

УДК 622.24

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТРАБОТКИ ДОЛОТ ТИПА PDC И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ СТОЙКОСТИ

Пригоровская Т.А.

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа  
Украина, г.Ивано-Франковск  
e-mail: prigorovska@nung.edu.ua*

**Аннотация.** *Практика бурения показывает, что использование современного бурового инструмента и оборудования требует современных моделей описательной статистики, которые разрешают прогнозировать показатели бурения и оптимизировать исходные параметры процесса. В статье излагаются методологические и практические вопросы анализа моделей регрессии применительно к результатам отработки буровых долот. В работе проанализированы статистические данные отработки долот на месторождениях Украины и РФ (Сибирь), произведен расчет вероятности безотказной работы инструмента.*

**Ключевые слова:** *буровые долота типа PDC, проходка, механическая скорость бурения, надёжность, регрессия, статистическая модель, корреляция*

В настоящее время накоплен значительный фактический материал относительно отработки буровых долот типов, в том числе и PDC. Обычно, такие данные представлены в буровых журналах, и они составляют базу для построения статистических моделей отработки долот любых типов, поскольку учитывают параметры инструмента, бурения, характеристики разбуриваемых пород. Известно, что полученные при стендовой отработке породоразрушающего инструмента зависимости (даже при имитации забойных условий), связывающие показатели работы долота с параметрами режима бурения, как правило, не выполняются в условиях бурения скважин. Довольно часто сравнение стендовой и промысловой эмпирических зависимостей показывает их полное несоответствие друг другу. Это связано с появлением крутильных колебаний, зависанием бурильной колонны и др. Поэтому в качестве исходных данных для статистического анализа были выбраны результаты отработок реальных долот в реальных условиях [1, 3].

Целью данной статьи является построение многофакторной модели зависимости проходки от режимных параметров бурения, характеристик пород и т.д. для прогнозирования результатов отработки долота с определёнными параметрами при определённых условиях.

Основная сложность построения таких моделей для технических объектов (в частности – буровых долот) заключается в разрозненности исходных данных и необходимости выполнения сложной подготовительной работы для их сбора, группирования, обработки и т.д. Именно этим, по нашему мнению, объясняется тот факт, что современные модели прогнозирования проходки долот не описыва-

ются в литературе. Следует отметить, что такие зависимости для проходки и других результатов обработки буровых долот, которые были изготовлены в СССР, представлены в соответствующих сборниках [8], но для долот зарубежного производства, которые в последнее время достаточно широко используются на рынке СНГ, таких статистических данных не обнаружено.

Результаты анализа данных завершённых бурением скважин показывают наличие значительного резерва повышения технико-экономических показателей строительства скважин за счёт подбора рациональной гаммы долот и соблюдения режимов бурения.

Основные этапы построения модели обработки долот таковы:

1. статистические исследования факторов влияния на величину проходки долот;
2. формирование исходного информационного массива, оцифровки качественных признаков;
3. объектов по начальным данным;
4. выбор типа модели регрессии её построение.
5. описательная статистика, оценка взаимосвязи переменных для исключения явления автокорреляции;
6. оценка адекватности построенной модели.

Для моделирования и анализа были отобраны данные из буровых журналов при бурении на нефть и газ на месторождениях Украины и Западной Сибири. Анализировались такие показатели: проходка, скорость, время бурения. Исходные данные разделили на две группы: обработка долот на месторождениях Украины (долота как иностранного, так и зарубежного производства) и на зарубежных месторождениях.

Собственно, результаты обработки долот на территории пост-СССР существенно отличаются от обработки на месторождениях мира. Например, по данным фирмы Smith International Inc, которая является одной из ведущих фирм-производителей буровых долот, проходка для долот типа PDC их производства, составляет в среднем 1067,5 м [5]. Наивысшие показатели наблюдались на месторождениях Омана (долото Bc75px-bicentric 8,375 inc: проходка 4474 м, скорость бурения – 24,2 м/час без уточнения типа разбуриваемых пород). Проходка других типоразмеров долот типа PDC находится в пределах 120-2250 м в зависимости от оснащения и региона бурения.

Средняя величина проходки при бурении долотами отечественного производства (долота производства Института сверхтвёрдых материалов) на месторождениях Украины составляет 38,4 м/год в процессе бурения мягких и мягких с пропластками средних по твердости малоабразивных пород, бурение осуществлялось турбинным и роторным способами, максимальная нагрузка на долото состав-

ляла 14 кН, минимальное – 1 кН; число оборотов изменялось в пределах 40-135 об/мин.

При бурении пород средней твердости с пропластками крепких пород (аргиллиты, мергели, доломиты, интервалы свыше 2000 метров) наблюдаются значительно меньшие скорости бурения – до 2 м/час, бурение осуществлялось турбинным и роторным способами, максимальная нагрузка на долото составляла 10 кН, минимальная – 2 кН; число оборотов изменялось в пределах 40-135 об/мин. Обработка долот проводилась на Кобзовском, Бильском, Восточно-Полтавском, Березивском, Святогорском, Абазовском и др. месторождениях).

Такое расхождение объясняется отличием в технологии бурения, применением режимов бурения, и тому подобное. Кроме того, на месторождениях Украины используются долота такого типа, в основном, производства Института сверхтвёрдых материалов, обработка которых вынесена в отдельную группу, поскольку такие долота существенно отличаются от долот типа PDC по конструктивным и технологическим параметрам.

Таким образом, для построения моделей обработки долот имеются такие выборки:

1. выборка обработки долот производства фирмы Reed-Hycalog на месторождениях Украины, объём выборки 190 записей;
2. выборка обработки долот производства Института Сверхтвёрдых материалов на месторождениях Украины, объём выборки 145 записей;
3. выборка обработки долот производства фирмы Smith на месторождениях Западной Сибири, объём выборки 256 записей.

Обобщая данные всех трёх выборок, можно сказать, что основным характеристикам износа PDC долот на месторождениях являются: износ зубцов – 17 %, поломка зубцов – 30 %, 31 % – скалывание зубцов, 3 % – выпадение зубцов, 19 % – отсутствие износа. То есть, технологические проблемы изготовления долот стали причиной их износа в 53 % случаев (рис. 1).

Кроме того, основными причинами подъёма долот были: 19 % – замена колонны насосно-компрессорных труб (КНБК), 3% – проблемы в стволе скважины, 3 % – падение скорости проходки, 3 % – ремонт буровой установки, 72 % – достижение проектной глубины.

Анализ данных по отдельных выборках не показал существенного различия количественных характеристик видов износа.

Для построения моделей во всех выборках отбросили экстремальные значения (максимальные и минимальные) как такие, которые могут быть получены ошибочно.

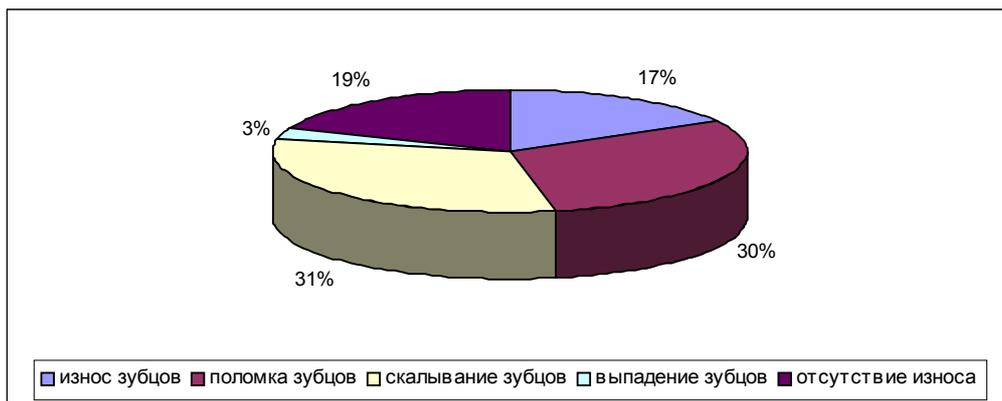


Рис. 1. Основные характеристики износа PDC долот

Для построения взаимозависимости факторов во всех случаях выбрали линейную модель в виде:  $ROP = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i$ , где в качестве оценочного параметра выбрали величину проходки (с англ. – rate of penetration – ROP); параметры модели:  $x_1$  – характеристики разбуриваемых пород согласно [2];  $x_2$  – диаметр бурового долота,  $x_3$  – нагрузка;  $x_4$  – число оборотов;  $x_5$  – объем промывочной жидкости;  $x_6$  – давление на забое. Конечно, эти параметры не описывают все возможные факторы влияния, однако именно они фиксируются в буровых журналах.

Для месторождений Украины (первая выборка) получили такую зависимость:

$$ROP = 1,29344 x_1 - 1,1684 x_2 - 0,43727 x_3 + 2,031 x_4 - 11,937 x_5 - 1,6282 x_6 - 26,1088.$$

Коэффициент корреляции построенной модели составляет 0,3322, что свидетельствует о ее низкой достоверности и невозможности применения для последующего прогнозирования. Следует отметить, что другие модели (например, логарифмическая, экспоненциальная, полиномы, и т.п.), которые применялись для математического моделирования проходки, также давали низкий уровень схожести (коэффициент корреляции не превышал 0,4).

Для долот производства ИСМ (вторая выборка) построенная модель имеет вид:

$$ROP = 1,87 x_1 - 1,6384 x_2 - 0,843727 x_3 + 5,931 x_4 - 25,18 x_5 - 1,7415 x_6 + 114,488.$$

Коэффициент корреляции построенной модели составляет 0,387, что свидетельствует о ее низкой достоверности и невозможности применения для последующего прогнозирования.

Для долот иностранного производства при бурении на месторождениях Сибири (третья выборка):

$$ROP = 2,84 x_1 - 3,005 x_2 - 1,567 x_3 + 6,15 x_4 - 12,11 x_5 - 2,872 x_6 - 119,457.$$

Коэффициент корреляции построенной модели составляет 0,33, что свидетельствует о ее низкой достоверности и невозможности применения для последующего прогнозирования.

Для моделирования отработки использовались данные бурения долотами типа PDC на месторождениях Сибири. Для сравнения – показатели работы этих долот на аргиллитах, доломитах, мергелях (Западно Оренбургская площадь), нагрузка – 8-10 кН, производитель – Волгабурмаш составляли:

- партия экспериментальных долот PDC 149,2 FD-353M-A34, средняя проходка 1100 м со средней скоростью 1,8 м/час и стойкости 700 часов;

- партия экспериментальных долот PDC 295,3 FD-257M-A27M – механическая скорость – 2,38 м/час, проходка 1300 м;

- партия экспериментальных долот PDC 293,0 FD-388MH-A44 – механическая скорость – 4,35 м/час, проходка 2000 м [7].

По результатам анализа видим, что полученные зависимости и предложенный подход в целом, неприемлемы для долот как отечественного, так и зарубежного производства из-за разрозненности данных, неучёта всех параметров. Следует отметить, что другие модели (например, логарифмическая, экспоненциальная, полиномы, и т.п.), которые применялись для математического моделирования проходки, также давали низкий уровень сходимости.

Для решения данной проблемы могут быть использованы два подхода. Первый заключается в увеличении факторов, которые влияют на исследуемые параметры, и соответственно существенного увеличения объёма выборки. Для косвенного подтверждения целесообразности первого подхода было увеличено количество данных, на основе которых строится модель в два раза при том же числе переменных. В этом случае не было отмечено увеличения коэффициента корреляции. Поэтому, как промежуточный вывод можно заметить, что цифровой описательной модели долота и процесса бурения на данном этапе развития науки и техники нельзя построить в связи с невозможностью с достаточной точностью учесть все факторы, которые влияют на процесс.

Второй подход состоит в разбивке начальной выборки на группы достаточного объёма по конструкциям инструмента. То есть построение модели отработки каждого конкретного типоразмера долота без привязки к конкретному месторождению и породе (характеристики породы задаются как исходные параметры).

Основная проблема при этом заключается в достаточности объёма соответствующих данных для построения модели.

Так, например, для долота Read Нycalog 11 5/8 DS 66 (месторождения Украины) получили такую зависимость:

$$ROP = -10,16x_1 - 52,86x_2 + 6,71x_3 + 150,4x_4 + 0,307x_5 + 218,2x_6 + 972,23 .$$

Коэффициент корреляции построенной модели составляет 0,9999, что свидетельствует о ее высокой достоверности и возможности применения для последующего прогнозирования. Самые существенные факторы влияния в порядке уменьшения такие: нагрузка на инструмент, число оборотов, давление, на забое. Поэтому такой подход (то есть построение модели для инструмента конкретного типоразмера) является более перспективным для прогнозирования.

Тот же подход (то есть построение регрессионной модели для конкретного типоразмера инструмента) был использован для последующего анализа. Следующий шаг заключался в исследовании существования взаимосвязи таких параметров как скорость бурения и время бурения для конкретного инструмента. Гипотеза исследования была такой: при увеличении времени бурения снижается скорость бурения из-за ряда факторов, в первую очередь износа. Задача заключалась в установлении характера такой зависимости, то есть в определении интенсивности износа [4, 6, 7].

Например, для того же долота Read Hycalog 11 5/8 DS 66 получили такие зависимости (данные – табл. 2, рис. 2):

- для линейной модели  $V = -0,0038t + 3,8739$ , где  $t$  – время бурения;
- для модели логарифмической  $y = -0,9542 \ln(t) + 7,8243$ .

В этом случае максимальный коэффициент корреляции составлял 0,77, то есть данное значение не является высоким, потому модель можно считать условно адекватной.

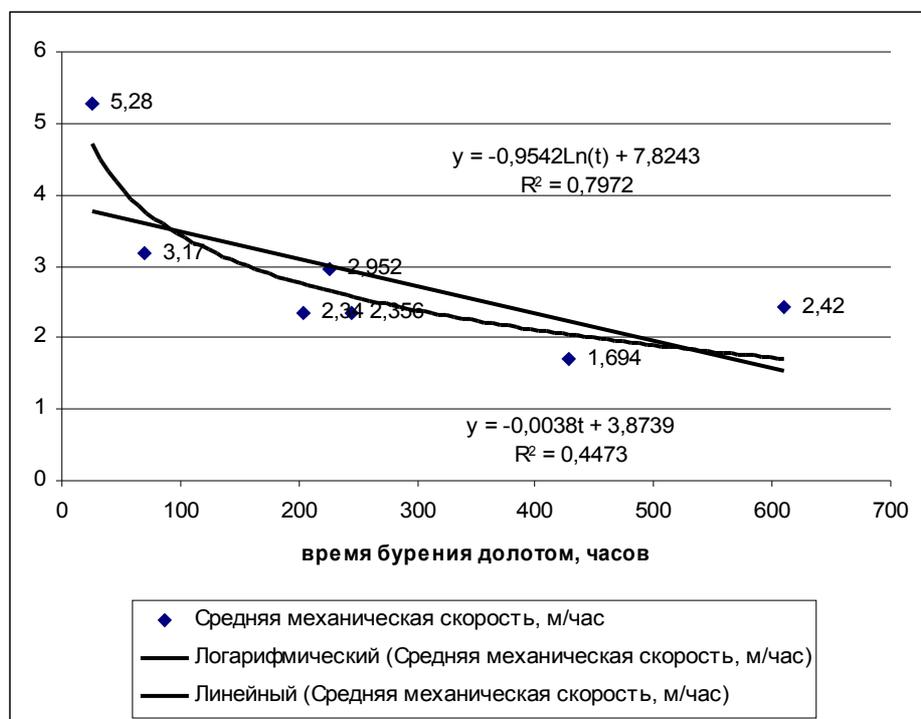


Рис. 2. Зависимость величины средней механической скорости от времени бурения

Таблица 1. Некоторые данные для построения регрессионных моделей бурения на месторождениях Сибири

Месторождение/ куст/скважина	КНБК	Режим бурения		Интервал бурения, м		Показатели работы долота			
		Нагрузка на долото, т	Заграта промывочной жидкости, л/с			Н, м	Тбур, час	Тцир, час	Умех, м/час
Урманское № 210, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) +КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ +пер-к.+УБТ178-15м+пер-к.	3-5	54	305	462	157	4,17	7,00	37,6
Урманское № 210, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) +КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ +пер-к.+УБТ178-15м+пер-к.	4-6	54	462	732	270	7,63	14,27	35,4
Урманское № 210, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) +КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ +пер-к.+УБТ178-15м+пер-к.	4-6	54	732	1051	319	11,45	17,00	27,9
Урманское № 210, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) +КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ +пер-к.+УБТ178-15м+пер-к.	4-6	54	1051	1245	194	7,62	12,22	25,5
Урманское №118, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) +КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ+пер-к. +УБТ178-15м+пер-к.+СБТ-127	3	54	310	468	158	3,7	7,50	42,7
Урманское №118, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) +КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ+пер-к. +УБТ178-15м+пер-к.+СБТ-127	3- 4	54	468	831	363	11,1	17,90	32,7
Урманское №118, куст №4	295,3 PDC M516LHPX+КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр)+КОБ-203+пер-к.+посад.пер-к. +УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ+пер-к. +УБТ178-15м+пер-к.+СБТ-127	3- 4	54	831	1150	319	9,2	16,40	34,7
Урманское №118, куст №4	295,3 PDC M516LHPX +КЛС-292+пер.+ДР1-240(1.5гр) №124+КОБ-203+пер-к. +посад.пер-к.+УЛБТ(под телес-у.)+УЛБТ+пер-к. +УБТ178-15м+пер-к.+СБТ-127	3-4	40	306	336	30	1,23	2,83	24,4

Таблица 2. Некоторые данные для построения модели отработок долот (бурение на месторождениях Украины)

Типоразмер долота	Месторождение	Породы	Интервал бурения, м	Средняя проходка на долото, м	Среднее время бурения, час	Средняя механическая скорость, м/час
Показатели работы алмазного долота производства Reed-Hycalog на месторождениях Украины (ДК "Укрбургаз"), G = 4 кН, N = 135 об/хв, Q = 35 л/с P = 90 атм						
11 5/8 DS 66	Ново-украинка 121	Каменная соль	1470-1608	138	26,1	5,28
11 5/8 DS 66	Ново-украинка 121	Каменная соль	1608-1708	138	43,45	3,17
11 5/8 DS 66	Ново-украинка 121	Каменная соль	1815-2287	316	135	2,34
11 5/8 DS 66	Ново-украинка 121	Каменная соль	2620-2682	62	21	2,952
11 5/8 DS 66	Ново-украинка 121	Каменная соль	3021-3066	45	19,1	2,356
11 5/8 DS 66	Чутово -60	Каменная соль	1650-1950	300	183	1,694
11 5/8 DS 66	Чутово -60	Каменная соль	1950-2393	443	183	2,42
Долота производства ИСМ, Украина, G = 7 кН, N = 80 об/мин, Q = 17 л/с P = 90 атм						
ИМ АП 175/140 С	Кобзовская-51	аргиллит, глина	3331-3374	43	66	0,65
ИМ АП 214.3 МС	Кобзовская-51	алевролит	3171-3216	45	10,3	4,37
ИМ АП 214.3 МС	Кобзівська-59	алевролит	3014-3060	46	73	0,63
ИМ АП 214.3 МС	Тарасовское-200	песковик, аргиллит	4537-4547	16	80,3	0,2
ИМ АП 214.3 МС	Тарасовское-200	песковик, аргиллит	4455-4462	7	26,4	0,27
ИМ АП 214.3 МС	Кобзовка-51	каменная соль	2626-3171	545	197,15	2,76
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка-1	доломит, мергель	3809-3822	13	71,15	0,18
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка -1	доломит, мергель	3860-3863	3	15,3	0,2
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка -1	доломит, мергель	3865-3875	10	68,15	0,15
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка -1	доломит, мергель	3980-3989	9	65,45	0,14
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка -1	доломит, мергель	3896-3906	10	72,45	0,14
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка -1	доломит, мергель	3915-3918	3	24	0,13
ИМ АП 165.3/67 С	Керносовка -1	доломит, мергель	3924-3931	7	43,3	0,16
ИМ АП 165.1 С	Кобзовское-31	доломит, мергель	3569-3598	29	64,15	0,45
ИМ АП 165.1 С	Кобзовское-31	доломит, мергель	3618-3762	144	288,15	0,5

Таблица 3. Некоторые данные для исследования существования взаимосвязи скорости бурения и времени бурения для конкретного инструмента

Местор.	Куст	Скв.	Долото			Интервал		Пр-ка м	Вр. м/б		Мех.с. м/ч
			Диам.	Тип	Номер	от	до		ч		
М-Балыкское	615	5583	215,9	FD355M-A16	0070606	1370	1740	370	18	20,6	
В-Сургутское	204	618	215,9	FD355M-A-16	40605	1236	1580	344	9,3	37,0	
В-Сургутское	204	618	215,9	FD355M-A-16	40605	2200	2635	435	30,0	14,5	
В-Сургутское	204	618	215,9	FD355M-A-16	40605	2635	3073	438	27,4	16,0	
В-Сургутское	204	618	215,9	FD355M-A-16	40605	3073	3355	282	41,3	6,8	
В-Сургутское	204	614	215,9	FD355M-A16	0060505	2505	2752	247	32,0	7,7	
В-Сургутское	204	614	215,9	FD355M-A16	0060505	2752	2950	198	29,0	6,8	
В-Сургутское	204	614	215,9	FD355M-A16	0060505	2950	3390	440	37,0	11,9	
В-Сургутское	205	604	215,9	FD355M-A16	0100605	1986	2189	203	10	20,3	
В-Сургутское	205	604	215,9	FD355M-A16	0100605	2334	2700	366	24	15,3	
В-Сургутское	205	604	215,9	FD355M-A16	0100605	2700	2930	230	19	12,1	
В-Сургутское	205	604	215,9	FD355M-A16	0100605	2930	3263	333	26	12,8	
В-Сургутское	206	630	215,9	FD355M-A16	0020905	2065	2250	185	16	11,6	
В-Сургутское	206	630	215,9	FD355M-A16	0020905	2250	2705	455	33	13,8	
В-Сургутское	206	630	215,9	FD355M-A16	0020905	2705	3243	538	28,5	18,9	
В-Сургутское	206	519	215,9	FD355M-A16	0030905	2204	2414	210	28	7,5	
В-Сургутское	206	519	215,9	FD355M-A16	0010805	2414	2765	351	29	12,1	
В-Сургутское	206	519	215,9	FD355M-A16	0091005	2765	3100	335	30	11,2	
В-Сургутское	206	519	215,9	FD355M-A16	0091005	3100	3405	305	23	13,3	
В-Сургутское	206	625	215,9	FD355M-A16	0030605	1134	1200	66	3	22,0	
В-Сургутское	206	625	215,9	FD355M-A16	0030605	1200	1340	140	10,5	13,3	
В-Сургутское	206	625	215,9	FD355M-A16	0060505	1823	2146	323	20	16,3	
В-Сургутское	206	625	215,9	FD355M-A16	0060505	2146	2391	245	35	7,0	
В-Сургутское	206	625	215,9	FD355M-A16	0060505	2391	2650	259	33	7,8	
В-Сургутское	206	522	215,9	FD355M-A16	0010805	884	1023	139	15	9,3	
В-Сургутское	206	522	215,9	FD355M-A16	0010805	1948	2229	281	23	12,2	
В-Сургутское	206	522	215,9	FD355M-A16	0010805	2229	2550	321	28	11,5	
В-Сургутское	206	522	215,9	FD355M-A16	0010805	2550	2930	380	31,3	12,1	
В-Сургутское	206	522	215,9	FD355M-A16	0040605	2930	3215	285	33	8,6	
В-Сургутское	206	522	215,9	FD355M-A16	0040605	3215	3401	186	26	7,2	
В-Сургутское	206	517	215,9	FD355M-A16	30605	1765	2131	366	21	17,4	
В-Сургутское	206	517	215,9	FD355M-A16	30605	2131	2564	433	27	16,0	
В-Сургутское	206	517	215,9	FD355M-A16	30605	2814	3070	256	21	12,2	
В-Сургутское	206	517	215,9	FD355M-A16	30605	3070	3151	81	8	10,1	
В-Сургутское	206	517	215,9	FD355M-A16	30605	3151	3300	149	18	8,3	

Таблица 4

Местор.	Куст	Скв.	Долото			Интервал		Пр-ка	Вр. м/б	Мех.с.		Накоп-ленный износ	функция надежности
			Диам.	Тип	Номер	от	до						
М-Балыкское	596	5554	215,9	FD377MA-03	80204	2131	2447	316	28,2	11,2	0,218	0,218	0,782
М-Балыкское	596	5554	215,9	FD377MA-03	80204	2447	2952	505	36	14,0	0,278	0,496	0,504
М-Балыкское	596	5554	215,9	FD377MA-03	80204	2952	3145	193	14,5	13,3	0,112	0,608	0,392
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	80204	2253	2270	17	1	17,0	0,008	0,616	0,384
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	80204	2270	2485	215	22,5	9,6	0,174	0,790	0,210
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	80204	2485	2575	90	9,2	9,8	0,071	0,861	0,139
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	80204	2778	2878	100	18	5,6	0,139	1,000	0,000
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	0090204	2878	3020	142	17,7	8,0	0,132	0,132	0,868
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	0090204	3020	3095	75	8,5	8,8	0,064	0,196	0,804
М-Балыкское	596	4597	215,9	FD377M-A03	0090204	2152	2230	78	7,1	11,0	0,053	0,249	0,751
М-Балыкское	596	4597	215,9	FD377M-A03	0090204	2230	3070	840	66	12,7	0,494	0,743	0,257
М-Балыкское	596	4597	215,9	FD377M-A03	0090204	3070	3125	55	6,8	8,1	0,051	0,794	0,206
М-Балыкское	596	5543	215,9	FD377M-A03	0090204	2013	2270	257	27,5	9,3	0,206	1,000	0,000
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	0090204	2878	3020	142	17,7	8,0	0,132	0,132	0,868
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	0090204	2878	3020	142	17,7	8,0	0,132	0,132	0,868
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	0090204	3020	3095	75	8,5	8,8	0,064	0,196	0,804
М-Балыкское	596	4597	215,9	FD377M-A03	0090204	2152	2230	78	7,1	11,0	0,053	0,249	0,751
М-Балыкское	596	4597	215,9	FD377M-A03	0090204	2230	3070	840	66	12,7	0,494	0,743	0,257
М-Балыкское	596	4597	215,9	FD377M-A03	0090204	3070	3125	55	6,8	8,1	0,051	0,794	0,206
М-Балыкское	596	5543	215,9	FD377M-A03	0090204	2013	2270	257	27,5	9,3	0,206	1,000	0,000
М-Балыкское	596	4622	215,9	FD377M-A03	0090204	2878	3020	142	17,7	8,0	0,132	0,132	0,868

Стоит заметить, что для других долот на основе фактических данных получены зависимости, коэффициенты корреляции для которых пребывают в границах от 0,1 до 0,59, поэтому говорить о подтверждении данной гипотезы нельзя (данные – табл. 3).

Учет всех факторов износа относительно инструмента является очень сложным, потому часто сложно определить допустимый уровень износа инструмента предварительно. Таким образом, появляется задача определения теоретической средней интенсивности износа (износ за единицу времени) на основе модели статистической надежности инструмента, а также усреднённых данных стойкости инструментов.

Для построения функции износа инструмента необходимо получить вариационный ряд значений отработок долот. Построим убывающую функцию времени наработки на отказ для некоторых инструментов одного типоразмера, которые работали на одних породах при статистически одинаковых режимах бурения (табл. 4).

На основе этих данных построим функции надёжности отработок инструментов. Построим линии тренда для каждого инструмента (рис. 3). По результатам построения зависимостей видим, что эти зависимости являются достаточно сложными и их подбор заключается в нахождении модели с наивысшим коэффициентом корреляции. Тут использовали модели полиномов со степенями полинома выше 4, что позволяло обеспечить коэффициент корреляции не ниже 0,99.

В данном случае, вместо показателя времени перешли к условному показателю  $x$  – интервал наблюдений, поскольку интервалы наблюдений строились по эмпирическим данным и шаги разбивки не являются равными.

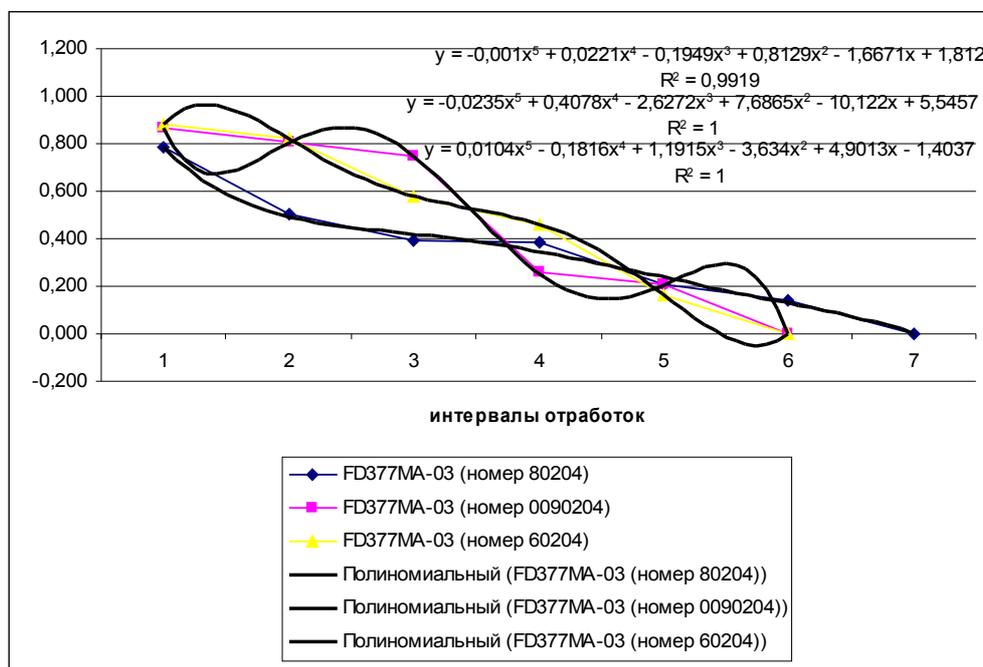


Рис. 3

Анализируя данные отработок долот, можно отметить, что несмотря на то, что долота работали в статистически одинаковых условиях (породы и режимные параметры) даже для долот одной конструкции нельзя выделить общие тенденции для построения функции надёжности.

Поэтому, целесообразно для аналитического описания функции надежности безотказной работы использовать случайную функцию с сильным перемешиванием, для которой закон распределения наработок на отказ, является нормальным:

$$P(\tau > T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\tau - C}{\sigma}} e^{-t^2/2} dt, \text{ где } \tau - \text{ время, для которого определяется вероятность; } T - \text{ среднее время работы инструмента определённого типоразмера; } C - \text{ математическое ожидание, } \sigma - \text{ среднеквадратическое отклонение времени наработок.}$$

Например, для долот конструкции 215,9 FD355M-A16 (производство ОАО «Волгабурмаш») на Мало-Балыкском и Верхне-Сургутском месторождениях – по данным [9] имеем такую информацию о наработках инструмента этого типоразмера – см. табл. 5.

Таблица 5. Данные о наработках долота конструкции 295,3 FD355M-A16

Номер инструмента	Проходка	Время механического бурения	Механическая скорость
	м	часов	м/час
002 04 05	573	47	47,34848
010 02 04	672	71	47,92576
0030805	1253	103	61,16262
70605	1270	108,3	71,99616
81005	863	100,5	50,41347
70606	370	18	20,55556
40605	1784	141	82,9391
60505	1712	186	57,58671
100605	1132	79	60,46296
20905	1178	77,5	44,22757
30905	210	28	7,5
10805	1472	126,3	57,19237
91005	640	53	24,42754

Определяем эмпирические среднее и дисперсию времени безотказной работы по известным параметрам наработок  $\tau_1 \dots \tau_N$ :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N} = \frac{(47 + 71 + 103 + 108,3 + 100,5 + 18 + 141) + (186 + 79 + 77,5 + 28 + 126,3 + 53)}{13} = 87,58 \text{ год}$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - C)^2}{N - 1} = \frac{\left( (47 - 87,58)^2 + (71 - 87,58)^2 + (103 - 87,58)^2 + (108,3 - 87,58)^2 + (100,5 - 87,58)^2 + (18 - 87,58)^2 + (141 - 87,58)^2 + (186 - 87,58)^2 + (79 - 87,58)^2 + (77,5 - 87,58)^2 + (28 - 87,58)^2 + (126,3 - 87,58)^2 + (53 - 87,58)^2 \right)}{12} = 2213,103$$

Тогда, вероятность безотказной работы за определенный период времени составляет:

$$P(\tau > T) = 1 - \Phi\left(\frac{\tau - C}{\sigma}\right);$$

$$P(\tau > T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^{\left(\frac{\tau - 87,58}{\sqrt{2213,103}}\right)} e^{-\tau^2/2} d\tau = 1 - \Phi\left(\frac{\tau - 87,58}{\sqrt{2213,103}}\right), \text{ где } \tau - \text{ время,}$$

для которого определяется вероятность,  $\Phi$  – функция Лапласа.

Следующим является вопрос определения уровня износа инструмента в целом и отдельных резцов в частности. Известно, что резцы долота изнашиваются неодинаково – наиболее изношенными являются центральные, а наименее периферийные (рис. 4). При этом, известно что нагрузка на резцы долота распределяется статистически неопределённым образом.



Рис. 4. Фото отработанного долота Read Nysalog 11 5/8 DS 66

Учитывая аналогию между величиной износа долота и кривой нормального распределения, можно сделать вывод, что нагрузка на резцы инструмента распределена по нормальному закону (рис. 5), согласно которому нагрузка распределена с плотностью вероятности  $P = f(x) = \frac{P_{\max}}{\sqrt{2\pi}\sigma \cdot n} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$ , где  $x$  – координата соответствующего положения резца в горизонтальной плоскости относительно наиболее нагруженных резцов,  $n$  – число лопастей,  $P_{\max}$  – наибольшая нагрузка,  $a$  – математическое ожидание;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение расположения резцов в проекции на горизонтальную плоскость.

Учитывая симметричность инструмента, для статистической оценки нагрузки, которая попадает на конкретный резец инструмента, можно сделать вывод, что кривые нормального распределения в центральной части инструмента накладываются; нагрузка на резцы, которые размещены в центральной части долота не достигают бесконечности (как можно сделать теоретический вывод), а достигают сравнительно небольших значений.

Учитывая симметричность инструмента, для статистической оценки нагрузки, которая попадает на конкретный резец инструмента, можно сделать вывод, что кривые нормального распределения в центральной части инструмента накладываются; нагрузка на резцы, которые размещены в центральной части долота не достигают бесконечности (как можно сделать теоретический вывод), а достигают сравнительно небольших значений.

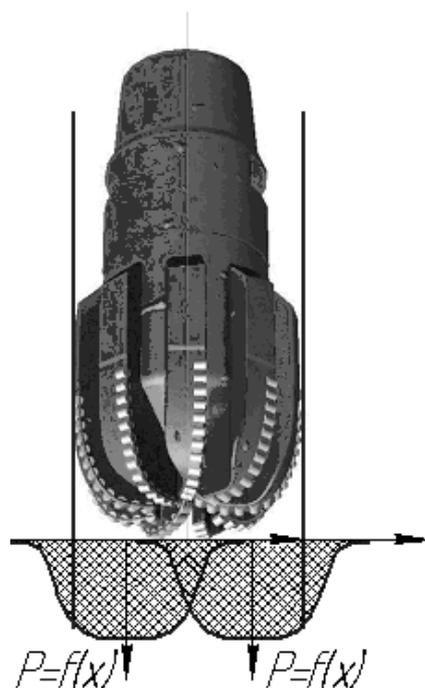


Рис. 6

Следовательно, подытоживая вышеприведенное, можно сделать следующие выводы:

1. Параметры обработки долот любого типа зависят от многих факторов и, обычно, построить не эмпирическую математическую модель их работы невозможно именно из-за значительного количества случайных факторов влияния.

Кроме того, построенные зависимости будут отвечать реальным показателям лишь с некоторым приемлемым приближением и только за определенных, часто достаточно узких, условий. Поэтому, результаты прогнозирования на основе даже очень мощных моделей часто имеют расхождения с фактическими данными, при этом усложнения моделей не дадут возможность избежать таких расхождений.

2. Обобщая данные всех трёх выборок, можно сказать, что основным характеристикам износа PDC долот на месторождениях являются: износ зубцов – 17 %, поломка зубцов 30 %, 31 % – скалывание зубцов, 3 % – выпадение зубцов, 19 % – отсутствие износа. То есть, технологические проблемы изготовления долот стали причиной их износа в 53 % случаев.

3. Установлена низкая адекватность линейных, логарифмических, экспоненциальных моделей для оценки отработок долот в зависимости от режимных параметров и свойств пород для группируемых данных по таким признакам: месторождения Украины, месторождения мира, месторождения Украины: долота отечественного и зарубежного производства.

4. Для повышения точности и возможности построения регрессионных моделей может быть использовано два подхода: существенное увеличение объема выборки и введения новых параметров в модель, или построение модели для конкретной конструкции долота. Экспериментально установлено, что первый подход не вызывал увеличение надёжности модели, поэтому более перспективным видится второй. Установлено, что существует линейная многофакторная зависимость между режимными параметрами и свойствами пород и результатами отработки для конкретных конструкций долот.

5. Исследовано наличие связи между временем бурения и механической скоростью для конкретного долота. Гипотезой исследования стало то, что при росте времени бурения уменьшается скорость бурения в результате разных факторов, в том числе и износа. Данная гипотеза не подтвердилась. Несмотря на то, что анализированные долота работали в статистически одинаковых условиях (породы и режимные параметры) даже для долот одной конструкции нельзя выделить общие показатели для построения функции надёжности

6. Учитывая аналогию между величиной износа долота и кривой нормального распределения, можно сделать вывод, что нагрузка на резцы инструмента распределена по нормальному закону.

### Литература

1. Пригоровська Т.О., Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу // Нафтогазова енергетика, 2008. № 4 (9). С. 33-39.
2. Архипов А.Г., Блинов Г.А. Методы классификации горных пород для выбора породоразрушающего инструмента при бурении скважин. Обзор ЗАО "Геоинформарк" (техника, технология и организации геологоразведочных работ). М., 2001, 56 с.
3. Бойко П.Я., Бойко С.П., Драганчук О.Т., Панов О.В., Кудрявцева Т.О. Порівняльна оцінка відпрацювання доліт різних типів (за даними БУ "Укрбургаз") // Науковий вісник ІФНТУНГ. 2003. № 1(5), С. 35-38.
4. Оборский Г.А. Прогнозирование надежности и стойкости режущего инструмента // Труды Одесского политехнического университета, 1998. № 1. URL: [http://www.nbuu.gov.ua/articles/ospu/opu\\_98\\_1/1\\_39.htm](http://www.nbuu.gov.ua/articles/ospu/opu_98_1/1_39.htm)
5. Smith Bits & Smith Services. <http://www.smith.com>
6. Савинцева О.С. Анализ длительностей до момента прекращения // Международная научная студенческая конференция. НГУ, 2001. URL: <http://www.nsu.ru/ef/tsy/ecmr/durat/savinc/savinc.htm>
7. Потапов О.А., Потапов А.Г. Определение эффективного времени работы долота // НТЖ Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2000. № 8-9. С.8-11.
8. Алексеев Ю.Ф. Современные методы прогнозирования физико-механических свойств горных пород и показателей работы долот. Тематические научно-технические обзоры, серия "Бурение". Москва, ВНИИОЭНГ, 1973. 146 с.
9. ОАО «Волгабурмаш». <http://www.vbm.ru>

## STATISTICAL ANALYSIS OF PDC DRILL BITS RUNNINGS AND THEIR LONGEVITY PREDICTION

T.A. Prigorovskaya

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

*Ivano-Frankivsk, Ukraine*

*e-mail: prigorovska@nung.edu.ua*

**Abstract.** Practice of drilling shows that modern drilling tools and the equipments using needs proper models of descriptive statistics for running results forecasting and optimization of initial drilling parameters. Methodological and practical questions of regression models application for drilling are probed at this article. Besides, it was analyzed the statistical data of PDC drill bits penetrations on the oil and gas fields of Ukraine and world, and probability of non-failure operation was calculated.

**Keywords:** PDC drill bits, rate of penetration, mechanical drilling speed, reliability, regression, statistical model, correlation

### References

1. Prigorovs'ka T.O., Draganchuk O.T. Analiz vidpratsyuvannya dolit PDC na rodovishchakh Ukraïni i svitu (Analysis of testing PDC bits on oilfields of Ukraine and the world). *Naftogazova energetika*, 2008. № 4 (9). С. 33-39.
2. Arkhipov A.G., Blinov G.A. Metody klassifikatsii gornykh porod dlya vybora porodorazrushayushchego instrumenta pri burenii skvazhin (Methods of classification of rocks for rock cutting tool selection in well drilling). Moscow: Geoinformark JSC, 2001. 56 p.
3. Boiko P.Ya., Boiko S.P., Draganchuk O.T., Panov O.V., Kudryavtseva T.O. Porivnyal'na otsinka vidpratsyuvannya dolit riznykh tipiv. Za danimi BU "Ukr-burgaz (Comparative evaluation of testing different types of drill bits. According to BU "Ukr-burgaz") *Naukovii visnik IFNTUNG*, 2003, Issue 1(5), pp. 35-38.
4. Oborskii G.A. Prognozirovanie nadezhnosti i stoikosti rezhushchego instrumenta (Predicting the reliability and durability of cutting tools) *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*, 1998, Issue 1.  
URL: [http://www.nbu.gov.ua/articles/ospu/opu\\_98\\_1/1\\_39.htm](http://www.nbu.gov.ua/articles/ospu/opu_98_1/1_39.htm)
5. Smith Bits & Smith Services. <http://www.smith.com>
6. Savintseva O.S. Analiz dlitel'nostei do momenta prekrashcheniya (Analysis of the duration until terminated), Mezhdunarodnaya nauchnaya studencheskaya konferentsiya NGU (International student scientific conference of NSU), 2001,  
<http://www.nsu.ru/ef/tsy/ecmr/durat/savinc/savinc.htm>
7. Potapov O.A., Potapov A.G. Opredelenie effektivnogo vremeni raboty dolota (Determination of the effective time of work the drill bit) *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2000, Issue 8-9, pp. 8-11.

8. Alekseev Yu.F. Sovremennye metody prognozirovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornykh porod i pokazatelei raboty dolot (Modern methods of predicting the physical and mechanical properties of rocks and drill bits performance). Thematic scientific and technical reviews. Series of "Drilling". Moscow, VNIIOENG, 1973. 146 p.

9. Volgaburmash JSC. <http://www.vbm.ru>