

**Оригинальная статья / Original article**

УДК 622.243.24

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-502-510>**Моделирование неструктурированных задач в бурении**© А.И. Ламбин^а^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Применение информационно-аналитических технологий при решении сложных проблем является одним из основных этапов проектирования информационной системы изучаемого явления. Это значит, что вначале производится структуризация целей системы, когда необходимо объективно и системно оценить параметры различной природы. Одним из методов принятия решений при исследовании многокритериальных задач является метод анализа иерархий, предложенный американским ученым Т. Саати. Метод анализа иерархий, по словам самого Саати, «является замкнутой логической конструкцией, обеспечивающей с помощью простых правил анализ сложных проблем во всем их разнообразии и приводящей к наилучшему ответу». В методе осуществляется декомпозиция задачи на простые части, производится опрос экспертов, суждения которых математически обрабатываются. В настоящей статье иллюстрируются возможности метода анализа иерархий при рассмотрении проблемы транспорта разрушенной породы (шлама) по стволу бурящейся наклонно-направленной скважины с большим отклонением от вертикали. Моделирование проблемы осуществляется в виде иерархии, которая считается полной при функционировании каждого элемента заданного уровня как критерия для элементов нижестоящего уровня. Относительная важность критериев определяется при помощи матрицы парных сравнений, которая позволяет оценить истинный вес элементов и установить степень их важности. В результате определен собственный вектор матрицы парных сравнений, который выделяет порядок важности сравниваемых объектов в количественном выражении. Выделено максимальное собственное значение матрицы, приблизительно равное порядку матрицы, что (исходя из требований) оценивает матрицу как однородную. Приведенный алгоритм применения метода анализа иерархий позволяет оценить весовые коэффициенты влияющих факторов и обобщенные характеристики вариантов применительно к задачам выноса продуктов разрушения при бурении наклонно-направленных скважин.

Ключевые слова: скважина, транспорт шлама, факторы, приоритеты

Информация о статье: Дата поступления 17 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 14 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2019 г.

Для цитирования: Ламбин А.И. Моделирование неструктурированных задач в бурении. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 502–510. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-502-510>

Modelling of unstructured problems in well drilling© Anatoly I. Lambin^а^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The use of information analysis procedures in solving complex problems is one of the main stages in the design of the information system for a studied phenomenon. It means that for the systematic evaluation of the parameters of different nature, the system's objectives are structured. One of the decision-making methods in the study of multi-criteria problems is the hierarchy analysis proposed by the American scientist T. Saaty. According to Saaty, the method "is a closed logical construction that, by using simple rules, ensures analysis of complex problems in all their diversity and leads to the best solution." The method consists in decomposing the problem into simpler parts with further expert evaluations of the components and mathematical processing of the expert judgments. This article illustrates the capability of the hierarchy analysis in considering the problem of the cuttings transport along the borehole of a controlled directional well with a large deflection of the vertical. The problem is modeled as a hierarchy that is considered complete when each element of a specified level works as a criterion for the elements of a lower level. The relative importance of the criteria is defined using a paired comparison matrix that allows us to estimate the true weight of each element and determine the degree of its importance. The modelling has defined the matrix eigenvector that indicates the importance order of the compared objects in quantitative terms. The maximum eigenvalue of the matrix approximately equals to the matrix order, which (based on the requirements) allows us to classify the matrix as homogeneous. The given algorithm of the hierarchy analysis application allows us to estimate the weights of the influencing factors and the generalized characteristics of the variants for the problems of cuttings removal when drilling directional wells.



Keywords: borehole, cuttings removal, factors, priorities

Information about the article: Received September 17, 2019; accepted for publication November 14, 2019; available online December 30, 2019.

For citation: Lambin AI. Modelling of unstructured problems in well drilling. *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):502–510. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-502-510>

Введение

Эффективность бурения скважин во многом определяет оптимизация циклов строительства скважины и процессов, их составляющих. Процесс углубления скважин и их проходка во все более сложных условиях обуславливает возникновение новых или частично решенных задач, затрудняющих управление строительством скважины и требующих своевременного и правильного принятия решений [1].

Методологической основой оптимизации в настоящее время является системно-аналитический подход, позволяющий более точно исследовать структуру и механизм функционирования объекта или процесса [2].

Исследование осуществляется через моделирование, которое требует сначала выявить значимые факторы. Значимость конкретных факторов определяется их весом по сравнению с другими. Исследователь при большом количестве вводимых факторов пытается сократить их путем составления из них безразмерных чисел и критериев. Упрощением указанной процедуры является ранжирование факторов путем установления их значимости через весовые коэффициенты.

Само принятие решения является многоуровневой процедурой, состоящей из множества операций: планирования, генерирования альтернатив, установления приоритетов и т. п. [3]. Это дает возможность использовать системный подход к принятию решения. Системный подход к принятию решений предполагает рассмотрение принятия в качестве системы с ее структурой и функциями, таким образом, выстраивается иерархическая структура системы, позволяющая разработать измерительную шкалу для определения численных значений уровней самой структуры.

При анализе структуры число элементов и их взаимосвязей может быть большим, что затрудняет восприятие информации в полном объеме. В таких случаях система делится на подсистемы [4], то есть строится иерархическая система для более детального анализа объекта. В простейшем случае находится система факторов, определяющих существование подсистемы. При этом возникает задача ранжирования факторов, характеризующих количественную сторону изучаемого объекта. Большое внимание этому вопросу уделил Р.М. Эйгелес [5] при математическом моделировании работы долота на забое скважины.

В рамках системного анализа установление приоритетов при решении сложной задачи является поэтапным процессом. Американским ученым Т. Сати [4] предложен метод анализа иерархий (МАИ) [6], позволяющий математически обоснованно принимать решения при исследовании сложных ситуаций. В литературе существует так называемый метод парных сравнений, отличающийся от МАИ шкалированием значений ранжируемых факторов.

Целью данного исследования является использование возможностей МАИ применительно к определению весовых значений факторов, влияющих на процессы сооружения скважины. Для этого рассмотрим сущность МАИ.

Методы исследования

Метод предусматривает декомпозицию проблемы на элементы с взаимозависимостью между ними, то есть построение иерархии для определения вкладов нижележащих уровней в вышележащие. В нижележащих уровнях элементы попарно сравниваются для определения интенсивности элементов в иерархии, при этом интенсивность выражается численно. Для парных сравнений



вырабатывается числовая шкала, которая служит для преобразования суждений лица, принимающего решение (ЛПР), в числовые значения. Преобразованные суждения оформляются в форме числовой квадратной матрицы, называемой матрицей парных сравнений, к которой предъявляются требования транзитивности и обратной симметричности.

Пусть A_1, \dots, A_n – элементы некоторого уровня иерархии, а w_1, \dots, w_n – вес (интенсивность) этих элементов, который необходимо установить. На основе субъективных суждений ЛПР формируется матрица парных сравнений (рис. 1). При этом субъективные суждения численно оцениваются самим ЛПР по определенной шкале.

	A_1	A_2	...	A_n
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
A_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nn}

Рис. 1. Общий вид матрицы парных сравнений
Fig. 1. General view of the paired-comparison matrix

Требование обратной симметричности матрицы парных сравнений выражается в виде $a_{ij} = 1/a_{ji}$; $i = 1, n$; $j = 1, n$.

Шкала относительной важности элементов в выделенной иерархии, предложенная Т. Саати, представляет собой цифровые значения коэффициентов от одного до девяти, определяющие приоритетность или превосходство одного суждения над другим.

В общем случае шкала может иметь другие численные оценки ситуаций.

Заполненная матрица парных сравнений является основой для определения приоритетов (веса) w_1, \dots, w_n элементов выделенной или обозначенной иерархической системы [5].

Рассмотрим простейший пример применения МАИ в случае определения весовых коэффициентов свойств промывочной жидкости, влияющих на механическую скорость бурения. Иерархическую систему данного примера можно представить как функцию механической скорости от параметров бурового раствора: плотности, вязкости и содержания в нем песка.

Пусть эксперты, рассматривающие эту зависимость, сформировали матрицу парных сравнений (табл. 1). Здесь шкала относительной важности несколько отличается от приведенной выше. Верхний предел ее равен семи.

Для ранжирования факторов вычислим суммарную относительную оценку каждого фактора, определим их сумму и по этой сумме произведем нормировку каждого фактора. Указанные действия представлены в табл. 2.

На практике матрицы парных сравнений не являются согласованными. Поэтому, прежде чем пользоваться результатом ранжирования, необходимо проверить степень согласованности суждений эксперта, которая определяется индексом согласованности ИС [7]:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

где λ_{\max} – максимальное собственное число матрицы парных сравнений; n – размерность квадратной матрицы.

Таблица 1

Представление матрицы парных сравнений

Table 1

Representation of the paired-comparison matrix

Оценка параметров бурового раствора	Плотность бурового раствора	Вязкость раствора	Содержание песка
Плотность бурового раствора	1	5	7
Вязкость раствора	1/5	1	4
Содержание песка	1/7	1/4	1



Таблица 2

Ранжирование факторов

Table 2

Factor ranking

Оценка параметров бурового раствора	Плотность бурового раствора	Вязкость раствора	Содержание песка	Среднегеометрическое $\sqrt[3]{\prod a_{ij}}$	Нормированный относительный вес
Плотность бурового раствора	1	4	6	2,884	0,681
Плотность бурового раствора	1/4	1	4	1	0,236
Содержание песка	1/6	1/4	1	0,348	0,083
Итого	–	–	–	4,232	1

Для матрицы 3×3 характеристическое уравнение является полиномом третьей степени [8], что позволяет определить λ_{max} аналитически [9]:

$$\lambda_{max} = 1 + \sqrt[3]{a_{12}a_{23}a_{31}} + \sqrt[3]{a_{13}a_{21}a_{32}};$$

$$\lambda_{max} = 1 + \sqrt[3]{4 \cdot 4 \cdot 0,167} + \sqrt[3]{6 \cdot 0,25 \cdot 0,25} = 3,067;$$

$$IC = \frac{3,067 - 3}{3 - 1} = 0,034.$$

a_{12} , a_{23} , a_{31} здесь – элементы матрицы (см. табл. 2).

Индекс согласованности IC зависит от количества парных сравнений. Чем меньше противоречий в сравнениях, тем меньше значение индекса согласованности. На рассогласование влияет отсутствие более детальных градаций [5]. Для более точного определения согласованности вводят отношение согласованности OC [7]:

$$OC = \frac{IC}{IC_r},$$

где IC_r – случайный индекс согласованности, полученный при усреднении множества данных матриц парных сравнений различной размерности при случайном равновероятном выборе количественных значений суждений из шкалы (табл. 3) [5].

$$OC = \frac{0,034}{0,58} = 0,059.$$

Отношение согласованности должно быть менее 0,1 для малого количества параметров n и 0,2 при их большем количестве.

В нашем случае это требование выполняется.

При бурении наклонно-направленных скважин стоит проблема транспорта разрушенной породы по скважине на дневную поверхность [10]. Этой теме посвящено множество исследований в виде диссертаций и статей, где рассматриваются влияющие факторы на вынос разрушенной породы из скважины, но в этих

Таблица 3

Среднее значение случайного индекса согласованности

Table 3

Mean value of the random index of consistency

Размер матрицы n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Случайная согласованность	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48



работах не ставится вопрос ранжирования рассматриваемых факторов. При построении моделей выноса выбуренной породы необходимо выявить значимые факторы. Значимость факторов определяется их весом. Большое количество факторов требует сокращения их через составления из них безразмерных чисел и критериев, однако проще проранжировать факторы путем определения их значимости через весовые оценки. В данной статье сделана попытка распределения факторов, влияющих на транспорт шлама, по их значимости, используя методику МАИ.

При бурении наклонно-направленных скважин с большим отклонением от вертикали выделяют несколько факторов, определяющих степень чистоты скважины (или концентрации шлама) в процессе ее углубления. К таким факторам относят объемный расход циркулирующей жидкости, ее реологическую характеристику, угол наклона скважины, плотность жидкости, тип жидкости, диаметр ствола скважины, частоту вращения бурильной колонны, эксцентриситет, механическую скорость, размер шлама [11].

При математическом моделировании потерь давления и накопления шлама в эксцентричном канале путем использования программных продуктов

высокого уровня применяют те же факторы [12].

Другие авторы предлагают комплекс влияющих факторов разделить на группы [13].

К группе I относят такие факторы, как плотность шлама, форма и размер частиц шлама, концентрация шлама; ко II группе – вязкость, плотность и расход циркулирующей жидкости; к III группе – наклон скважины, частота вращения бурильных труб, размер кольцевого пространства в скважине, эксцентриситет.

В одном из отчетов фирмы Schlumberger по проблеме транспорта шлама в группу влияющих факторов включены диаметр скважины, радиус бурильной колонны, ее частота вращения, скорость потока жидкости, ее плотность и эффективная вязкость, радиус частицы шлама, ее плотность и масса. Такой разброс в множестве влияющих факторов, включаемых в рассмотрение, свидетельствует об отсутствии их ранжирования по отношению к концентрации шлама в скважине в процессе ее углубления.

Рассмотрим алгоритм оценивания влияющих факторов по их значимости в процессе транспорта шлама. Влияющие факторы и иерархическая схема проблемы транспорта приведены на рис. 3.

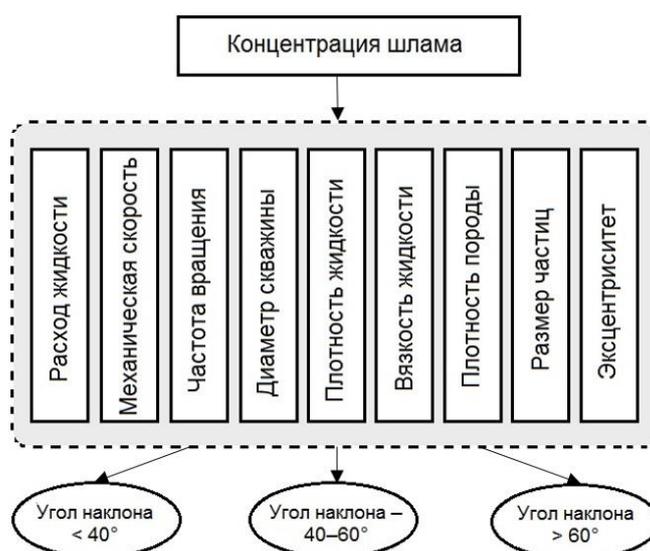


Рис. 3. Иерархия проблемы оценивания влияющих факторов
Fig. 3. Hierarchy of the influencing factors evaluation problem



Представленная на рис. 4 матрица парных сравнений составлена на основе анализа опубликованных по проблеме транспорта шлама журнальных источников и может в дальнейшем совершенствоваться. Для упрощения изображения матрицы влияющие факторы, выделенные на рис. 3, обозначены слева направо и сверху вниз через K_i .

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9
K_1	1	3	4	4	5	5	7	8	9
K_2	$\frac{1}{3}$	1	2	3	4	5	5	7	8
K_3	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6	7
K_4	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6
K_5	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	5	4	6
K_6	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4
K_7	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3
K_8	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2
K_9	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1

Рис. 4. Вид матрицы парных сравнений
Fig. 4. Paired-comparison matrix

Алгоритм вычисления, показанный в вышерасположенном примере, осуществлялся в среде MathCAD [14] и представлен на рис. 5.

$$B := \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 4 & 5 & 5 & 7 & 8 & 9 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 5 & 7 & 8 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 5 & 4 & 6 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$C := \text{eigenvals}(B) = \begin{bmatrix} 9.573 \\ 0.123 + 2.232i \\ 0.123 - 2.232i \\ -0.064 + 0.106i \\ -0.064 - 0.106i \\ -0.115 + 0.186i \\ -0.115 - 0.186i \\ -0.231 + 0.614i \\ -0.231 - 0.614i \end{bmatrix}$$

$$\text{eigenvec}(B, C_0) = \begin{bmatrix} 0.751 \\ 0.463 \\ 0.333 \\ 0.235 \\ 0.18 \\ 0.112 \\ 0.075 \\ 0.054 \\ 0.039 \end{bmatrix}$$

$$P := \text{eigenvec}(B, C_0) \quad S := \sum P \quad S = 2.243$$

$$\frac{C_0 - 9}{8} = 0.072 \quad OS := \frac{IC}{1.45} = 0.049$$

$$\frac{P}{S} = \begin{bmatrix} 0.335 \\ 0.207 \\ 0.148 \\ 0.105 \\ 0.08 \\ 0.05 \\ 0.033 \\ 0.024 \\ 0.018 \end{bmatrix}$$

Рис. 5. Алгоритм вычисления весовых значений факторов в MathCAD
Fig. 5. Algorithm of calculating the factor weights in MathCAD

Вектор приоритетов P/S отражает значимость влияющих факторов, выраженную численно в значениях коэффициента веса [15]. Судя по этому вектору, самым влияющим фактором является расход жидкости с весовым коэффициентом, равным 0,335. Порядок факторов в векторе приоритетов тот же, что и в матрице парных сравнений.

Для определения пригодности вариантов по каждому критерию проведем их попарное сравнение. Обозначим через B_1 значение угла наклона скважины $< 40^\circ$, $B_2 - 40-60^\circ$ и $B_3 - > 60^\circ$

Результаты исследования

Результаты исследования представлены в табл. 4.

Подсчитаем значение общего критерия для каждого варианта [16] путем умножения значения, к примеру, первого компонента вектора приоритетов из табл. 4 на значение приоритета первого критерия столбца P/S (см. рис. 5), и суммирования произведений, то есть

$$0,117 \cdot 0,335 + 0,229 \cdot 0,207 + \dots + 0,08 \cdot 0,018 = 0,142.$$

Со вторым компонентом поступаем так же, то есть

$$0,268 \cdot 0,335 + 0,258 \cdot 0,207 + \dots + 0,311 \cdot 0,018 = 0,48.$$



Таблица 4

Сравнение пригодности вариантов по критериям

Table 4

Criteria-based comparison of the variants suitability

K_1	B_1	B_2	B_3	НВП (значение критерия K_1 для вариантов)	K_2	B_1	B_2	B_3	НВП (значение критерия K_2 для вариантов) и т. д.
B_1	1	1/4	1/3	0,117	B_1	1	1/5	1/3	0,105
B_2	4	1	3	0,614	B_2	5	1	3	0,637
B_3	3	1/3	1	0,268	B_3	3	1/3	1	0,258
–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,074$ $ИС_1 = 0,037$ $ОС_1 = 0,063$	–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,039$ $ИС_2 = 0,019$ $ОС_2 = 0,033$
K_3	B_1	B_2	B_3	НВП	K_4	B_1	B_2	B_3	НВП
B_1	1	1/3	1/5	0,101	B_1	1	1/3	1/4	0,122
B_2	3	1	1/4	0,226	B_2	3	1	1/2	0,320
B_3	5	4	1	0,674	B_3	4	2	1	0,558
–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,086$ $ИС_3 = 0,043$ $ОС_3 = 0,074$	–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,018$ $ИС_4 = 0,009$ $ОС_4 = 0,016$
K_5	B_1	B_2	B_3	–	K_6	B_1	B_2	B_3	–
B_1	1	1/2	1/3	0,157	B_1	1	1/2	1/4	–
B_2	2	1	1/3	0,249	B_2	2	1	1/3	–
B_3	3	3	1	0,594	B_3	4	3	1	–
–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,054$ $ИС_5 = 0,027$ $ОС_5 = 0,046$	–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,018$ $ИС_6 = 0,009$ $ОС_6 = 0,016$
K_7	B_1	B_2	B_3	–	K_8	B_1	B_2	B_3	–
B_1	1	1/3	1/3	0,140	B_1	1	1/5	1/4	0,094
B_2	3	1	2	0,528	B_2	5	1	3	0,627
B_3	3	1/2	1	0,333	B_3	4	1/3	1	0,280
–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,054$ $ИС_7 = 0,027$ $ОС_7 = 0,046$	–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,086$ $ИС_8 = 0,043$ $ОС_8 = 0,074$
K_9	B_1	B_2	B_3	–	–	–	–	–	–
B_1	1	1/5	1/6	0,08	–	–	–	–	–
B_2	5	1	3	0,609	–	–	–	–	–
B_3	6	1/3	1	0,311	–	–	–	–	–
–	–	–	–	$\lambda_{max} = 3,185$ $ИС_9 = 0,093$ $ОС_9 = 0,16$	–	–	–	–	–

Примечание. НВП – нормализованный вектор приоритетов; B_1 – вариант 1 (угол наклона < 40°), B_2 – вариант 2 (угол наклона – 40°– 60°), B_3 – вариант 3 (угол наклона > 60°); K_n – критерий, n – номер критерия.

Note. НВП – normalized priority vector; B_1 – variant 1 (drift angle < 40°), B_2 – variant 2 (drift angle 40°– 60°), B_3 – variant 3 (drift angle > 60°); K_n – criterion, n – criterion number.

Третий компонент вектора приоритетов при проведении той же процедуры получил значение общего критерия, равное 0,404.

Заключение

Таким образом, наибольшее значение имеет второй вариант, когда угол наклона скважины находится в интер-



вале от 40 до 60°. По мнению многих исследователей этот интервал опасен тем, что при углублении скважины шлам скальзывает вниз по лежачей стенке, вы-

зывая прихваты бурильной колонны. Поэтому для ЛПР значение обобщенного критерия является сигналом для более детального решения проблемы.

Библиографический список

1. Мирзаджанзаде А.Х., Ширинзаде С.А. Повышение эффективности и качества бурения глубоких скважин. М.: Недра, 1986. 278 с.
2. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2001. № 3. С. 150–154.
3. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
4. Микони С.В. Теория и практика рационального выбора: монография. М.: Маршрут, 2004. 462 с.
5. Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин. М.: Недра, 1977. 200 с.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер с англ. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
7. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
8. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 238 с.
9. Nickalls R.W.D. Viète, Descartes and the cubic equation // *Mathematical Gazette*. 2006. Vol. 90. No. 518 (July). P. 203–208.
10. Крылов В.И., Крецул В.В. Особенности технологии промывки горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. 2001. № 6. С. 36–40.
11. Shiddiq A.M.I., Christianoro B., Syafril I., Abdurrokhim A., Marbun B., Wattimury P., et al. A comprehensive comparison study of empirical cutting transport models in inclined and horizontal wells // *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2017. Vol. 49. № 2. P. 275–289.
12. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. Modelling of pressure drop and cutting concentration in eccentric narrow horizontal wellbore with rotating drillpipe // *Jornal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 14. No. 23. P. 3263–3269.
13. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells // *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2013. Vol. 6. P. 9–17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>
14. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 14. СПб.: Питер, 2007. 592 с.
15. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк: Изд-во ЛЭГИ, 2001. 138 с.
16. Brown T.C., Peterson G.L. An enquiry into the method of paired comparison: reliability, scaling, and Thurstone's law of comparative judgment. 2009. Gen Tech. Rep. RMRS-GTR-216WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 98 p.

References

1. Mirzadzhanzade AKh, Shirinzade SA. *Improving the efficiency and quality of deep-well drilling*. Moscow: Nedra; 1986. 278 p. (In Russ.)
2. Rotshtein AP, Shtovba SD. Fuzzy multi-criteria analysis of variants using paired comparison. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2001;3:150–154. (In Russ.)
3. Saaty TL, Kearns KP. *Analytical planning: The organization of system*. Moscow: Radio i svyaz'; 1991. 224 p. (In Russ.)
4. Mikoni SV. *The theory and practice of rational choice*. Moscow: Marshrut; 2004. 462 p. (In Russ.)
5. Eigeles RM, Strekalova RV. *Calculation and optimization of well drilling processes*. Moscow: Nedra; 1977. 200 p. (In Russ.)
6. Saati T. *Decision making. Hierarchy analysis method*. Moscow: Radio i svyaz'; 1993. 320 p. (In Russ.)
7. Kini RL, Raifa Kh. *Decision making under many criteria: preferences and substitutions*. Moscow: Radio i svyaz', 1981. 560 p. (In Russ.)
8. Shup T. *Computer-aided problem solving in engineering: practical guide*. Moscow: Mir; 1982. 238 p. (In Russ.)
9. Nickalls RWD. Viète, Descartes and the cubic equation. *Mathematical Gazette*. 2006;90(518):203–208.
10. Krylov VI, Kretsul VV. Specifics of the technology for horizontal wells flushing. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2001;6:36–40. (In Russ.)
11. Shiddiq AMI, Christianoro B, Syafril I, Abdurrokhim A, Marbun B, Wattimury P, et al. A comprehensive comparison study of empirical cutting transport models in inclined and horizontal wells. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2017;49(2):275–289.
12. Ofei TN, Irawan S, Pao W. Modelling of pressure drop and cutting concentration in eccentric



narrow horizontal wellbore with rotating drillpipe. *Journal of Applied Sciences*. 2014;14(23):3263–3269.

13. Wang K, Yan T, Sun X, Shao S, Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2013;6:9–17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>

14. Makarov EG. *Engineering calculations in Mathcad 14*. Saint Petersburg: Piter; 2007. 592 p. (In Russ.)

15. Blyumin SL, Shuikova IA. *Models and methods of decision-making in uncertainty conditions*. Lipetsk: Lipetsk Ecological-and-humanitarian Institute; 2001. 138 p. (In Russ.)

16. Brown T.C., Peterson G.L. An enquiry into the method of paired comparison: reliability, scaling, and Thurstone's law of comparative judgment. 2009. Gen Tech. Rep. RMRS-GTR-216WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 98 p.

Критерии авторства / Authorship criteria

Ламбин А.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Anatoly I. Lambin is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторе / Information about the author



Ламбин Анатолий Иванович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: alambin@ex.istu.edu

Anatoly I. Lambin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: alambin@ex.istu.edu