a definition position for system of optimum control of drilling of basic mathematical model on which calculation of optimum regime parameters is possible. The main equation for management of process of drilling of wells is the mathematical model of mechanical speed of a driving as function from axial load of a chisel, the speed of rotation of a chisel and a consumption of boring solution for cleaning of a well of destroyed breed. Key parameter is axial load of a chisel; graphically dependence of speed of drilling on loading has S appearance - a figurative curve of Bingham which has a convex mathematical extremum. In the article, domestic and foreign models of drilling are considered; their schedules according to skilled data of conducting of wells are constructed. Models are sedate, i.e. reflect only a linear site of a curve of Bingham, data of trade drilling is well approximated with initial and linear sites of curves. Thus, on them it is possible to make only rational management of process, and the optimum mode exists only on border of range of definition of function. Only the A.A. Pogarsky model is suitable for optimum control, having a mathematical maximum and S-shaped form of a curve. All models depend on two parameters of management – load of a chisel and speeds of rotation of a chisel and don't consider the third on influence on drilling speed parameter - a consumption of boring solution. Therefore, Pogarsky's model was finished by inclusion in it in an explicit form of a consumption of boring solution. Check of model by means of the regression analysis of skilled data of drilling from official reports of drilling foremen showed its reliability for 71-99%. The model allows carrying out optimum control of drilling in the "axial load of a chisel" parameter

Ключевые слова: МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ
СКОРОСТИ ПРОХОДКИ, ОПТИМАЛЬНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ БУРЕНИЕМ

Keywords: MODEL OF MECHANICAL SPEED OF
DRIVING, OPTIMUM CONTROL OF DRILLING

Основной составляющей математических моделей бурения является уравнение для механической скорости проходки. Большинство отечественных и зарубежных исследователей пришли к выводу, что соотношение, определяющее механическую скорость v_m при обеспечивающем процессе количестве промывочной жидкости, должно иметь вид, предложенный М.Г. Бингхэмом:

$$v_m = k_\delta G^\delta n^\alpha, \quad (1)$$

где G – осевая нагрузка на долото,

n – скорость вращения долота,

k_δ , δ и α - параметрические коэффициенты.

Коэффициент k_δ в литературе получил название «коэффициент буримости», т.к. характеризует способность породы к разбуриванию. Он принимает значения 0,2-0,8, может достигать величины в 2,5 единицы [3]. Коэффициенты δ и α имеют у разных авторов различные значения [4]. Величина δ чаще всего принимается равной единице, но встречается и $\delta = 0,6$. Коэффициент α в основном лежит в пределах 0,4 - 0,75, для частных условий может быть равным 0,1 или 1. Для уравнения (1) принимается, что расход Q и давление бурового раствора обеспечивают качественную (полную) очистку забоя от выбуренной породы без повторного её перемалывания.

Графически зависимость скорости бурения от нагрузки на долото имеет вид S-образной кривой Бингхэма (рис. 1) – при малых G происходит истирание породы долотом, поэтому скорость бурения растёт незначительно, при увеличении G разрушение породы становится объёмным и скорость резко возрастает, затем падает из-за повторного перемалывания шлама, т.к. расход раствора Q не успевает удалить выбуренную породу с забоя. При улучшении очистки кривая а переходит в кривую б.

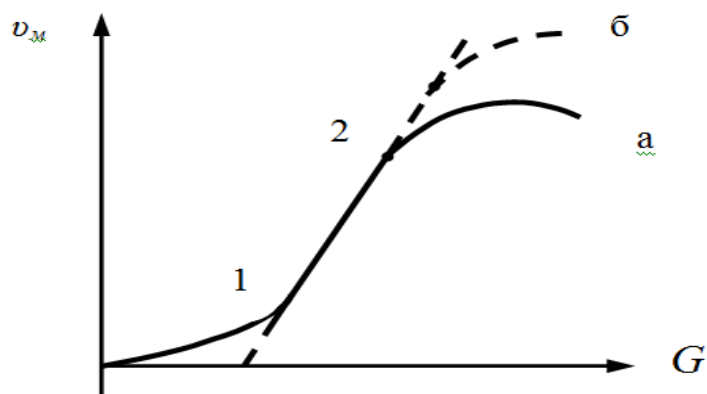


Рисунок 1 S-образная кривая Бингхэма

Модель (1) соответствует кривой Бингхэма только до конца линейного (который аппроксимирует степенную линию) участка 1-2 и не имеет выраженного экстремума, т.к. является степенной функцией.

Проведём анализ наиболее характерных отечественных и зарубежных моделей механической скорости проходки с позиций их пригодности для оптимального управления бурением. Для этого у модели должен быть экстремум и графически она должна иметь форму кривой М.Г. Бингхэма.

Модель Галле-Вудса-Лубинского [7]. Модель распространена в США, состояние процесса проводки скважины для любого момента времени определяется трехмерным вектором в пространстве состояний - текущими значениями v_m , степенью износа зуба и степенью износа опоры долота.

$$v_m = k_{\beta} \frac{\bar{G}^{\beta} \cdot r}{[a(D_3)]^{\beta}}$$

где:

$\bar{G} = G/D_d$ – осевая нагрузка, приведённая к диаметру долота D_d ,

$$r = e^{-\frac{100}{n^2}} \cdot n^{0,428} + 0.2(1 - e^{-\frac{100}{n^2}}) \quad - \text{ для твёрдых пород,}$$

$$r = e^{-\frac{100}{n^2}} \cdot n^{0,75} + 0.5(1 - e^{-\frac{100}{n^2}}) \quad - \text{ для мягких и средних пород,}$$

$$a(D_3) = 0,928 D_3^2 + 6D_3 + 1;$$

β – экспонента осевой нагрузки;

D_3 – относительный износ зубьев долота;

b – экспонента функции износа вооружения долота;

Модель фирмы "Теннеко ойл комп". При определении оптимальных сочетаний нагрузки на долото и скорости вращения ротора с целью обеспечения минимальной стоимости бурения исходят из того, что механическая скорость и износ долота являются функциями нагрузки на долото, скорости вращения, характеристики пород, типа долота и промывочной жидкости:

$$v_m = \frac{k_{\sigma} \cdot (G - G_0) n^{\alpha}}{f(h)} \quad (2)$$

где

G_0 - нагрузка на долото, при которой начинается проникновение зуба в породу,

$f(h)$ – характеристика состояния долота.

Модель Погарского А.А. [3,4] для механической скорости v_m позволяет учитывать влияние расхода и давления промывочной жидкости и имеет вид:

$$v_m = \frac{a \cdot n^{\alpha} \bar{G}^2}{1 + b^4 \bar{G}^4}, \quad (3)$$

где a , соответствующий k_{σ} , α – коэффициенты, имеющие тот же смысл, что и в зависимости (2), но принимающие другие значения.

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

Кривая a на рис. 1 при достаточной промывке лучше всего описывается формулой (3).

В целом, зависимость (3) является более универсальной, чем зависимости (1) и (2), т.к. учитывает параметры режима очистки забоя с помощью коэффициента b , но он связан с параметром Q опосредованно, неявно.

Модель ВНИИБТ. Модель научно-исследовательского института буровой техники [1] получена на основании данных по отработке большого количества шарошечных долот и представляет собой интегральное уравнение, описывающее процессы в объекте "долото-порода" при роторном способе бурения. Она совпадает по форме со степенной моделью (1), но коэффициенты k_δ , δ и α имеют другие (районизированные для РФ) значения.

Для рассмотренных интегральных моделей механической скорости проходки были рассчитаны значения функции $v_m = f(G)$ при постоянных значениях других составляющих, соответствующих реальным условиям бурения ($k_\delta = 0,2-0,8$ до $2,5$; $\delta = 0,6-1$; $\alpha = 0,1-0,75$; $a = 20-60$; $b = 0,1-4$; $n = 40$ и 90 об/м) – см. таблицу 1.

По результатам расчёта для каждой модели построены графики функции скорости бурения от осевой нагрузки – рисунок 2.

Таблица 1

| G, т | Модель ВНИИБТ | | Модель Теннеко ойл комп | Модель Галле-Вудса | | Модель Погарского |
|------|---------------|-------------|-------------------------------|--------------------|-----------|----------------------|
| | n = 90 об/м | n = 40 об/м | | (мягкие) | (твёрдые) | |
| 1 | 3,794733 | 2,529822 | 1,770875 | 2,677022 | 0,8167 | 0,552369 |
| 2 | 6,607014 | 4,404676 | 4,300698 | 4,660966 | 1,421958 | 2,206951 |
| 3 | 9,13857 | 6,09238 | 6,83052 | 6,44687 | 1,966797 | 4,941167 |
| 4 | 11,50348 | 7,668987 | 9,360342 | 8,115213 | 2,475772 | 8,669267 |
| 5 | 13,75173 | 9,167818 | 11,89016 | 9,701255 | 2,959638 | 13,18176 |
| 6 | 15,91117 | 10,60745 | 14,41999 | 11,22465 | 3,424393 | 18,09748 |
| 7 | 17,99947 | 11,99965 | 16,94981 | 12,69785 | 3,873835 | 22,87763 |
| 8 | 20,02872 | 13,35248 | 19,47963 | 14,12941 | 4,310569 | 26,93699 |
| 9 | 22,00773 | 14,67182 | 22,00945 | 15,52551 | 4,73649 | 29,81956 |
| 10 | 23,94315 | 15,9621 | 24,53927 | 16,89087 | 5,15303 | 31,33545 |

Сравнение кривых графиков функции $v_m = f(G)$ с S-образной кривой Бингхэма свидетельствует о том, что все модели работают на линейном участке кривой, только модель А.А. Погарского при $b = 0,2$ приближается к S-образной форме. При $b = 0,5$ кривая превращается в степенную, а при $b > 1$ - в перевернутую U-образную линию – рисунок 3.

Отсюда следует, что модель А.А. Погарского действительно при значениях коэффициента $b > 1$ приобретает экстремум, но это относится только к форме кривой. Выпуклая форма кривой определяется только составляющей модели $G^2/(1+bG^4)$, поэтому утверждать, что коэффициент b учитывает влияние промывки [3,4] на скорость бурения - некорректно.

Таким образом, анализ рассмотренных моделей показывает, что формально наибольшим приближением к физике процессов разрушения породы и очистки забоя обладает модель А.А. Погарского (3). В ней закон изменения скорости проходки от нагрузки на долото соответствует S-образному виду, а точность приближения к реальным условиям регулиру-

ются параметрическими коэффициентами и показателями степени.

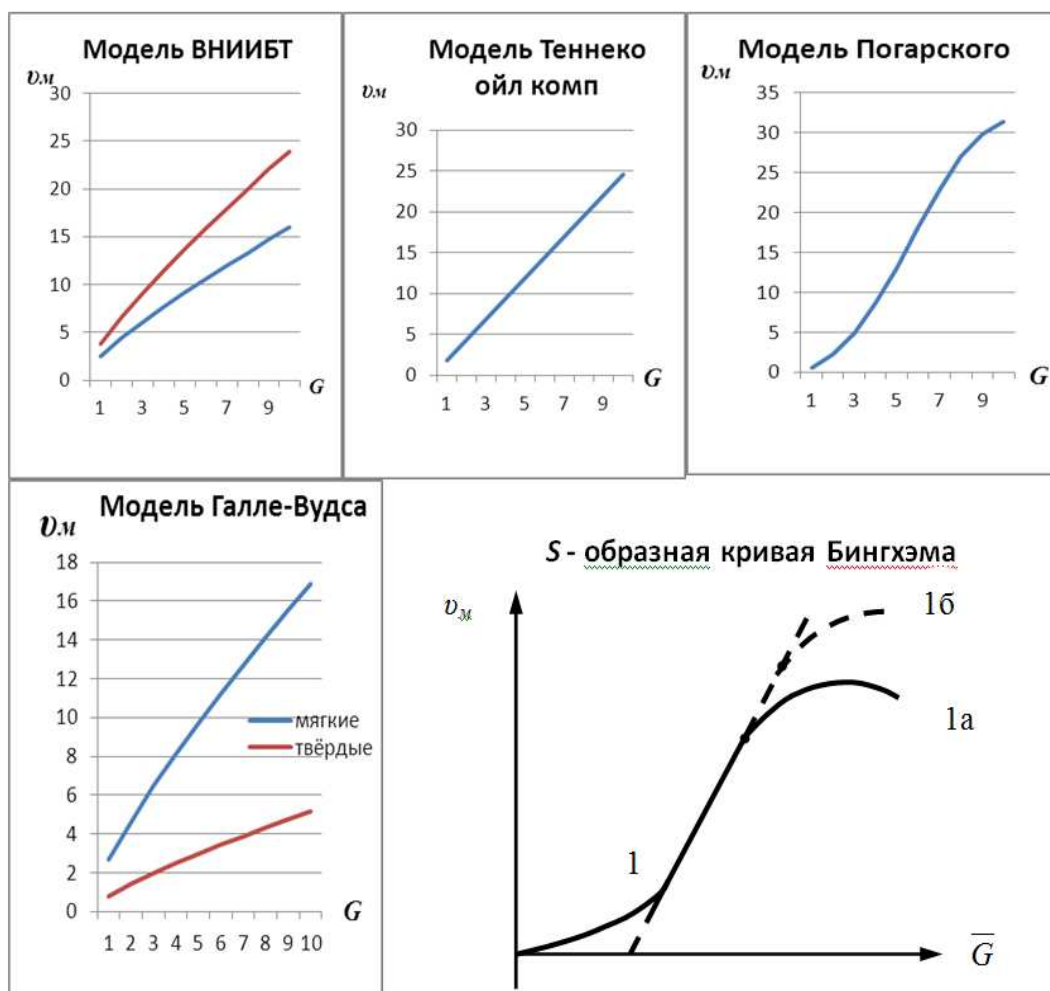


Рисунок 2 Графики функции $v_m = f(G)$ для интегральных моделей и S-образная кривая Бингхэма

Варьирование параметров других моделей форму кривых радикально не меняло, отмечено только, что если показатель степени при G в модели меньше 1, то кривая становится слегка выпуклой (модели ВНИИБТ, Галле-Вудса), если больше 1, то вогнутой (модель Погарского).

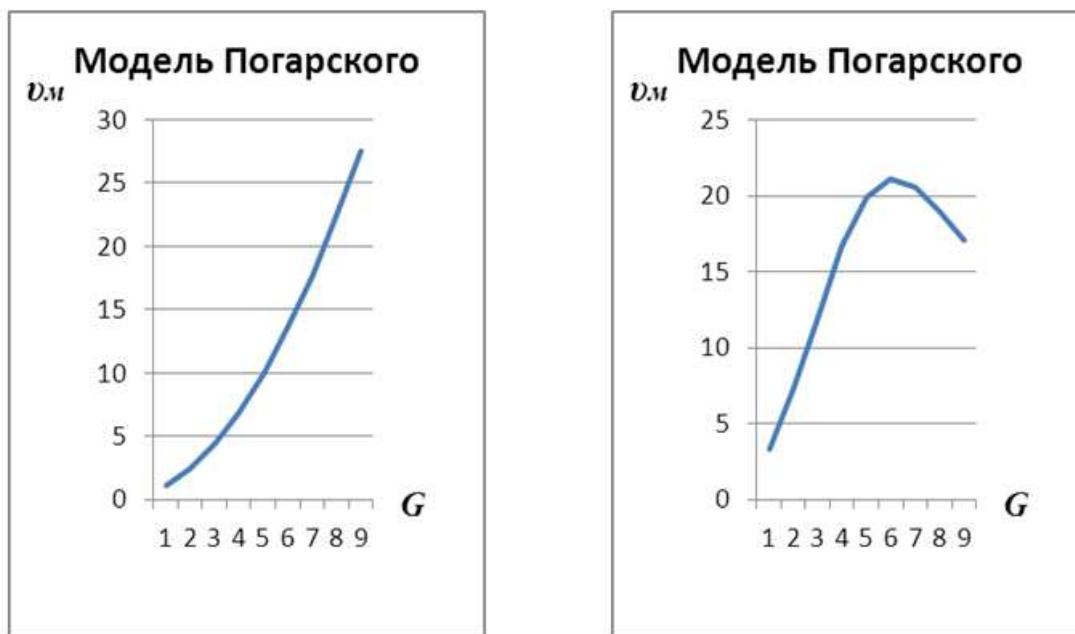


Рисунок 3 Модель Погарского при $b = 0,5$ (слева) и при $b = 3$ (справа)

Модели механической скорости с гидравлическим параметром

Для расчёта оптимальных параметров требуется математическая модель, включающая в себя как механические, так и гидравлические параметры в явном, аналитическом виде.

Очевидно, что переменная Q должна входить в уравнение функции (1) как пропорциональная составляющая с коэффициентом или показателем степени, обеспечивающим необходимый наклон и изгиб кривой функции v_m .

В общем виде уравнение скорости проходки с гидравлическим параметром может иметь вид:

$$v_m = k_{\delta} \cdot G^{\delta} \cdot n^{\alpha} \cdot Q^m \quad (4)$$

Это уравнение хорошо описывает линейный участок S – образной кривой Бингхэма. Однако математически функция (4) является степенной,

т.е. не имеет выпуклого экстремума и максимальна только на границе своей области определения. Поэтому она не может быть использована для поиска оптимальных параметров бурения.

В качестве базовой для оптимального управления может быть принята доработанная модель Погарского, которая имеет явно выраженный экстремум и в которую для явного учёта расхода бурового раствора введён параметр Q^β :

$$v_m = k_\delta \frac{n^\alpha G^2 Q^\beta}{1 + b^4 G^4} \quad (5)$$

Ограничения модели зависят от мощности буровой установки:

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

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

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

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 модель (5) отражает принятые бурением принципы – управлять осевой нагрузкой G при фиксированных оборотах n и расходе Q .

Для проверки модели (5) на достоверность в филиале "Краснодар бурение" ООО "Газпромбурение" были получены экспериментальные данные суточных рапортов для различных интервалов бурения по 22 скважинам глубиной 1102 - 4114 метров, пробуренных в 2005-2010 году, а также данные из проектов на бурение скважин (получены в НПО "Бурение", г. Краснодар). Использовались также экспериментальные данные по обработке долот и оптимальных параметрах режима бурения из литературных источников [1, 2, 4, и др.].

Результаты обработки данных методом наименьших квадратов показали, что корреляция рассчитанных по формуле (5) и экспериментальных данных составляет от 71 до 99%, т.е. функция пригодна для применения в качестве уравнения для оперативной оптимизации процесса бурения.

Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$v_m = 8 \cdot 10^{-3} \frac{n^{0.3} G^2 Q^{0.1}}{1 + 1,23 \cdot 10^{-5} G^4} \quad (6)$$

Наиболее типичные буровые данные из рапортов буровых мастеров и погрешность их аппроксимации регрессионным уравнением (6) приведены в табл. 2.

Приближающая функция и опытные данные проводки скважин Крупская №1, Песчаная №7 и Восточно-Прибрежная №9 приведены на рис. 3.

Таблица 2

| k | G, т | VM модель | Vm СКВ №1 | Погрешн СКВ №1 | Vm СКВ №7 | Погрешн СКВ №7 | Vm СКВ №9 | Погрешн СКВ №9 |
|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0,008 | 1 | 0,304 | | | | | | |
| | 2 | 0,16 | | | | | | |
| n, об/м | 3 | 0,35 | | | 0,26 | 25% | | |
| 40-75 | 4 | 0,62 | 0,48 | 22% | 0,80 | 29% | 0,48 | 22% |
| | 5 | 0,96 | 1,20 | 25% | 0,78 | 19% | 0,75 | 22% |
| α | 6 | 1,37 | 1,3 | 5% | 1,50 | 9% | 1,30 | 5% |
| 0,3 | 7 | 1,85 | | | 2,00 | 8% | 1,25 | 32% |
| | 8 | 2,36 | 2,0 | 15% | 2,32 | 2% | 1,81 | 23% |
| Q,л/с | 9 | 2,91 | 3,42 | 18% | 2,49 | 14% | 2,94 | 1% |
| 20-33 | 10 | 3,45 | 3,1 | 10% | 3,50 | 1% | 2,84 | 18% |

| | | | | | | | | |
|----------------------|----|-------------|-------------|------------|---|---|-------------|------------|
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 11 | 3,98 | | | | | 3,57 | 10% |
| β | 12 | 4,45 | 4,52 | 2% | | | 3,65 | 18% |
| 0,1 | 13 | 4,85 | | | | | | |
| | 14 | 5,16 | 5,56 | 8% | | | | |
| b^4 | 15 | 5,37 | 5,00 | 7% | | | | |
| 1,23E- 05 | 16 | 5,49 | | | | | | |
| | 17 | 5,52 | 6,30 | 14% | | | | |
| | 18 | 5,48 | | | | | | |
| | 19 | 5,37 | | | | | | |
| | 20 | 5,22 | | | | | | |
| | 21 | 5,03 | | | | | | |
| | 22 | 4,83 | | | | | | |

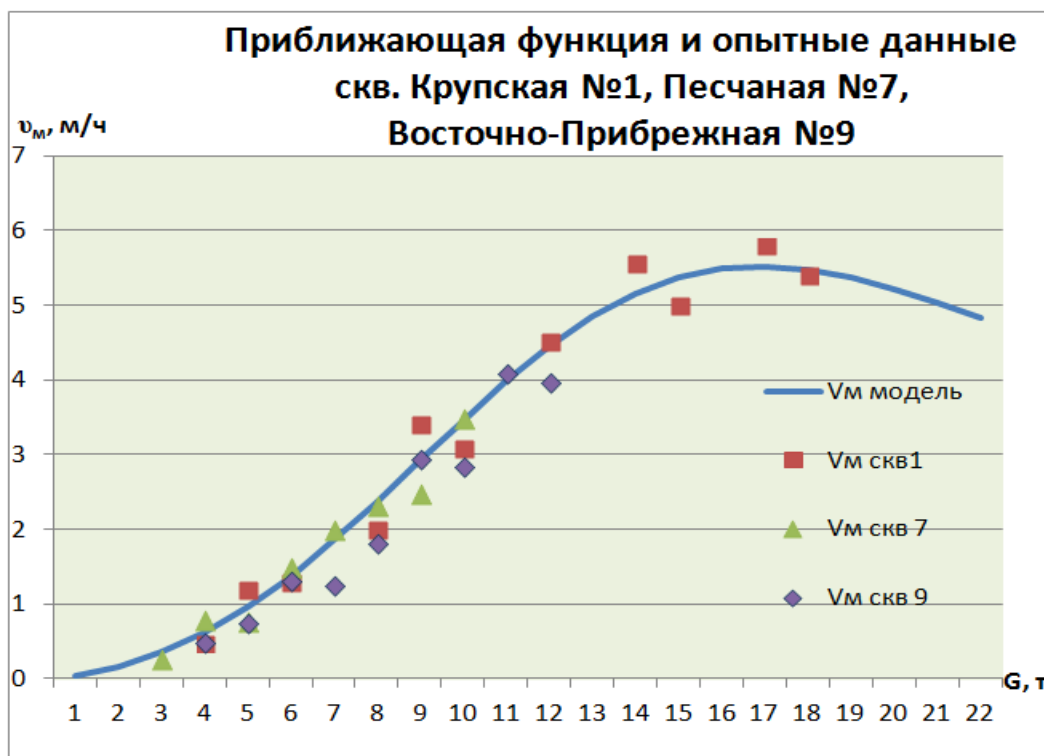


Рисунок 3 Опытные данные и регрессионная кривая функции (6)

Основные выводы и результаты:

1. Рисунок 3 подтверждает, что для Краснодарского края зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки действительно описывается S – образной кривой Бингхэма .
2. Оптимальные режимы бурения на практике применяются только на некоторых интервалах проходки (скважина Крупская 1).
3. Для оптимального управления процессом бурения следует использовать модель механической скорости проходки (5,6), как соответствующую кривой М.Г. Бингхэма и имеющей явно выраженный экстремум.

Литература

- 1 Бревдо Г.Д., Гериш К. Оптимизация параметров режима бурения. Обзорная информация, сер. "Бурение", М., ВНИИОЭНГ, 1980. – 59 с.
- 2 Гулизаде М.П., Иманов К.С., Исхати Х.Н., Халимбеков Б.М. Адаптивное управление процессом турбинного бурения скважин. Азербайджанское нефтяное хозяйство, 1972. №9.
- 3 Погарский А.А. Автоматизация процесса бурения глубоких скважин. М.;

Недра, 1972.

4 Погарский А.А., Чефранов К.А., Шишкин О.П. Оптимизация процессов глубокого бурения. М.: Недра, 1981. - 296 с.

5 Computerized drilling seen possible in 1980's. –Oil and Gas J. 1974/. Vol.72, #12, p. 57-59.

References

1 Brevdo G.D., Gerish K. Optimizatsiia parametrov rezhima bureniia. Obzornaia informatsiia, ser. "Burenie", М., VNIIOENG, 1980. – 59 s.

2 Gulizade M.P., Imanov K.S., Iskhati Kh.N., Khalimbekov B.M. Adaptivnoe upravlenie protsessom turbinnogo bureniia skvazhin. Azerbaidzhanskoe neftianoe khoziaistvo, 1972. №9.

3 Pogarskii A.A. Avtomatizatsiia protsessa bureniia glubokikh skvazhin. М.: Nedra, 1972.

4 Pogarskii A.A., Chefranov K.A., Shishkin O.P. Optimizatsiia protsessov glubokogo bureniia. М.: Nedra, 1981. - 296 s.

5 Computerized drilling seen possible in 1980's. –Oil and Gas J. 1974/. Vol.72, #12, p. 57-59.