Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXVI, 1981 г.

УДК 622.243.1

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БУРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА БУЛЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

А.Н.СЕЛИВАНОВ

Достоверность и эффективность экспериментальных исследований при создании буровой техники и разработке технологии бурения во многом определяются адекватностью и устойчивостью получаемых моделей. Вместе с тем бурение представляет собой сложный многофакторный процесс, характеризующийся априорной неопределенностью. Эта неопределенность обусловлена незнанием законов распределения случайных величин, наличием большого числа побочных факторов, не поддающихся непосредственному измерению и наблюдению (качество забоя, степень износа породоразрушающего инструмента, различия в свойствах буримых пород и т.д.). Дополнительные трудности заключаются в том, что получаемые модели должны быть легко интерпретируемы, т.е. иметь достаточно четкий физический смысл для того, чтобы выявленные закономерности можно было бы использовать для проектирования и совершенствования техники и технологии буровых процессов.

Трудности, которые появляются при исследовании сложных объектов традиционными статистическими методами факторного анализа, общеизвестны [3]. Основными из них являются: необходимость получения большого объема экспериментальных данных, большой объем вычислительных работ при регрессионном анализе по всем переменным, необходимость количественной оценки факторов, сложность интерпретации весьма громоздких моделей.

Большие перспективы для статистического моделирования процессов бурения открывает новый метод, разработанный В.А.Щегловым, - метод булевых моделей [5], позволяющий многократно упростить исследования сложных объектов, характеризующихся априорной неопределенностью и неполнотой данных. Этот метод обладает не только простотой расчетов, но и позволяет получать легко интерпретируемые модели с большим числом переменных.

Алгоритм построения булевых моделей [5] реализует исчисление предикатов - свойство случайных величин занимать некоторое определенное подпространство из евклидова n-мерного пространства. Существенная особенность этого алгоритма заключается в его приспособленности к условиям не-

полноты данных - информация черпается за счет сравнения ближайших (во времени или пространстве) векторов состояния объекта, когда незарегистрированные переменные („дрейф" объекта) имеют тенденцию сохраняться постоянными.

Примером эффективного применения метода булевых моделей могут служить результаты моделирования процесса бурения скважин большого диаметра (605 мм) в многолетнемерзлых россыпях экспериментальным образцом колонкового пневмоударного снаряда. Конструкция снаряда и анализ первого этапа его испытаний традиционными методами статистического моделирования даны В.М.Минаковым и И.В.Морозовым [2]. Полученные при этом частные зависимости механической скорости бурения от величины углубки за рейс и механической скорости бурения от частоты вращения и осевой нагрузки дают ограниченные возможности для анализа конструкции и работоспособности снаряда. Поэтому дальнейшие исследования проводились статистическим моделированием с использованием метода булевых моделей.

Экспериментальные данные при этом методе обрабатываются в два этапа. На первом этапе рабочие диапазоны изменения переменных квантуются на отдельные уровни (в простейшем случае - на два уровня), и методом минимизации булевых функций строится булевая модель объекта. На втором этапе решается задача интерпретации булевых моделей в терминах, принятых для описания данной технологии и существующих содержательных теорий.

Постановка задачи математического моделирования в данном случае сводится к следующему. Процесс бурения характеризуется в нашем случае пятью варьируемыми параметрами x_i ; W - частота вращения бурового снаряда, принимающая два уровня значений 0,5 и I,0 Гц; C - осевая нагрузка (от 0 до $II,5 \cdot I0^4$ Н); p - давление сжатого воздуха в сети (от $2 \cdot I0^5$ до $6,5 \cdot I0^5$ Па); H - глубина бурения, которая в нашем случае в большой степени характеризует (с точки зрения влияния на показатели бурения) изменчивость свойств буримых пород с глубиной и варьирует в пределах 0,5-6,4 м; l - часть рейса, к которой относится наблюдение, например, при разделении на два уровня - первая или вторая половина рейса.

В качестве целевой функции выступает механическая скорость бурения v, которая в зависимости от значений параметров x_i способа бурения, а также других неучтенных факторов принимает значения от I,25 до 30,I2 см/мин.

Исходный массив экспериментально-статистической информации располагается в виде таблицы, содержащей столбцы для параметров x_j, столбец для целевой функции v и m строк, следующих друг за другом в порядке их получения в процессе хронометражных наблюдений.

Рабочий диапазон каждой переменной x_i и целевой функции v делится на две части точкой разделения (медианой) так, чтобы в каждую из частей попадало примерно одинаковое число значений переменных из их общего количества m. После этого каждая строка таблицы получает двоичный код - 0 или I, где 0 соответствует x_i или v из нижнего уровня, а I - v из верхнего уровня относительно медианы разбиения.

Метод позволяет производить при необходимости более дробное разбиение параметров и целевой функции, чем рассмотренное разбиение на два

Таблица 1

Правила квантования

Параметры	v, см/мин		W, Гц		C, Н		p, Па		H, м		l	
Диапазон измерения параметров	$\leq 3,6$	$> 3,6$	0,5	1,0	0	$\geq 5,5\times10^3$	$\leq 5\times10^5$	$>5\times10^5$	$\leq 2,0$	$>2,0$	$\leq \frac{h_i}{2}$ *)	$> \frac{h_i}{2}$
Уровень кодирования	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Кодированное обозначение	v^0	v^1	W^0	W^1	C^0	C^1	p^0	p^1	H^0	H^1	l^0	l^1

*) h_i – величина проходки за один рейс, м.

Таблица 2

Задания булевой функции экспериментальных данных

Номер строки	Интервал наблюдения Δh, см	v, см/мин	Кодированные значения					
			v	W	C	p	H	l
1	5	1,88	0	0	1	1	1	0
2	5	2,50	0	0	1	1	1	0
3	5	3,33	0	0	1	1	1	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.
36	10	12,04	1	0	0	0	1	0
37	10	2,86	0	0	1	0	1	1
38	10	1,54	0	0	1	0	1	1
39	5	1,43	0	0	1	0	1	1

уровня. Однако с учетом небольшого объема имеющейся информации, а также нецелесообразности более детальных выводов по технологии бурения пневмоударным буровым снарядом, конструкция которого требует существенных доработок, для задач, решаемых в данной работе, достаточно разбиения только на два уровня.

Правила квантования полученных массивов информации показаны в табл.I.

В результате преобразования исходного массива экспериментально-статистических данных по правилам табл.I получаем таблицу задания булевой функции (табл.2).

Задача построения булевой модели объекта состоит в восстановлении по полученной табл.2 булевой функции в минимальной дизъюнктивной нормальной форме.

Алгоритм минимизации описан В.Г.Репиным и Г.П.Тартаковским [3].

Выделенное с помощью алгоритма минимизации сочетание параметров записывают в виде импликанта:

$$x_{i_1}^{\sigma_1} \wedge x_{i_2}^{\sigma_2} \wedge \ldots \wedge x_{i_k}^{\sigma_k} \wedge \ldots \wedge x_{i_r}^{\sigma_r} . \qquad (I)$$

где $\sigma_k \in \{0,1\}$; $r \in \{1,2,\ldots i,\ldots n\}$, n - число переменных; $x_{i_k}^0 = \bar{x}_{i_k}^1$ - отрицание $x_{i_k}^1$; $x_{i_k}^1 = \bar{x}_{i_k}^0$; все $x_{i_k} (k = 1,2 \ldots r)$ - различны.

Поскольку для данного уровня целевой функции характерно совместное наличие переменных $x_{i_1}^{\sigma_1}$, $x_{i_2}^{\sigma_2}$, ..., $x_{i_k}^{\sigma_k}$, ..., $x_{i_r}^{\sigma_r}$ [3], то дизъюнктивное выражение (I) может быть записано в форме, называемой импликантом:

$$x_{i_1}^{\sigma_1} x_{i_2}^{\sigma_2} \ldots x_{i_k}^{\sigma_k} \ldots x_{i_r}^{\sigma_r} . \qquad (2)$$

Аналогично выделяют импликанты для всех строк данного уровня v, которые затем ранжируют в зависимости от частоты их появления в своем классе (разряде) целевой функции.

Построение булевой модели объекта исследований сводится к выбору минимального количества наиболее часто встречающихся импликантов так, чтобы они покрывали все строки таблицы, принадлежащие своему v.

После выполнения всех операций в соответствии с описанным выше алгоритмом получаем следующие импликанты, полностью охватывающие выборку:

$$\Gamma = (14) l^0 \rightarrow v^1, \qquad (3)$$

$$\Gamma = (4) W^1 l^1 \rightarrow v^1, \qquad (4)$$

$$\Gamma = (10) p^0 l^1 \rightarrow v^0, \qquad (5)$$

$$\Gamma = (4) W^0 C^0 H^1 l^1 \rightarrow v^0, \qquad (6)$$

$$\Gamma = (4) W^0 C^1 l^0 \rightarrow v^0, \qquad (7)$$

$$\Gamma = (3) W^1 C^1 l^0 \rightarrow v^0. \qquad (8)$$

Объединяя в одну группу импликанты (3) и (4), а в другую (5), (6), (7), (8), получаем две первичные модели пневмоударного способа бурения:

модель процесса с высоким значением $v = v^1$

$$v^1 = (14) l^0 \vee (4) W^1 l^1 ; \qquad (9)$$

модель процесса с низким значением $v = v^0$

$$v^0 = 10 p^0 l^1 \vee (4) W^0 C^0 H^1 l^1 \vee (4) W^0 C^1 l^0 \vee (3) W^1 C^1 l^0 = (14) l^1 [p^0 \vee W^0 C^0 H^1] \vee (7) l^0 C^1. \qquad (10)$$

Модель (9) означает, например, что в рассматриваемой выборке высокий уровень значения $v = v^1$ был обусловлен или низким значением параметра $l = l^0$, или одновременным сочетанием высокого значения параметра $W = W^1$ и высокого значения параметра $l = l^1$. Цифры в скобках означают частоту появления данных импликант в табл.2. Отсутствие в модели (9) параметров C, p и H свидетельствует о незначимости этих параметров относительно целевой функции v.

Таким образом, импликанты – это выделенные из общей выборки качественно однородные статистические совокупности, элементы которых объединены общей причинной связью. Поэтому при статистических исследованиях отдельных ситуаций, описываемых импликантами, статистическую группировку, обязательно предшествующую всем другим статистическим исследованиям [4], правомочно осуществлять самыми простыми способами, например, на основе коэффициента вариации. При этом однородность достаточно проверить только по целевой функции, так как по остальным параметрам распознавание образов осуществлено алгоритмом минимизации булевой функции.

Покажем возможность статистического исследования отдельных технологических ситуаций на примере ситуаций, описываемых моделью $v^1 = (14)l^0$.

С этой целью запишем выборку, составленную из строк табл.2, соответствующих этому импликанту (табл.3, графы I–3), упорядочив ее относительно значений v^1 и проанализируем ее статистическую однородность.

Дисперсия этой выборки D = I2I,8, а коэффициент вариации V = 0,8.

Так как $V > 0{,}33$, то статистическая выборка неоднородна и необходимо произвести ее группировку (табл.4).

Статистические оценки (при доверительной вероятности α = 0,9):

для первой группы

$$\bar{v}^1 = 5{,}85 \pm 1{,}32$$

при D = 2,89, σ = I,7, V = 0,29;

для второй группы

$$\bar{v}^1 = 12{,}30 \pm 0{,}48$$

при D = 0,296, σ = 0,544, V = 0,04;

для третьей группы

$$\bar{v}^1 = 25{,}62 \pm 7{,}40$$

при D = 28,45, V = 0,20.

Следовательно, технологическая ситуация, описываемая импликантом $v^1 = (14)l^0$, несмотря на качественную однородность в количественном отношении представляет собой неоднородную статистическую выборку. Она составлена из трех самостоятельных статистически однородных (качественно и количественно) групп. Это свидетельствует о влиянии на процесс бурения каких-то дополнительных факторов, не учтенных в процессе экспериментальных исследований. Такими факторами могут быть, например, какие-то неучтенные физические свойства буримых пород. Их учет позволил бы более точно детализировать модель $v^1 = (14)l^0$ без нарушения ее общности.

Помимо получения простых статистических оценок, по каждой статистически однородной группировке может быть произведена при необходимости аппроксимация результатов эксперимента непрерывной функцией. Аппроксимация может выполняться любым известным способом. Например, для первой группы данных модели $v^1 l^0$ получаем уравнение

$$v^1 = 9{,}02\, e^{-0{,}012l}. \qquad (11)$$

Таблица 3

Статистическая выборка $v^1=l^0$

Номер строки табл.2	v_i^1, см/мин	Δh_i, см	$v_i^1 \Delta h_i$	$v_i^1 - \bar{v}^1$	$(v_i^1 - \bar{v}^1)^2$	$(v_i^1 - \bar{v}^1)^2 \Delta h_i$
14	3,61	10	36,1	-10,06	101,20	1012,0
15	4,00	10	40,0	-9,67	93,51	935,1
13	5,99	10	59,9	-7,68	58,98	589,8
25	5,99	10	59,9	-7,68	58,98	589,8
12	7,52	10	75,2	-6,15	37,82	378,2
24	8,00	10	80,0	-5,67	32,15	321,5
21	12,04	10	120,4	-1,63	2,66	26,6
31	12,04	10	120,4	-1,63	2,66	26,6
32	12,04	10	120,4	-1,63	2,66	26,6
34	12,04	10	120,4	-1,63	2,66	26,6
23	13,33	10	133,3	-0,34	0,12	1,2
22	20,00	10	200,0	+6,33	40,07	400,7
30	20,00	10	200,0	+6,33	40,07	400,7
33	30,12	25	200,0	+16,45	270,60	6765,0
-	-	$\sum$155	$\sum$2119,0	-	-	$\sum$18270,0

Таблица 4

Статистическая совокупность $v^1=l^0$

Первая группа			Вторая группа			Третья группа		
Номер строки табл. 2	v_i^1	Δh_i	Номер строки табл. 2	v_i^1	Δh_i	Номер строки табл.2	v_i^1	Δh_i
14	3,61	10	21	12,04	10	22	20,00	10
15	4,00	10	31	12,04	10	30	20,00	10
13	5,99	10	32	12,04	10	33	30,12	25
25	5,99	10	34	12,04	10			
12	7,52	10	23	13,33	10			
24	8,00	10						
		$\sum_{i=1}^{N} \Delta h_i = 60$			$\sum_{i=1}^{N} \Delta h_i = 50$			$\sum_{i=1}^{N} \Delta h_i = 45$

Область применения уравнения (II) следует понимать следующим образом: если бурение пневмоударным буром осуществляется в пределах 0-50 см от начала рейса (первая половина рейса l^0), то механическая скорость бурения не зависит от параметров W, C, p и H (в исследованном диа-

Таблица 5

Модели процесса бурения

Номер модели	Модель в конъюктивно-дизъюнктивной булевой форме	Доля проходки, приходящаяся на данный импликант, %	Механическая скорость бурения v, см/мин	
			Среднее значение, $\bar{v}$ (α = 0,9)	Диапазон изменения
I	$v^1 = l^0 V W^1 l^1$,	100,0	11,76	3,61–30,12
	в том числе:			
	$v^1 = l^0$	30,8	$5,85 \pm 1,32$	3,61–8,00
		25,6	$12,30 \pm 0,48$	12,04–13,33
		23,1	$25,62 \pm 7,40$	20,00–30,12
	$v^1 = W^1 l^1$	20,5	$4,36 \pm 0,53$	3,75–4,81
II	$v^0 = l^0 (p^0 V W^0 c^0) V l^0 c^0$	100,0	2,58	1,33–3,60
	в том числе:			
	$v^0 = l^1 p^0$	36,4	$3,22 \pm 0,33$	2,50–3,60
		18,2	$1,43 \pm 0,13$	1,33–1,54
	$v^0 = l^1 W^0 c^0$	54,5	$3,25 \pm 0,27$	2,50–3,60
	$v^0 = l^0 c^1$	21,2	$2,47 \pm 0,37$	1,88–3,33

пазоне их изменения) и определяется в основном величиной проходки от начала рейса l^0 ; если при этом значение механической скорости бурения $v \in \{3,61\text{–}8,0,\}$ то зависимость механической скорости бурения от l выражается уравнением (II).

Малое количество экспериментальных данных не позволило осуществить достаточно корректную аппроксимацию всех импликант непрерывными функциями. Кроме того, такая детализация оказалась бы излишней для выполненного уровня экспериментальных исследований и поставленных перед ними целей. Поэтому ограничимся только дискретными моделями, обеспечивающими качественное выделение ситуаций (распознавание образов) со статистической оценкой достоверности средних.

Полученные модели процесса бурения скважин экспериментальным пневмоударным буровым снарядом большого диаметра в многолетнемерзлых россыпях представлены в табл.5.

Модель I – модель процесса бурения, осуществляемого с относительно высокой механической скоростью $v^1 \geqslant 3,61$ см/мин. Высокое значение механической скорости бурения v в существенном большинстве случаев (79,5 % от общего объема бурения с $v^1 > 3,6$ см/мин) связано только с бурением в первой половине рейса (импликант $v^1 = l^0$) или в более редких случаях (20,5 %) – со второй половиной рейса l^1 в сочетании с повышенной частотой вращения W^1 (импликант $v^1 = W^1 l^1$). Импликанту $v^1 = l^0$ соответствуют механические скорости, представляющие собой статистически неоднородную выборку, разделяемую на три однородных группировки со значениями ме-

ханической скорости, лежащими в диапазонах 3,6I-8,00; I2,04-I3,33; 20,00-30,I2 см/мин, что может объясняться существенным различием свойств буримых пород. Импликант $v^1 = W^1 l^1$ отражает ситуации, при которых средняя механическая скорость $\bar{v}^1_{(W^1 l^1)} = 4,36 \pm 0,53$ см/мин, т.е. незначительно отличается от значений v, отнесенных к низкой механической скорости ($v^0 \leqslant 3,6$ см/мин).

Модель П - модель процесса бурения, осуществляемого с относительно низкой скоростью $v^0 \leqslant 3,6$ см/мин. Низкое значение механической скорости бурения v^0 в основном (78,8 % от общего объема бурения с $v^0 \leqslant 3,6$ см/мин) связано с бурением во второй половине рейса l^1 в сочетании или с низким давлением сжатого воздуха в сети p^0 (обусловлено малым количеством подаваемого воздуха), или с низкими значениями частоты вращения W^0 и осевой нагрузки C^0 (конъюнкция $v^0 = l^1(p^0 V W^0 C^0)$. Реже (2I,2 %) низкое значение $v = 2,47 \pm 0,37$ см/мин имело место в первой половине рейса в сочетании с высокой осевой нагрузкой (импликант $v^0 = l^0 C^1$). Выборка, составленная из значений механической скорости бурения, относящихся к ситуациям, описываемым импликантом $v^0 = l^1 p^0$, делится на две статистические группировки: $\bar{v}^0_{(l^1 p^0)} \in \{2,5\text{-}3,6$ см/мин$\}$ и $\bar{v}^0_{(l^1 p^0)} \in \{$I,33-I,54 см/мин$\}$. Выборки по другим импликантам представляют собой статистически однородные группировки.

Сравнительный анализ моделей I и П показывает:

I. Процесс бурения пневмоударным буровым снарядом сопровождается технологическими осложнениями, усиливающимися по длине рейса. Об этом свидетельствуют: большая степень влияния фактора l в моделях I и П; очень слабое влияние технологических режимов бурения W, C и p, отсутствие влияния глубины бурения H и косвенно связанного с ней изменения литологических свойств буримых пород; большая разница между средними значениями механической скорости в каждой модели ($\bar{v}^1 = 11,76$ см/мин, $\bar{v}^0 = 2,58$ см/мин).

2. Повышение частоты вращения бурового снаряда позволяло несколько уменьшить интенсивность падения механической скорости бурения по длине рейса, что отражается импликантом $v^1 = W^1 l^1$ в модели I. Однако это влияние частоты вращения незначительно, так как средняя механическая скорость при этом ($\bar{v}^1_{(W^1 l^1)} = 4,36 \pm 0,53$ см/мин) существенно ниже средней скорости по модели I в целом ($\bar{v}^1 = 11,76$ см/мин) и ближе к средней скорости по модели П ($\bar{v}^0 = 2,58$ см/мин).

3. Повышение осевой нагрузки на буровой снаряд приводит к более интенсивному падению механической скорости бурения по длине рейса (очевидно, за счет более интенсивного нарастания в скважине осложнений). Это отражено импликантом $v^0 = l^0 C^1$ в модели П.

Применение статистического моделирования на основе метода булевых моделей при испытании новой буровой техники и технологии позволяет получать более полную качественную и количественную информацию об исследуемом явлении при меньшем объеме экспериментальных работ по сравнению с традиционными методами многофакторного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кильдишев Г.С., Аболенцев Ю.М. Многомерные группировки. М., Статистика, 1978.

2. Опыт бурения скважин большого диаметра в многолетнемерзлых россыпях / Минаков В.М., Морозов И.В., Орьев В.А., Широконосов Г.Е. – Тр. ЦНИГРИ, 1979, № 147.

3. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., Советское радио, 1977.

4. Сиськов В.И. Об определении величины интервалов при группировках. Вестник статистики. 1971, № 12.

5. Щеглов В.Н. Получение булевой модели сложного технологического процесса по текущей информации. – Заводская лаборатория, 1972, № 1.