

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.243.13

**МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ И СРАВНЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЙ БУРЕНИЯ СКВАЖИН**

В.В. КУЛИКОВ

*Российский государственный геологоразведочный университет
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23; e-mail: KulikovVV@mgru-rggru.ru*

Рассмотрена методика выбора рационального сочетания и сравнения измеряемых характеристик и показателей, используемых при принятии решений, проектировании и оценке эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин (геолого-разведочных, геотехнологических и нефтегазовых). При выборе рационального сочетания однородных характеристик и показателей в основу формализованного представления методики положен геометрический координатный подход, основанный на определении максимального (минимального) расстояния между точками, расположенными в арифметическом n -мерном евклидовом пространстве и характеризующими данный объект анализа и принятия решений. Формализованное представление методики выбора рационального сочетания как неоднородных, так и однородных характеристик и показателей базируется на определении максимальной (минимальной) величины произведения значений последних. Представлены примеры расчётов из различных областей буровых производственных процессов и технологий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бурение скважины; принятие решений; оценка эффективности; технологии бурения; производственные процессы.

**METHODS FOR THE CHOOSING THE RATIONAL COMBINATION
AND COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS AND FACTORS
OF THE EFFICIENCY OF THE PRODUCTION PROCESSES
AND TECHNOLOGIES OF THE BOREHOLE DRILLING**

V.V. KULIKOV

*Russian State Geological Prospecting University
Russian Federation, 117997, Moscow, Miklouho-Maklay's street, 23; e-mail: KulikovVV@mgru-rggru.ru*

The paper considers the methods for choosing the rational combination and comparison of the measured characteristic and factors, used during decisionmaking, designing and assessment the efficiency of the production processes and boreholes drilling technologies. When choosing the rational comparison of the homogeneous characteristic and factors, in basis of the formalized representation of the methods the reisa coordinate geometrical approach, based on the definition of the maximum (minimum) distance between the points, located in the arithmetical n -dimensional Euclidean space and characterized by the given object of the analysis and decision making. Formalized representation of the methods for the choosing the rational combination of non-homogeneous as well as the homogeneous characteristics and factors bases on the definition of the maximum (minimum) value of the product of the their values. The examples are given from the different fields of the drilling production processes and technologies.

Keywords: borehole drilling; decisionmaking; efficiency assessment; drilling technologies; production processes.

Проектирование и оценка эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин различного целевого назначения требуют принятия конкретных обоснованных решений применительно к сложным системам с большим числом параметров и характеристик [2]. Примерами таких сложных проблем могут быть: выбор рациональной технологии бурения скважины из нескольких вариантов, имеющих различные измеряемые показатели эффективности; сравнительная оценка эффективности результатов бурения скважин в одинаковых геолого-технических условиях при одинаковом качестве результатов одновременно по нескольким показателям (например, по стоимости бурения 1 м скважины и суточной производительности её сооружения [6—11]); обоснованные рекомендации по выбору породоразрушающих инструментов, обладающих характеристиками, наиболее подходящими к конкретным геологическим условиям бурения; выбор расчётной траектории скважины, наиболее приближенной к центру заданной области, отвечающей наиболее качественному керновому опробованию (геолого-разведочные скважины) или наиболее эффективной эксплуатации (геотехнологические, нефтегазовые и водозаборные скважины) и многие др.

Примером решения проблемы сравнительной оценки эффективности результатов бурения скважин по критерию оценки эффективности буровых технологий при равновесности показателей стоимости и времени бурения 1 м скважины является минимизация величины $(q_{1c})_{\text{общ}}$ [7—11]:

$$(q_{1c})_{\text{общ}} = C_2 \cdot t_1^2 = C_2 / \text{Пр}^2 = C_1 / \text{Пр} = C_1 \cdot t_1 \quad \min, \quad (1)$$

где $(q_{1c})_{\text{общ}}$ — критерий оценки эффективности буровых технологий по конечным результатам производства работ, выраженный через стоимость бурения 1 м скважины и через стоимость 1 суток сооружения скважины, руб. · сут./м²; C_1 — стоимость бурения 1 м скважины, руб./м; t_1 — время бурения 1 м скважины, сут./м; Пр — суточная производительность бурения, м/сут.; C_2 — стоимость 1 сут. сооружения скважины, руб./сут.

$$C_1 = C / L, \quad (2)$$

где C — полная стоимость сооружения скважины, руб.; L — длина ствола скважины, м.

$$t_1 = t / L, \quad (3)$$

где t — полное время сооружения скважины, сут.

$$\text{Пр} = 1 / t_1. \quad (4)$$

$$C_2 = C / t. \quad (5)$$

Чем меньше величина $(q_{1c})_{\text{общ}}$, тем эффективнее применяемая технология бурения, поэтому следует стремиться к выполнению условия $(q_{1c})_{\text{общ}} \min$

[7—11]. Решение проблемы сравнительной оценки эффективности результатов бурения скважин в условиях неравновесности показателей стоимости и времени бурения 1 м скважины предложено в [6]:

$$(q_{1c})_{\text{общ}} = C_1^a / \text{Пр}^b = C_1^a t_1^b \quad \min, \quad (6)$$

где $(q_{1c})_{\text{общ}}$ — критерий оценки эффективности буровых технологий по конечным результатам производства работ, учитывающий в общем случае возможную неравновесность показателей стоимости и времени бурения 1 м скважины, руб. сут./м²; a, b — безразмерные величины, отражающие значимость каждого из показателей: $0 < a < 1, 0 < b < 1$.

Однако представленные формализованные решения сложных проблем (1) и (6) являются частными (локальными). Единая рекомендуемая специализированной литературой и практикой управления производственными процессами методика решения таких проблем отсутствует. Необходимость подобной методики очевидна. Рассмотрим принципы её построения и примеры использования.

Забегая вперёд, следует отметить, что формализованное представление методики решения зависит в первую очередь от степени однородности (смыслового родства) анализируемых характеристик и показателей. К однородным будем относить только те одновременно анализируемые характеристики и показатели, значения которых отражают одинаковые по смыслу свойства величин (например, только линейные размеры, только массы, только стоимости и др.). К неоднородным отнесём анализируемые характеристики и показатели, отражающие различные свойства величин (например, и линейные размеры, и массы, и стоимости одновременно).

1. Методика выбора рационального сочетания и сравнения измеряемых однородных (физических или нефизических) характеристик и показателей, имеющих одинаковую размерность (или безразмерных).

Исходными постулатами, лежащими в основе разрабатываемой методики, будем считать следующие:

1. Характеристики и показатели, используемые при принятии решений, проектировании и оценке эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин, являются измеряемыми, т. е. их значения можно представить в численном виде.

2. Характеристики и показатели являются однородными (физическими или нефизическими) величинами, имеющими одинаковую размерность или не имеющими размерности.

3. Значения характеристик и показателей отождествляются с геометрическими координатами точек, лежащих в n -мерном (по числу значений)

арифметическом евклидовом пространстве: (x_i, y_i, z_i, \dots) .

4. Точки, характеризующие значения показателей, представляются расположенными в n -мерной прямоугольной декартовой системе координат $XYZ\dots$.

5. Характеристики и показатели могут иметь (не иметь) максимальные $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}, \dots)$, минимальные $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, \dots)$ и равные нулю $(x_i = 0, y_i = 0, z_i = 0, \dots)$ значения.

6. Рациональным сочетанием характеристик и показателей обладает тот анализируемый объект, определяемый положением точки в n -мерном арифметическом евклидовом пространстве, расстояние d от которой до точки сравнения (максимума $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}, \dots)$, минимума $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, \dots)$ возможных значений, начала координат $(x_i = 0, y_i = 0, z_i = 0, \dots)$ или другой), в зависимости от условий решаемой задачи, либо максимально ($d = \max$), либо минимально ($d = \min$).

7. Если одновременно несколько точек находятся на одинаковом расстоянии d до точки сравнения, то рациональным (универсальным) сочетанием характеристик и показателей обладают (в зависимости от условий решаемой задачи) либо одновременно несколько анализируемых объектов, либо тот из них, для которого расстояние от места пересечения нормали, опущенной из точки на линию равновесного сочетания показателей (название условное), проходящую через начало координат и точку сравнения, будет минимальным ($d = \min$).

8. Характеристики и показатели могут рассматриваться как равновесные (т. е. имеющие одинаковую степень важности при принятии решений, проектировании и оценке эффективности), так и неравновесные, среди которых выделяются более и менее значимые.

9. Относительная значимость конкретного показателя (x_i, y_i, z_i) может учитываться либо величиной показателя степени (x_i^a, y_i^b, z_i^c) , например, в (6), либо величиной коэффициента-множителя, стоящего перед показателем $(k_x x_i, k_y y_i, k_z z_i)$.

Связь между значениями показателей степени и коэффициентами (на примере координаты x_i) можно определить следующим образом:

$$k_x x_i = x_i^a, \quad (7)$$

где a, k_x — безразмерные числа, отражающие относительную значимость показателя x_i : $0 < a < 1, 0 < k_x < 1$.

Прологарифмируем (7):

$$\ln(k_x x_i) = \ln(x_i^a) = a \ln x_i. \quad (8)$$

Тогда

$$a = \ln(k_x x_i) / \ln x_i. \quad (9)$$

Или

$$k_x = x_i^a / x_i = x_i^{a-1}. \quad (10)$$

Следует отметить, что в практике принятия решений, проектирования и оценки эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин в целом достаточно широко (особенно по результатам опытных исследований) используются зависимости, включающие в себя величины, представленные в форме (7). Так, характерным примером, иллюстрирующим зависимости с коэффициентами-множителями и величинами, имеющими степенной характер взаимосвязи параметров вида (7), является расчёт мощности, затрачиваемой на процесс бурения скважины по эмпирическим зависимостям [5].

Расстояние между двумя точками, имеющими координаты (x_2, y_2, z_2, \dots) , (x_1, y_1, z_1, \dots) и характеризующими значения показателей, определяются по следующим зависимостям:

а) на плоскости $XU[1, 4]$:

$$d = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]^{0.5}; \quad (11)$$

б) в трёхмерном евклидовом пространстве $XYZ[1, 4]$:

$$d = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{0.5}; \quad (12)$$

в) в n -мерном арифметическом евклидовом пространстве $XYZ\dots[4]$:

$$d = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + \dots]^{0.5}. \quad (13)$$

Применительно к точкам максимума, минимума значений и началу координат (13) примет вид соответственно:

$$d = [(x_{\max} - x_1)^2 + (y_{\max} - y_1)^2 + (z_{\max} - z_1)^2 + \dots]^{0.5}, \quad (14)$$

$$d = [(x_2 - x_{\min})^2 + (y_2 - y_{\min})^2 + (z_2 - z_{\min})^2 + \dots]^{0.5}, \quad (15)$$

$$d = [x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 + \dots]^{0.5}. \quad (16)$$

Если необходимо учесть возможную различную относительную значимость показателей, то в соответствии с (7) — (10), в (14) — (16) вместо значений координат x_i, y_i, z_i, \dots следует подставить соответственно $k_x x_i, k_y y_i, k_z z_i, \dots$ или $x_i^a, y_i^b, z_i^c, \dots$.

Прямую линию, проходящую через любые (в зависимости от условий задачи) из двух точек — точку минимума $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, \dots)$ возможных значений, начало координат $(x_i = 0, y_i = 0, z_i = 0, \dots)$, точку максимума $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}, \dots)$, условно назовём прямой равновесного сочетания показателей.

Уравнение прямой, проходящей через две точки [1]:

а) на плоскости XU :

$$(x - x_1) / (x_2 - x_1) = (y - y_1) / (y_2 - y_1); \quad (17)$$

б) в трёхмерном евклидовом пространстве XYZ :

$$\frac{(x - x_1) / (x_2 - x_1)}{= (z - z_1) / (z_2 - z_1)} = \frac{(y - y_1) / (y_2 - y_1)}{= (z_2 - z_1)}; \quad (18)$$

в) в n -мерном арифметическом евклидовом пространстве $XYZ\dots$:

$$\frac{(x - x_1) / (x_2 - x_1)}{= (z - z_1) / (z_2 - z_1)} = \dots \quad (19)$$

В случае если $x_2 = x_1$ (или $y_2 = y_1$, или $z_2 = z_1$ и т. д.), один из знаменателей (17)–(19) равен нулю. Поскольку деление на ноль арифметического выражения невозможно, то в этом случае следует принять равным нулю соответствующий числитель формулы ($x - x_1 = 0$, или $y - y_1 = 0$, или $z - z_1 = 0$ и т. д.) [1].

В результате решения двумерной зависимости (17) получим общее уравнение прямой линии [1]:

$$A x + B y + C = 0$$

где A, B, C — числовые коэффициенты, $A \neq B \neq 0$ [1].

Для случая (17) кратчайшее (по нормали) расстояние (абсолютная величина) от точки с координатами (x_1, y_1) до прямой равновесного сочетания показателей (20) [1, 4]:

$$= |(A x_1 + B y_1 + C) / [A^2 + B^2]^{0.5}|. \quad (21)$$

Пространственное решение для определения расстояния от точки до прямой равновесного сочетания показателей хорошо известно и представлено, например (для трёхмерной системы координат), в [1].

Методика выбора рационального сочетания измеряемых однородных характеристик и показателей, используемых при принятии решений, проектировании и оценке эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин заключается в последовательном выполнении следующих шагов:

1. Устанавливаются однородные характеристики и показатели, играющие определяющую (наиболее важную, решающую) роль в процессе принятия решения или оценке эффективности процесса (технологии). Назовём их определяющими. Размерность значений характеристик и показателей должна быть либо одинаковой, либо отсутствовать.

2. Определяются числовые значения выбранных характеристик и показателей.

3. Значения характеристик и показателей принимаются в качестве геометрических координат точек, лежащих, в общем случае, в n -мерном (по числу значений) арифметическом евклидовом пространстве.

4. Устанавливаются (если имеются соответствующие данные) минимально и максимально возможные значения характеристик и показателей.

Данные о минимальных и максимальных значениях могут отсутствовать.

5. В случае различной относительной значимости конкретного показателя, вместо последнего следует рассматривать показатель с коэффициентом-множителем или в виде степенной зависимости (7).

6. В зависимости от числа характеристик и показателей и наличия точек минимальных или максимальных значений по (14) – (16) рассчитываются расстояния между парами точек: точкой минимума (максимума, началом координат) и точками, характеризующими промежуточные значения характеристик и показателей.

7. В качестве рационального (универсального по сочетанию определяющих однородных показателей и характеристик) принимается то сочетание значений показателей, характеризуемое положением промежуточной точки, лежащей в общем случае, в n -мерном арифметическом евклидовом пространстве, для которого (в соответствии с условиями задачи и наличием данных о максимальных и минимально возможных значениях) $d \rightarrow \max$ или $d \rightarrow \min$. Расстояния d при этом отсчитывается от точки сравнения (точки минимума, максимума, начала координат) до рассматриваемой промежуточной точки.

10. Если одновременно несколько промежуточных точек расположены на одинаковом минимальном d_{\min} (максимальном d_{\max}) расстоянии от точки сравнения, т. е. $d_{\min} = \text{idem}$ ($d_{\max} = \text{idem}$), то если это необходимо по условию решаемой задачи, выбирается одна из них. Для этого вначале по (17) – (20) определяется уравнение прямой равновесного сочетания параметров, а затем для этих точек рассчитывается кратчайшее (по нормали) расстояние до прямой равновесного сочетания параметров (для двумерного случая — по (21)). В этом случае в качестве рационального принимается то сочетание значений показателей, характеризуемое положением промежуточной точки, для которого $d \rightarrow \min$. Выбор точки, для которой соблюдается условие $d \rightarrow \min$, позволяет установить то сочетание характеристик и показателей, которое наиболее близко к равновесному.

Основным преимуществом рассмотренного формализованного представления методики выбора и принятия решения является возможность находить не только минимальные (d_{\min}) и максимальные (d_{\max}) расстояния, отсчитываемые, например, от начала координат, но и минимальные (максимальные) расстояния от данной точки до определённой точки сравнения, к которой следует приближаться. Однако при этом основным недостатком рассмотренного представления является возможность его применения исключительно для однородных (физических или нефизических), имеющих одинаковую размерность (или безразмерных)

характеристик и показателей. Действительно, если величины x_i, y_i, z_i, \dots в (10) — (16) будут неоднородными (например, имеющими различные размерности), то величина расстояния d будет зависеть от единиц измерения: «вес» данной координаты (определяемый числовым значением, её выражающим) по отношению к «весу» других координат будет переменным. Как следствие, переменным, зависящим от размерности, окажется и значение расстояния d .

Для сравнительной оценки комплексов (сочетаний) неоднородных характеристик и показателей необходимо иное формализованное представление методики. В этом случае формализованное представление методики должно быть инвариантно по отношению к единицам размерности и степени однородности (смыслового родства) характеристик и показателей.

II. Методика выбора рационального сочетания и сравнения неоднородных (физических и/или нефизических) характеристик и показателей, имеющих различную размерность (или безразмерных).

Как показано выше, инвариантно по отношению к размерностям определить расстояния между точками, отражающими сочетания неоднородных характеристик и показателей, невозможно: геометрический координатный метод расчёта, применённый выше, неприемлем. По этой причине понятие рационального выбора и принятия решения при анализе неоднородных величин будет иным.

В качестве рационального, универсального по сочетанию определяющих неоднородных показателей и характеристик, примем то их сочетание, в котором каждое из значений величин стремится к максимальному (минимальному). В этом случае рациональное сочетание неоднородных величин должно обладать следующим свойством: во сколько раз увеличится (уменьшится) значение каждого из определяющих показателей, во столько же раз возрастёт (снизится) значение условной величины, характеризующей весь анализируемый комплекс (сочетание). Таким арифметическим свойством обладает произведение определяющих величин:

$$= x_i \cdot y_i \cdot z_i \cdot \dots \quad (21)$$

Следовательно, формализованное представление методики примет вид:

$$= x_i \cdot y_i \cdot z_i \cdot \dots \cdot \max(\min). \quad (22)$$

Исходными постулатами, лежащими в основе формализованного представления (22) методики, примем следующие:

1. Характеристики и показатели, используемые при принятии решений, проектировании и оценке

эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин, являются измеряемыми, т. е. их значения можно представить в числовом виде.

2. Характеристики и показатели являются неоднородными (физическими и/или нефизическими) величинами, имеющими различную размерность или не имеющими размерности.

3. Если желаемому увеличению (уменьшению), т. е. желаемому тренду, одних значений характеристик и показателей (x_i, y_i, z_i, \dots) соответствует желаемое уменьшение (увеличение) других (i, i, a_i, \dots), то вместо последних принимаются обратные по отношению к ним величины ($1/i, 1/i, 1/a_i, \dots$).

В этом случае (22) примет вид:

$$= x_i \cdot y_i \cdot z_i \cdot (1/i) \cdot (1/i) \cdot (1/a_i) \cdot \dots \cdot \max(\min). \quad (23)$$

4. Характеристики и показатели не должны иметь значений, равных нулю ($x_i \neq 0, y_i \neq 0, z_i \neq 0, \dots$).

5. Рациональным (универсальным по сочетанию определяющих неоднородных показателей и характеристик) сочетанием характеристик и показателей обладает то, в котором каждое из значений величин стремится к максимальному (минимальному).

6. Характеристики и показатели могут рассматриваться как равновесные (т. е. имеющие одинаковую степень важности при принятии решений, проектировании и оценке эффективности), так и неравновесные, среди которых выделяются более и менее значимые.

7. Относительная значимость конкретного показателя (x_i, y_i, z_i, \dots) может учитываться либо величиной показателя степени ($x_i^a, y_i^b, z_i^c, \dots$), либо величиной коэффициента-множителя, стоящего перед показателем ($k_x \cdot x_i, k_y \cdot y_i, k_z \cdot z_i, \dots$) в виде (7).

Методика выбора рационального сочетания измеряемых неоднородных характеристик и показателей, используемых при принятии решений, проектировании и оценке эффективности производственных процессов и технологий бурения скважин заключается в последовательном выполнении следующих шагов:

1. Устанавливаются неоднородные определяющие характеристики и показатели, играющие наиболее важную (решающую) роль в процессе принятия решения или оценке эффективности процесса (технологии). Размерность значений характеристик и показателей может быть либо различной, либо отсутствовать.

2. Определяются числовые (не равные нулю) значения выбранных характеристик и показателей и желаемые направление их изменения (увеличение или уменьшение).

3. При несовпадении желаемых трендов характеристик и показателей, значения последних преобразуются к общему виду (23).

4. В случае различной относительной значимости конкретного показателя вместо последнего следует рассматривать показатель с коэффициентом-множителем или в виде степенной зависимости (7):

$$= x_i^a y_i^b z_i^c (1/i^e) (1/f_i) (1/\alpha_i^f) \dots = k_x x_i k_y y_i k_z z_i (1/(k_i)) (1/(k_i)) (1/(k_{\alpha} \alpha_i)) \dots = [(k_x k_y k_z \dots)/(k k k_{\alpha} \dots)] [(x_i y_i z_i \dots)/(i i \alpha_i \dots)] \max(\min), \quad (24)$$

где $e, f, j, k, k, k_{\alpha}$ — безразмерные числа, отражающие относительную значимость соответствующего показателя i, i, α_i ; $0 \leq e \leq 1, 0 \leq f \leq 1, 0 \leq j \leq 1, 0 \leq k \leq 1, 0 \leq k \leq 1, 0 \leq k_{\alpha} \leq 1$.

5. По формализованному представлению методики в форме (22), (23) или (24) рассчитывается максимальное (минимальное) значение условной величины, характеризующей весь анализируемый комплекс (сочетание) показателей. При этом самостоятельного смысла (физического, например) величина может не иметь: она лишь выполняет роль числовой характеристики комплекса свойств. По этой причине указывать возможную размерность значения необязательно.

6. Максимальное (минимальное) значение величины принимается соответствующим рациональному сочетанию характеристик и параметров.

Нетрудно увидеть, что полученная зависимость (23) является более общей по отношению к (1), а (24) — к (6). Следовательно, $(q_{1c})_{\text{общ}}$.

В целом формализованное представление методики (24) представляет собой обобщённое решение для сочетания неоднородных характеристик и показателей.

Рассмотрим некоторые наиболее характерные примеры использования разработанной методики.

Пример 1. Из 10 проектных траекторий геолого-разведочной скважины колонкового бурения (табл. 1), забои которых расположены на одинаковой глубине z , выбрать ту, расстояние между забоем которой и центром площади, в которую необходимо попасть скважине для выполнения геологического задания по отбору керновой пробы, было бы минимальным.

В соответствии с условиями можно принять, что характеристики проектной скважины (координаты забоя) являются однородными равновесными линейными величинами. Ответ будет заключаться в нахождении значения d_{\min} (табл. 2) по (12).

Результаты расчёта показывают, что $d_{\min} = 2,83$ м (проектная траектория скважины № 9). Для различных промежуточных точек совпадений минимальных значений d нет (табл. 2), т. е. $d_{\min} \text{ idem}$, необходимость расчёта значений отсутствует.

Т а б л и ц а 1

Координаты забоя проектной скважины

Номер проектной траектории скважины	Координаты забоя проектной траектории скважины			Координаты центра площади допустимого попадания забоя скважины		
	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$x_{\text{ц}}, \text{ м}$	$y_{\text{ц}}, \text{ м}$	$z_{\text{ц}}, \text{ м}$
1	2	10	1200	7	12	1200
2	13	6	1200			
3	6	20	1200			
4	12	11	1200			
5	7	1	1200			
6	15	4	1200			
7	9	8	1200			
8	11	8	1200			
9	5	10	1200			
10	13	6	1200			

Т а б л и ц а 2

Рассчитанные значения расстояний d между промежуточными точками (x_i, y_i, z_i) и точкой центра площади $(x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}, z_{\text{ц}})$

Номер проектной траектории скважины	Координаты забоя проектной траектории скважины			Координаты центра площади допустимого попадания забоя скважины			Расстояние между промежуточными точками и точкой центра площади $d, \text{ м}$
	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$z_i, \text{ м}$	$x_{\text{ц}}, \text{ м}$	$y_{\text{ц}}, \text{ м}$	$z_{\text{ц}}, \text{ м}$	
1	2	10	1200	7	12	1200	5,39
2	13	6	1200				8,49
3	6	20	1200				8,06
4	12	11	1200				5,10
5	7	1	1200				11,00
6	15	4	1200				11,31
7	9	8	1200				4,47
8	11	8	1200				5,66
9	5	10	1200				2,83
10	13	6	1200				8,49

Пример 2. Для пневмо- и гидроударного бурения скважин в твёрдых трещиноватых и раздробленных горных породах в качестве материала для изготовления вооружения породоразрушающего инструмента (бурового долота, буровой коронки) необходимо подобрать марки вольфрамокобальтовых твёрдых сплавов (ВК), одновременно стойкие к ударным нагрузкам (характерным для пневмо- и гидроударного бурения, разрушения трещиноватых и раздробленных пород) и истиранию (проявляется при внедрении в твёрдые породы).

Стойкость к ударным нагрузкам характеризуется значением предела прочности при изгибе ($\sigma_{из}$, МПа), а способность внедряться в твёрдые горные породы и сопротивляться истиранию — значением твёрдости по шкале Роквелла (HRA), представленными в табл. 3.

Степень влияния показателей $\sigma_{из}$ и HRA на эффективность разрушения горных пород примем одинаковой, а сами значения $\sigma_{из}$ и HRA — равновесными. Поскольку показатели $\sigma_{из}$ и HRA являются неоднородными, то воспользуемся решением (22). Чем выше значения $\sigma_{из}$ и HRA, тем более марка твёрдого сплава отвечает заданным условиям эксплуатации вооружения породоразрушающего инструмента. Следовательно, ответ будет заключаться в нахождении значения $\sigma_{из}$ max (табл. 4).

В соответствии с рассчитанными значениями условной величины $\sigma_{из}$ (табл. 4), для бурения скважин в твёрдых трещиноватых и раздробленных горных породах в качестве материала для изготовления вооружения породоразрушающего инструмента более других подходят (в порядке убывания сочетания механических свойств, определяемом уменьшением значения величины $\sigma_{из}$) твёрдые спла-

вы марок ВК20, ВК20-КС, ВК11-В, ВК11-ВК, ВК15, ВК10-КС и ВК8-В, обладающие наряду со значительной стойкостью к ударным нагрузкам высокой твёрдостью.

Пример 3 [8–11]. На нефтегазовом месторождении роторным способом пробурена скважина глубиной 2400 м. Стоимость строительства скважины составила 122,4 млн. руб., время строительства скважины — 6 мес. (180 сут.). В тех же геологических условиях, с тем же качеством при бурении гидравлическим забойным двигателем (ГЗД) пройдена скважина глубиной 2250 м стоимостью 142,8 млн. руб. за время 4,5 мес. (135 суток). Какой из способов строительства был более предпочтительным?

Степень влияния показателей стоимости и времени строительства 1 м скважины примем одинаковой, а сами значения стоимости и времени — равновесными. Поскольку показатели стоимости и времени строительства являются неоднородными, то воспользуемся решением (21). Чем меньше значения стоимости и времени, тем эффективным процесс строительства. Следовательно, ответ будет заключаться в нахождении значения $\sigma_{из}$ min (22).

Несложные расчёты по формуле (21) позволяют определить значение величины $\sigma_{из}$ для первой и второй скважины соответственно:

$$\sigma_{из1} = (122,4 \cdot 10^6 / 2400) \cdot (180 / 2400) = 3825;$$

$$\sigma_{из2} = (142,8 \cdot 10^6 / 2250) \cdot (135 / 2250) = 3808.$$

Таким образом, предпочтение следует отдать второму (с применением ГЗД) способу строительства скважины: $\sigma_{из2} < \sigma_{из1}$.

Пример 4 [6]. На месторождении полиметаллов буровым снарядом с одинарным колонковым набором пробурена геолого-разведочная скважина

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства вольфрамокобальтовых твёрдых сплавов для режущих инструментов [3]

Номер п/п	Марка твёрдого сплава	Физико-механические свойства	
		Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$, МПа	Твёрдость по шкале Роквелла HRA
		не менее	
1	ВК3	1176	89,5
2	ВК6	1519	88,5
3	ВК3-М	1176	91,0
4	ВК6-М	1421	90,0
5	ВК6-ОМ	1274	90,5
6	ВК6-В	1666	87,5
7	ВК8	1666	88,0
8	ВК8-В	1813	86,5
9	ВК8-ВК	1764	87,5
10	ВК10	1764	87,0
11	ВК10-ХОМ	1470	89,0
12	ВК4-В	1470	88,0
13	ВК11-В	1960	86,0
14	ВК10-КС	1862	85,0
15	ВК20	2058	84,0
16	ВК11-ВК	1862	87,0
17	ВК15	1862	86,0
18	ВК20-КС	2107	82,0

Рассчитанные значения условной величины σ_{i, HRA_i} , характеризующей сочетание показателей (σ_i и HRA_i)

Номер п/п	Марка твёрдого сплава	Физико-механические свойства		Значение условной величины σ_{i, HRA_i} , характеризующей сочетание показателей
		Предел прочности при изгибе σ_i , МПа	Твёрдость по шкале Роквелла HRA_i	
		не менее		
1	ВК3	1176	89,5	105252,0
2	ВК6	1519	88,5	134431,5
3	ВК3-М	1176	91,0	107016,0
4	ВК6-М	1421	90,0	127890,0
5	ВК6-ОМ	1274	90,5	115297,0
6	ВК6-В	1666	87,5	145775,0
7	ВК8	1666	88,0	146608,0
8	ВК8-В	1813	86,5	156824,5
9	ВК8-ВК	1764	87,5	154350,0
10	ВК10	1764	87,0	153468,0
11	ВК10-ХОМ	1470	89,0	130830,0
12	ВК4-В	1470	88,0	129360,0
13	ВК11-В	1960	86,0	168560,0
14	ВК10-КС	1862	85,0	158270,0
15	ВК20	2058	84,0	172872,0
16	ВК11-ВК	1862	87,0	161994,0
17	ВК15	1862	86,0	160132,0
18	ВК20-КС	2107	82,0	172774,0

глубиной 2400 м. Качество полученной геологической информации достаточное. Стоимость скважины составила 6 млн. руб., время бурения скважины — 6 мес. (180 сут.). В тех же геологических условиях, с тем же качеством комплексом КССК-76 пробурена скважина глубиной 2230 м стоимостью 6,5 млн. руб. за 4,5 мес. (135 сут.). Значимость стоимости характеризуется значением показателя степени $a = 1$, а времени — $b = 0,8$. Какой из способов бурения был более эффективным?

Показатели стоимости и времени — неоднородные и неравномерные. Воспользуемся решением (24): \min . В результате расчётов получим для первой и второй скважины соответственно:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (6 \cdot 10^6 / 2400) 1 \cdot (180 / 400)^{0,8} = 314,77; \\ \sigma_2 &= (6,5 \cdot 10^6 / 2230) 1 \cdot (135 / 2230)^{0,8} = 309,19. \end{aligned}$$

Следовательно, второй способ бурения был более эффективным: $\sigma_2 < \sigma_1$.

Выводы

1. Рассмотренная методика выбора рационального сочетания характеристик и показателей позволяет сравнивать между собой комплексы свойств объектов исследования и осуществлять аргументированный выбор и оценку последних.

2. Методика выбора рационального сочетания и сравнения значений величин обладает высокой общностью и может использоваться для обоснования выбора, принятия решений и оценки эффективности в областях деятельности, не связанных с бурением скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. В г о д с к и й М.Я. Справочник по высшей математике. 13-е изд., стер. М.: Физматлит, 1995. 872 с.
2. Г а н д ж у м я н Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении: Справочное пособие. М.: Недра, 1990. 218 с.
3. ГОСТ 3882-74 (ИСО 513 - 5). Сплавы твёрдые спечённые. Марки. Межгосударственный стандарт. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008. 9 с.
4. Г у с а к А.А., Г у с а к Г.М. Справочник по высшей математике. Минск: Наука і техника, 1991. 480 с.
5. К у л и к о в В.В., Т у н г у с о в А.А., Т у н г у с о в С.А. Оценка энергопроводных свойств колонн бурильных труб по величине коэффициента полезного действия // Разведка и охрана недр. 2012. № 12. С. 39 - 42.
6. К у л и к о в В.В., Ф р о л о в а М.С. Оценка эффективности технологий бурения геолого-разведочных и геотехнологических скважин // Известия вузов. Геология и разведка. 2016. № 2. С. 89 - 90.
7. Р е б р и к Б.М., К у л и к о в В.В. Критерий оценки эффективности буровых технологий // X Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Доклады. В 3-х томах. М.: Экстра-Принт, 2011. Том 2. С. 309 - 310.
8. Р е б р и к Б.М., К у л и к о в В.В. Обобщённый критерий сравнительной оценки эффективности применяемых буровых технологий // Наукові праці Донецького національного технічного університету (ДонНТУ). Серія «Гирнично-геологічна» / Редкол.: Башков Є.О. (голова) та інші. - Випуск 14 (181). - Республіка Україна. Донецьк: Державний вищий навчальний заклад (ДВНЗ) «Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)», 2011. С. 226 - 230.
9. Р е б р и к Б.М., К у л и к о в В.В. Сравнительная оценка эффективности технологий строительства нефтяных и газовых скважин по конечным результатам работы // Инженер-нефтяник. 2010. № 4. С. 19 - 23.
10. Р е б р и к Б.М., К у л и к о в В.В. Сравнительная оценка эффективности технологий бурения скважин на твёрдые полезные ископаемые по конечным результатам работы // Известия вузов. Геология и разведка. 2011. № 3. С. 83 - 87.
11. Р е б р и к Б.М., К у л и к о в В.В. Сравнительная оценка эффективности технологий строительства газовых скважин // Научный журнал Российского газового общества. 2014. № 1. С. 107 - 112.