

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА И ВЫБОРА ПОДХОДЯЩЕГО ВИДА ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ

Фетарони Малак

Аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва
malakfie2@gmail.com

HIERARCHICAL ANALYSIS METHOD FOR ASSESSING THE EFFICIENCY AND RISKS OF DIFFERENT TYPES OF HYDRAULIC FRACTURING AND SELECTING THE APPROPRIATE TYPE FOR IMPLEMENTATION

Fetaroni Malak

Summary. This article explores the evaluation and ranking of multi-criteria alternatives using the Analysis Hierarchy Process (AHP) method in the context of evaluating and selecting the appropriate hydraulic fracturing method during the planning phase, based on efficiency and risk. The article demonstrates that the solution in this case involves applying the AHP method to prioritize the criteria (efficiency and risk indicators) and determine the optimal and consistent ranking of different hydraulic fracturing methods. Furthermore, this paper discusses this method in sufficient detail, illustrating its various stages numerically, thus making this study a guide for applying the methodology to other multi-criteria decision-making problems. To facilitate calculations and matrix creation, the study was computer-generated using Microsoft Excel.

Keywords: ranking, analytical Hierarchy Process (AHP), decision making, multi-criteria assessment, assessment criteria, quality (risks), binary comparison matrices, hydraulic fracturing (HF), types of hydraulic fracturing, hydraulic fracturing planning efficiency.

Аннотация. Статья посвящена решению задач многокритериальной оценки и ранжирования альтернатив с использованием метода анализа иерархий (МАИ) в контексте решения задачи оценки и выбора подходящего вида гидр разрыва пласта на этапе планирования по эффективности и рискам. В статье показано, что решение в данном случае заключается в: применении метода МАИ для определения приоритетности критериев (показателей эффективности и рисков); и определении оптимального и согласованного ранжирования различных видов гидр разрыва пласта. Кроме того, в данной исследовательской работе достаточно подробно обсуждается этот метод, четко иллюстрируются его различные этапы численно, что делает это исследование руководством для применения методологии при решении других многокритериальных задач принятия решений. С целью облегчения выполнения расчетов и матриц оно было запрограммировано на компьютере в среде Excel.

Ключевые слова: ранжировка, метод анализа иерархий МАИ, принятие решений, многокритериальная оценка, критерии оценки, качество (риски), матрицы парных сравнений, гидр разрыв пласта (ГРП), виды гидр разрыва пласта, эффективность планирования гидр разрыва пласта.

Во многих задачах многокритериального ранжирования и выбора решений в промышленности, нефтегазовой отрасли и других сферах требуется разработка эффективных математических методов, особенно в ситуациях, когда процесс многокритериального принятия решений является важным и одновременно сложным, что связано с тем, что он опирается на набор критериев, часть из которых не имеет прямого числового выражения, но может быть измерена или оценена. Подобная постановка характерна, например, для гидр разрыва пласта, который сегодня рассматривается как один из ключевых методов повышения продуктивности нефтегазодобычи. Вместе с тем из-за высокой стоимости, технологической сложности и разнообразия доступных вариантов гидр разрыва, различающихся по эффективности и уровню рисков (по расчётным или измеренным показателям), особенно важно принимать обоснованное решение и тщательно выбирать подходящий тип

с точки зрения результативности, рисков и затрат [1, 2]. К методам, позволяющим эффективно решать такие задачи, относится метод анализа иерархий, который нередко применяется на основе оценок одного эксперта. Общая процедура МАИ была предложена Т. Саати [3, 4, 5, 6]. На рисунке 1 представлена структура (иерархия) модели: верхний уровень соответствует основной цели F ; средние уровни включают критерии вариантов, обозначаемые как C_1 – C_n , и подкритерии K_1 – K_n ; нижний уровень содержит альтернативные решения и сценарии реализации A_1 – A_m .

Постановка и модели решения задачи

В настоящей исследовательской работе предложена методология, в рамках которой отбор (выбор) выполняется с применением метода анализа иерархий, как показано на рисунке 1. Данный подход позволяет учитывать

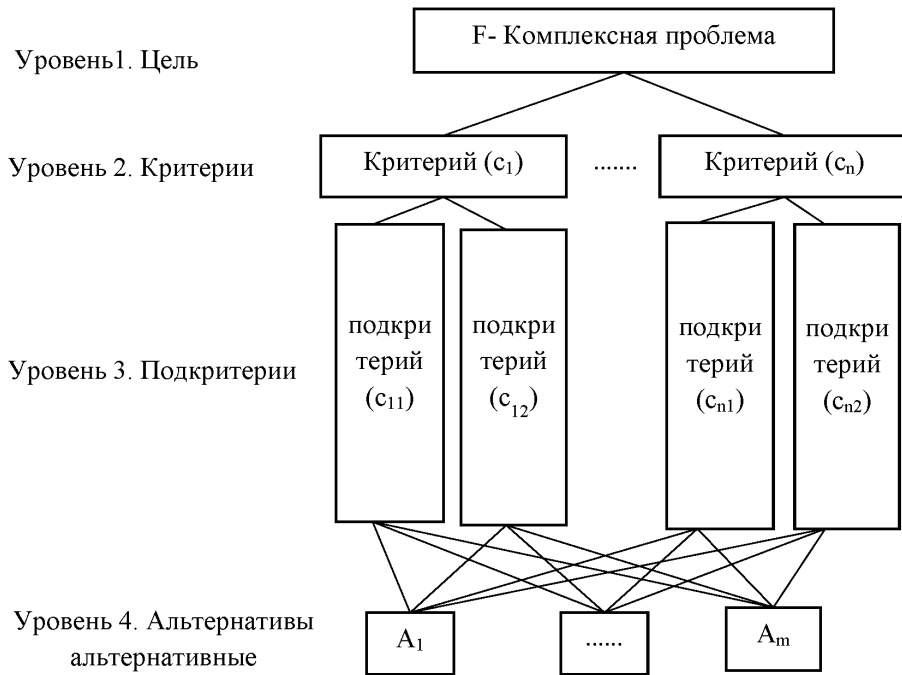


Рис. 1. Иерархическая структура проблемы выбора

Источник: Составлено автором на основании [8, 9]

важность (приоритет) критериев как относительно поставленной цели, так и относительно друг друга, а также относительно связанных с ними частных критериев, и в итоге формировать окончательное решение о приоритетности альтернатив при решении рассматриваемой задачи [7]. Реализация метода выполнена в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Эксперт (лицо, принимающее решение) формирует матрицы парных сравнений (приоритетов), сопоставляя приоритеты элементов нижнего уровня иерархии относительно элементов верхнего (предшествующего) уровня. В результате для каждого такого сопоставления получается матрица следующего вида.

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \vdots & \pi_1 \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \vdots & \pi_2 \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \vdots & \pi_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\pi_1} & \frac{1}{\pi_2} & \frac{1}{\pi_3} & \vdots & 1 \end{bmatrix}$$

Последний столбец матрицы представляет собой вектор приоритетов. На практике данный вектор нередко определяют с помощью приближённой процедуры: в оценочной матрице суммируют элементы каждой строки, после чего полученные суммы нормируют, деля каждую из них на суммарное значение всех элементов матрицы. В результате сумма компонент нормированного вектора равна единице: первая компонента соответствует приоритету первого элемента, вторая — приоритету второго и т. д. Для построения матриц парных

сравнений (определения приоритетов) между элементами применяется шкала Саати, представленная в таблице 1 [3, 10].

Таблица 1.

Классическая шкала МАИ

Высказывание	$a_{ij} = (\vartheta_i; \vartheta_j)$
Если элемент ϑ_i не имеет преимуществ перед элементом ϑ_j	1
Если элемент ϑ_i имеет незначительное преимущество перед элементом ϑ_j	3
Если элемент ϑ_i имеет существенное преимущество перед элементом ϑ_j	5
Если элемент ϑ_i имеет явное преимущество перед элементом ϑ_j	7
Если элемент ϑ_i имеет абсолютное преимущество перед элементом ϑ_j	9

Для контроля согласованности матриц приоритетов вычисляются индекс согласованности (ИС).

$$ИС = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \tag{1}$$

Здесь n — размерность матрицы суждений (приоритетов), а λ_{max} — наибольшее собственное значение матрицы суждений. На практике λ_{max} чаще всего определяют по следующей процедуре: сначала вычисляют суммы элементов каждого столбца матрицы суждений; далее сумму первого столбца умножают на значение первой

компоненты ранее полученного вектора приоритетов, сумму второго столбца — на значение второй компоненты и т.д.; затем все полученные произведения суммируют, и итоговое значение принимают за λ_{\max} . Если $\lambda_{\max} = n$, то матрица суждений считается идеально согласованной. При этом показатель согласованности должен удовлетворять условию $ИС \leq 0.1$.

2. На основе векторов приоритетов, характеризующих влияние элементов уровня $i+1$ на каждый соответствующий элемент уровня i (связь определяется соответствующей скобкой на иерархической диаграмме), формируется матрица приоритетов. Затем эту матрицу умножают справа на вектор приоритетов, извлечённый из иерархии на уровне i . В результате получают вектор приоритетов для уровня $i+1$
3. Последовательный расчёт приоритетов от верхних уровней к нижним позволяет количественно оценить вклад всех элементов, включённых в иерархию, в возможные результаты (конечные узлы графа иерархии). После этого альтернативы ранжируются, и выбирается вариант с наибольшим приоритетом [3, 5].

Применим алгоритм МАИ для выбора и оценки методов гидр разрыва пласта с точки зрения эффективности и риска. В качестве альтернатив рассмотрены три вида гидр разрыва, используемые в настоящее время для повышения добычи нефти на месторождении: традиционный гидр разрыв пласта — ГРП (D1), глубоко проникающий гидр разрыв пласта — ГГРП (D2), а также многостадийный гидр разрыв пласта — МГРП (D3). Эти варианты различаются объёмом закачки технологических жидкостей и проппантов, а также параметрами создаваемых трещин, что обуславливает различия по эффективности и уровню рисков. На основе анализа условий применения, типов и моделей гидр разрыва

Таблица 2.

Критерии оценки эффективности и рисков видов гидроразрыва пласта

B_1 . Экономические показатели	B_3 . Экологические показатели
C_1 . Уровень капиталовложений (млн рублей/год)	C_6 . Уровень воздействия объекта на литосферу (отходы) (% примесей)
C_2 . Чистая текущая стоимость — ЧТС (NPV) (млн рублей/год)	C_7 . Уровень воздействия объекта на гидросферу (сбросы) (% примесей)
B_2 . Технологические показатели	B_4 . Социальные показатели
C_3 . Прирост добычи нефти (раз.год)	C_8 . Уровень производственного травматизма (случ. /год)
C_4 . темп обводнения (Обводненность) (вероятность в %)	C_9 . Уровень воздействие на организм человека химических веществ (случ. /год)
C_5 . Наведенная (или индуцированная) сейсмичность (сколько раз.год)	

сформирован перечень критериев, используемых для оценки эффективности планирования гидр разрыва (многокритериальная оценка эффективности и рисков) [1, 2]. Из совокупности показателей эффективности отобраны следующие критерии (см. таблицу 2).

Для решения конкретной задачи можно установить следующую иерархию (рис. 2). Здесь буква А — общую (многокритериальную) эффективность выбора вида гидр разрыва пласта (Уровень 1); буквы В — виды критериев (показателей) эффективности и риски (Уровень 2); буквы С — конкретные критерии (Уровень 3); и буквы D — виды ГРП (Уровень 4).

Для иерархии, показанной на рисунке 2, эксперт, продвигаясь по уровням иерархии от корня А до конеч-

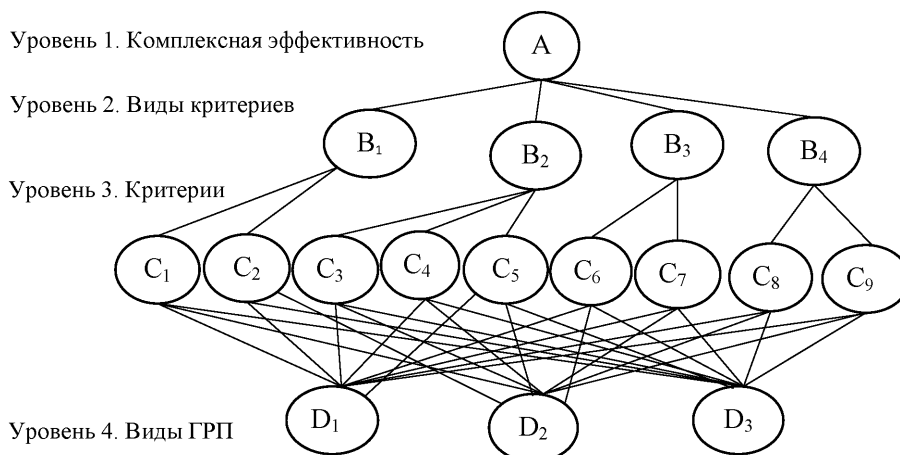


Рис. 2. Иерархическая структура выбора видов гидроразрыва пласта для повышения продуктивности нефтегазовых месторождений

Источник: Составлено автором на основании [6]

ных вершинах D_1, D_2 и D_3 , формирует матрицы суждений (парные сравнения) и матрицы приоритетов, а также выполняет с ними следующие вычисления:

Уровень 2

Формирует матрицу приоритетов видов критериев относительно друг друга по отношению к основному критерию А (таблица 2).

Таблица 3.

Матрица парных сравнений (суждений) определения приоритетов видов критериев

A	B_1A	B_2A	B_3A	B_3A	Σ по строке	π_i		
AB_1	1	1	3	5	10	0,378	$\Sigma \pi_i$	1,000
AB_2	1	1	3	5	10	0,378	I_{max}	4,134
AB_3	0,333	0,333	1	3	4,666	0,176	ИС	0,044
AB_3	0,2	0,2	0,333	1	1,733	0,065		

В этой таблице π_i — представляет собой элементы вектора приоритетов, а λ_{max} — наибольшее собственное значение (число) матрицы суждений. Они вычисляются, как объяснено в предыдущем разделе (согласно алгоритмам, предложенным Т. Саати для вычисления каждого [1]). В частности, для матрицы суждений типов критериев относительно А это выглядит следующим образом:

Сумма всех элементов матрицы равна= 26.299

$$\pi_i = [10 / 26,29; 10 / 26,29; 4,666 / 26,29; 1,733 / 26,29] = [0,378; 0,378; 0,176; 0,044]$$

$$\lambda_{max} = (1+1+0.33+0.2)0.378 + (1+1+0.33+0.2)0.378 + (3+3+1+0.33)0.176 + (5+5+3+1)0.065 = 4.13 = n(4)$$

$$ИС = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) = (4.13 - 4) / (4 - 1) = 0.004$$

Аналогичные вычисления делаются и для всех остальных матриц суждений.

Уровень 3

Далее создаются четыре матрицы парных сравнений в соответствии с типами критериев (экономические, технологические, экологические и социальные). В соответствии с иерархией (см. рисунок 2)

Таблица 4.

Матрицы парных сравнений (суждений) определения приоритетов критериев

B_1	B_1C_1	B_1C_2	Σ по строке	π_i	$\Sigma \pi_i$	1,000
C_1B_1	1	3	4	0,750	I_{max}	1,999
C_2B_1	0,333	1	1,333	0,249	ИС	0,001

B_2	B_2C_3	B_2C_4	B_2C_5	Σ по строке	π_i		
C_3B_2	1	1	5	7	0,454	$\Sigma \pi_i$	1,000
C_4B_2	1	1	5	7	0,454	I_{max}	3,000
C_5B_2	0,2	0,2	1	1,4	0,090	ИС	0,000

B_3	B_3C_6	B_3C_7	Σ по строке	π_i	$\Sigma \pi_i$	1,000
C_6B_3	1	5	6	0,833	I_{max}	2,000
C_7B_3	0,2	1	1,2	0,166	ИС	0,000

B_4	B_4C_8	B_4C_9	Σ по строке	π_i	$\Sigma \pi_i$	1,000
C_8B_4	1	0,333	1,333	0,249	I_{max}	1,999
C_9B_4	3	1	3	0,750	ИС	0,001

После составления этих матриц суждений из их векторов приоритетов составляется матрица приоритетов. В матрице приоритетов второго уровня иерархии будет столько столбцов, сколько элементов на предыдущем уровне, а строк будет столько, сколько элементов на нижнем уровне (т. е. 9). Матрица справа умножается на вектор приоритетов видов критериев.

B_1	B_2	B_3	B_4		C	
0.750	0	0	0	*	0.284	
0.249	0	0	0		0.378	0.094
0	0.454	0	0		0.378	0.172
0	0.454	0	0		0.176	0.172
0	0.090	0	0		0.065	0.034
0	0	0.833	0		0.147	
0	0	0.166	0		0.029	
0	0	0	0.249		0.016	
0	0	0	0.750		0.049	

Уровень 4

На этом уровне составляется 8 матриц суждений (по числу критериев) приоритетов видов гидр разрыва пласта для повышения продуктивности нефтегазовых месторождений; их можно представить в виде таблиц:

Затем из девяти полученных вектор-столбцов приоритетов формируется матрица приоритетов для тре-

Основные результаты

Результаты исследования показали, что метод анализа иерархий является действенным инструментом для принятия решений по сложным и значимым вопросам, в том числе в рассматриваемом случае. Его применение позволило получить однозначные результаты при выборе видов гидр разрыва пласта с позиции эффективности и рисков на основе набора выбранных критериев (показателей), характеризующих эффективность планирования гидр разрыва пласта. Поскольку операции гидр разрыва пласта относятся к дорогостоящим и технологически сложным процедурам, требующим тщательной проработки, корректный выбор подходящего вида гидр разрыва является одним из ключевых этапов подготовки до начала выполнения работ.

В рамках данного исследования этапы применения метода анализа иерархий детально и в численном виде

изложены вплоть до получения итоговых результатов. В связи с этим представленная работа может рассматриваться как методическое руководство, ориентированное на использование предложенного подхода при решении иных задач многокритериального принятия решений.

При этом, несмотря на очевидную трудоёмкость МАИ при выборе вида гидр разрыва пласта, возможна реализация многокритериальной оценки и с применением, например, метода нечёткого анализа иерархий, представляющего собой сочетание МАИ с инструментами нечёткой логики. Использование НМАИ позволяет повысить точность и надёжность получаемого решения, что особенно важно для стратегических задач, к которым, безусловно, относится выбор вида гидроразрыва пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батыров М.И. Техника и технология проведения ГРП на Ем-Ёговской площади Красноленинского месторождения / М.И. Батыров // Отраслевые научные и прикладные исследования: Науки о земле. — 2020. — С. 75–81.
2. Силин М.А., Магадова Л.А., Глущенко В.Н. Технологические аспекты и материалы для гидр разрыва пласта / М.А. Силин, Л.А. Магадова, В.Н. Глущенко. — М., 2012. — 422 с.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
4. Степин Ю.П. Проблемы и модели многокритериальной оценки рисков и эффективности разработки метаногольных месторождений. Часть I / Ю.П. Степин // Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. — 2018. — № 4 (293). — С. 154–171.
5. Петровский А.Б. Теория принятия решений / А.Б. Петровский. — М.: Академия, 2009. — 400 с.
6. Степин Ю.П. Компьютерная поддержка формирования, многокритериального ранжирования и оптимизации управленческих решений в нефтегазовой отрасли / Ю.П. Степин. — М.: Недра, 2016. — 421 с.
7. Степин Ю.П. Метод группового анализа иерархий для выбора вариантов разработки месторождений нефти и газа / Ю.П. Степин // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. — 2017. — № 1 (286). — С. 102–120.
8. Степин Ю.П., Бледных Е.Н., Макарик Е.В. Марковская модель метода анализа иерархий в оценке рисков вариантов разработки месторождений углеводородов / Ю.П. Степин, Е.Н. Бледных, Е.В. Макарик // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2021. — Т. 1, № 570. — С. 23–32.
9. Лю Хуань. Метод нечёткого анализа иерархий для выбора сайта электронной коммерции / Лю Хуань // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2014. — № 3. — С. 89–93.
10. Фам Ван Ты. Применение нечёткого метода анализа иерархий к методу анализа видов и последствий отказов / Фам Ван Ты // Computational Nanotechnology. — 2021. — Т. 8. — № 2. — С. 29–36.

© Фетарони Малак (malakfie2@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»