

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.98-110>

EDN WQXIYR

УДК 622.276.6

## **Выбор наилучших решений подбора технологий ГТМ на основе метода анализа иерархий**

*Кравченко А.Н., Васильев В.В., Салимов О.В.*

*ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия*

## **Selection of best IOR/EOR technologies based on analytic hierarchy process**

*A.N. Kravchenko, V.V. Vasilev, O.V. Salimov*

*LLC «Tyumen Petroleum Research Center», Tyumen, Russia*

**E-mail: [ovsalimov@tnnc.rosneft.ru](mailto:ovsalimov@tnnc.rosneft.ru)**

**Аннотация.** Рассмотрена проблема выбора альтернативных решений, в частности, технологий ГТМ для конкретной геологической обстановки. Предложено использовать для решения данной задачи метод анализа иерархий, разработанный в семидесятые годы Т. Саати. Показано, что этот метод имеет перспективы применения в нефтяной промышленности. Приведен пример использования методики.

**Ключевые слова:** гидравлический разрыв пласта, метод анализа иерархий, выбор альтернатив

**Для цитирования:** Кравченко А.Н., Васильев В.В., Салимов О.В. Выбор наилучших решений подбора технологий ГТМ на основе метода анализа иерархий//Нефтяная провинция.-2022.-№2(30).-С.98-110. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.98-110>. - EDN WQXIYR

**Abstract.** The authors discuss the problem of selection of alternative solutions, in particular, selection of IOR/EOR technologies for a concrete geological environment. To solve this problem, the analytic hierarchy process developed by Thomas Saaty in 1970s is offered. It is shown that the method can come into use in petroleum industry. Case studies are presented.

**Key words:** hydraulic fracturing, analytic hierarchy process, selection of alternative solutions

**For citation:** A.N. Kravchenko, V.V. Vasilev, O.V. Salimov Vybor nailuchshih reshenij podbora tehnologij GTM na osnove metoda analiza ierarhij [Selection of best IOR/EOR technologies based on analytic hierarchy process]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(30), 2022. pp. 98-110. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.98-110>. EDN WQXIYR (in Russian)

Одной из основных задач для месторождений, находящихся долгое время в разработке, является поддержание добычи нефти с целью продления периода рентабельной эксплуатации. Характерной особенностью данного периода разработки является значительное число пробуренных скважин и часто экономически не выгодное бурение новых скважин. Поэтому основным направлением для поддержания и, возможно, увеличения добычи нефти является интенсификация извлечения запасов существующим фондом скважин посредством проведения различных геолого-технических мероприятий (ГТМ) [1].

В промысловой практике, при планировании геолого-технических мероприятий часто возникает необходимость выбрать наилучшую технологию из нескольких возможных (нескольких представленных на рынке). Часто это делается волевым решением и без достаточного обоснования. Между тем существуют разработанные математические методы выбора оптимального решения. Одним из таких методов, наиболее популярным, является метод анализа иерархий (метод Саати) [2].

Основа метода анализа иерархий – попарные сравнения альтернатив по каждому из критериев и попарное сравнение критериев с точки зрения важности для поставленной цели. Таким образом, все сравнения в данном методе производятся попарно, то есть самым простым и очевидным способом.

Для сравнения Саати предложил переводить качественные признаки в количественные по девятибалльной шкале (Табл. 1).

В случае если лицо, принимающее решение, не может определиться между двумя качественными признаками, при наличии промежуточного мнения, Саати рекомендует использовать промежуточные баллы 2, 4, 6, 8.

Определение указанных вариантов сравнения может быть осуществлено многими способами: по субъективному мнению, по экспертной оценке, путем голосования и др.

Таблица 1

*Перевод качественных показателей в количественные*

Качественное сравнение	Количественный аналог	Качественное сравнение	Количественный аналог
Равно, одинаково, безразлично	1	Равно, одинаково, безразлично	1
Немного лучше, важнее	3	Немного хуже, менее важно	1/3
Лучше, важнее	5	Хуже, менее важно	1/5
Значительно лучше, важнее	7	Значительно хуже, менее важно	1/7
Принципиально лучше, важнее	9	Принципиально хуже, не важно	1/9

Другим специфическим фактором является ограничение численных аналогов числом 9. Несмотря на возможность более чем 9-кратного превышения одного объекта над другим по какому-либо критерию, такой шкалы, как правило, достаточно, чтобы отразить качественное соотношение.

Продемонстрируем применение метода Саати на примере выбора оптимальной технологии ГРП.

Допустим, Компания решила провести гидроразрыв пласта на одной из своих скважин. Продуктивный пласт имеет среднюю толщину, типичную для какого-либо рассматриваемого региона (в пределах первого десятка метров), и проницаемость порядка  $100 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Сверху и снизу вблизи пласта находятся водоносные горизонты, поэтому применение большеобъемного или даже среднего по масштабам ГРП исключается. В данной геологической обстановке необходимы технологии, обеспечивающие сдерживание роста трещины ГРП по высоте.

Для рассмотрения были предложены три варианта технологий [3]:

- традиционный ГРП;
- TSO (концевое экранирование);
- Frac-Pack (набивка трещины).

Указанные технологии позволяют снизить развитие трещины в высоту, что предотвращает чрезмерное обводнение скважины после воздействия.

Выбор наилучшей технологии проводился в следующем порядке.

1. Определение цели.

Цель – получить наиболее эффективную трещину (наибольший дебит) при наименьших затратах.

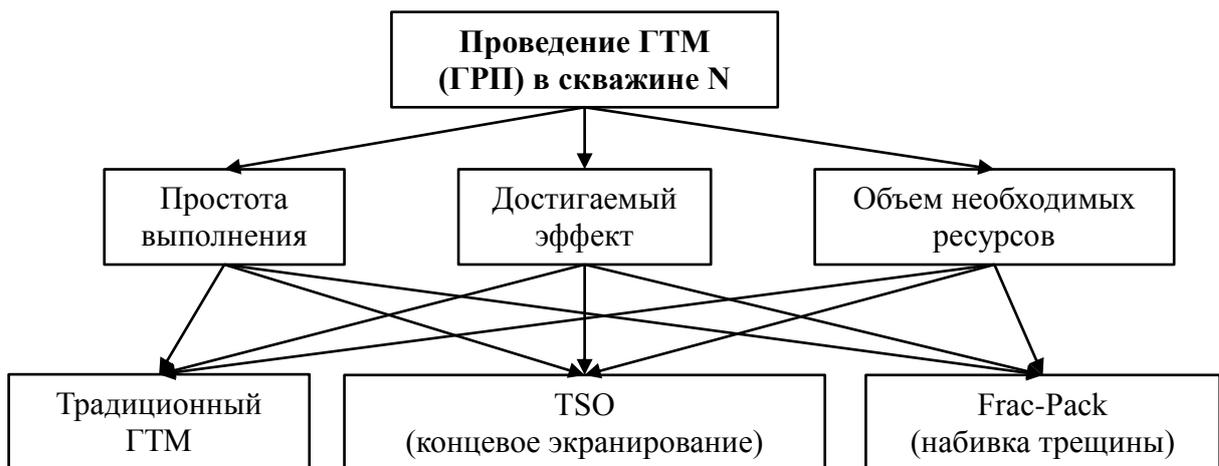
2. Выделение критериев, обуславливающих достижение цели.

В процессе коллективного обсуждения были определены следующие критерии выбора:

- 1) простота выполнения технологии;
- 2) достигаемый эффект;
- 3) объем необходимых ресурсов (пропанта, жидкости).

3. Выделение группы альтернатив, представляющих интерес.

Как правило, графическое построение дерева иерархий не обязательно. Тем не менее, дерево иерархий дает наглядное представление ситуации принятия решения и позволяет избежать некоторых ошибок при ее анализе (Рис. 1).



*Рис. 1. Дерево иерархий для примера выбора технологии ГТМ*

4. Построение матрицы попарных сравнений критериев по цели.

Путем коллективного обсуждения и, при необходимости, голосования сравнивались между собой критерии с точки зрения соответствия цели:

- достигаемый эффект важнее простоты выполнения технологии;
- простота выполнения технологии и объем необходимых ресурсов одинаково важны;
- достигаемый эффект важнее объема необходимых ресурсов.

Далее составили таблицу качественного сравнения критериев (Табл. 2). По соглашению сравнение силы критерия всегда производится для действия или объекта, стоящего в левом столбце, по отношению к действию или объекту, стоящему в верхней строке. Заполняется часть таблицы выше главной диагонали.

Таблица 2

*Качественное сравнение силы критериев*

Показатель	Простота выполнения технологии	Достижимый эффект	Объем необходимых ресурсов
Простота выполнения технологии		Менее важно	Одинаково важно
Достижимый эффект			Важнее
Объем необходимых ресурсов			

Перевели значения критериев в баллы (Табл. 3). При этом в левую нижнюю часть матрицы заносим соответствующие обратные величины. На главной диагонали ставим единицы.

Таблица 3

*Количественные значения силы критериев*

Показатель	Простота выполнения технологии	Достижимый эффект	Объем необходимых ресурсов
Простота выполнения технологии	1	1/3	1
Достижимый эффект	3	1	7
Объем необходимых ресурсов	1	1/7	1

5. Построение матриц попарных сравнений альтернатив по критериям.

Аналогично пункту 4 построили матрицы сравнения отдельных альтернатив по каждому из критериев.

С каждой из полученных матриц выполнили последовательность действий, описанную ниже.

### 5.1. Провели нормировку матрицы:

– находим сумму элементов каждого столбца

$$S_j = a_{1j} + a_{2j} + \dots + a_{nj} \quad (\text{см. табл. 4});$$

Таблица 4

#### *Определение сумм столбцов*

Показатель	Простота выполнения технологии	Достижимый эффект	Объем необходимых ресурсов
Простота выполнения технологии	1	1/3=0,333	1
Достижимый эффект	3	1	7
Объем необходимых ресурсов	1	1/7=0,143	1
Сумма	5	1,476	9

– делим все элементы матрицы на сумму элементов соответствующего столбца

$$A_{ij} = a_{ij}/S_j \quad (\text{см. табл. 5}).$$

– определяем веса строк. Для этого просто определяем среднее значение в каждой строке последней из полученных матриц:

$$W_i = \frac{A_{i1} + A_{i2} + \dots + A_{in}}{n} \quad (\text{см. табл. 5}).$$

Таблица 5

#### *Деление элементов на сумму соответствующего столбца и определение веса строк*

Показатель	Простота выполнения технологии	Достижимый эффект	Объем необходимых ресурсов	Среднее значение
Простота выполнения технологии	0,2	0,226	0,111	0,179
Достижимый эффект	0,6	0,677	0,778	0,685
Объем необходимых ресурсов	0,2	0,0968	0,111	0,136

Полученный в итоге столбец задает веса строк матрицы, в данном случае – веса критериев с точки зрения поставленной цели. Этот столбец называют весовым столбцом критериев по цели (см. табл. 6).

Таблица 6

**Весовой столбец критериев по цели**

Показатель	Вес в долях	Вес в процентах
Простота выполнения технологии	0,179	17,9
Достижимый эффект	0,685	68,5
Объем необходимых ресурсов	0,136	13,6

## 5.2. Промежуточные выводы

С точки зрения удовлетворения нашей цели наиболее весомым критерием является достижимый эффект (68,5%), далее следует простота технологии (17,9%), потом идет объем необходимых ресурсов (13,6%).

Действия по пунктам 5.1 – 5.2 повторяем для всех матриц попарного сравнения альтернатив по критериям. Получаем следующие результаты (Табл. 7 – 16).

Таблица 7

**Сравнение альтернатив по простоте выполнения**

Показатель	Традиционный ГРП	TSO	Frac-Pack
Традиционный ГРП		Просто	Очень просто
TSO			проще
Frac-Pack			

Переводим значения элементов таблицы в баллы, находим суммы столбцов (Табл. 8).

Таблица 8

**Суммы столбцов по критерию простоты выполнения**

Показатель	Традиционный ГРП	TSO	Frac-Pack
Традиционный ГРП	1	1/5	1/9
TSO	5	1	1/7
Frac-Pack	9	7	1
Сумма	15	8,2	1,254

Таблица 9

*Деление на суммы столбцов и определение весов строк*

Показатель	Традиционный ГПП	TSO	Frac-Pack	Среднее значение
Традиционный ГПП	0,0667	0,0244	0,088	0,0597
TSO	0,333	0,122	0,114	0,189
Frac-Pack	0,6	0,853	0,797	0,75

Таблица 10

*Сравнение альтернатив по достигаемому эффекту*

Показатель	Традиционный ГПП	TSO	Frac-Pack
Традиционный ГПП		Ниже	Очень низко
TSO			Ниже
Frac-Pack			

Таблица 11

*Перевод значений элементов таблицы в баллы, нахождение сумм столбцов*

Показатель	Традиционный ГПП	TSO	Frac-Pack
Традиционный ГПП	1	1/3	1/9
TSO	3	1	1/5
Frac-Pack	9	5	1
Сумма	13	6,333	1,311

Таблица 12

*Деление на суммы столбцов и определение весов строк*

Показатель	Традиционный ГПП	TSO	Frac-Pack	Среднее значение
Традиционный ГПП	0,077	0,053	0,084	0,071
TSO	0,231	0,158	0,152	0,180
Frac-Pack	0,692	0,789	0,763	0,748

Таблица 13

*Сравнение альтернатив по объему необходимых ресурсов*

Показатель	Традиционный ГПП	TSO	Frac-Pack
Традиционный ГПП		Немного меньше	Немного меньше
TSO			Практически одинаково
Frac-Pack			

Переводим значения критериев в баллы, находим суммы столбцов и веса строк.

Таблица 14

*Суммы столбцов*

Показатель	Традиционный ГРП	TSO	Frac-Pack
Традиционный ГРП	1	1/3	1/3
TSO	3	1	1/2
Frac-Pack	3	2	1
Сумма	7	3,333	1,833

Таблица 15

*Веса строк*

Показатель	Традиционный ГРП	TSO	Frac-Pack	Среднее значение
Традиционный ГРП	0,143	0,099	0,182	0,141
TSO	0,428	0,3	0,273	0,334
Frac-Pack	0,428	0,6	0,545	0,524

Таким образом, получаем весовые столбцы альтернатив (см. табл. 16)

Таблица 16

*Весовые столбцы альтернатив*

Показатель	Вес в долях			Вес в процентах		
	по критерию простоты выполнения	по достигаемому эффекту	по объему необходимых ресурсов	по критерию простоты выполнения	по достигаемому эффекту	по объему необходимых ресурсов
Традиционный ГРП	0,0597	0,071	0,141	5,97	7,1	14,1
TSO	0,189	0,180	0,334	18,9	18,0	33,4
Frac-Pack	0,75	0,748	0,524	75,0	74,8	52,4

## 6. Определение весов альтернатив по системе иерархии

6.1. Столбцы весов альтернатив по критериям в долях объединяем в общую матрицу весов альтернатив по всем критериям (Табл. 17).

Таблица 17

*Матрица весов альтернатив по всем критериям*

Показатель	Простота выполнения	Достижимый эффект	Объем необходимых ресурсов
Традиционный ГРП	0,0597	0,071	0,141
TSO	0,189	0,180	0,334
Frac-Pack	0,75	0,748	0,524

6.2. Умножаем матрично полученную матрицу на столбец весов критериев по цели (по правилу строка на столбец):

$$\begin{pmatrix} 0,0597 & 0,071 & 0,141 \\ 0,189 & 0,180 & 0,334 \\ 0,750 & 0,748 & 0,524 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,179 \\ 0,685 \\ 0,136 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0785 \\ 0,2025 \\ 0,7177 \end{pmatrix}$$

В результате получаем веса альтернатив с точки зрения достижения поставленной цели (Табл. 18).

Таблица 18

*Весовые коэффициенты альтернатив*

Показатель	Вес в долях	Вес в процентах
Традиционный ГРП	0,0785	7,85
TSO	0,2025	20,25
Frac-Pack	0,7177	71,77

Как следует из табл. 18, технология Frac-Pack является наиболее привлекательной для поставленной цели (увеличение добычи нефти при меньших затратах), несмотря на сложность ее выполнения. Поэтому управленческое решение будет таким: на данной скважине выполнить технологию Frac-Pack.

#### 7. Проверка согласованности сравнений по методу Саати

В ряде случаев представляется важным, чтобы не было существенных противоречий в сравнениях, то есть сравнения были согласованными.

Проверка согласованности для матрицы сравнения проводится после определения весов по следующему алгоритму:

а) Вычисляем суммы элементов столбцов для матрицы сравнений:

$$S_j = a_{1j} + a_{2j} + \dots + a_{nj}$$

б) Умножаем поэлементно полученные значения и значения вектора весов и складываем результаты (сумма первого столбца, умноженная на вес первой строки, плюс сумма второго столбца, умноженная на вес второй строки и т.д.):

$$L = S_1 \cdot w_1 + S_2 \cdot w_2 + \dots + S_n \cdot w_n$$

в) Находим индекс согласования по формуле:

$$\text{ИС} = \frac{L - n}{n - 1}$$

г) Находим отношение согласованности по формуле:

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СИ}}$$

где СИ – случайный индекс согласованности, который определяется в зависимости от числа строк матрицы  $n$  сравнения по табл. 19.

Таблица 19

*Значения индекса случайной согласованности*

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
СИ	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Проверим согласованность сравнений для нашего набора критериев (Табл. 3). В этих вычислениях будет  $n = 3$ , так как в матрице сравниваются 3 варианта.

Суммы элементов столбцов найдены в табл. 4, а веса строк найдены в табл. 7. Перемножим их поэлементно и сложим:

$$L = 5 \times 0,179 + 1,476 \times 0,685 + 9 \times 0,136 = 3,13$$

Находим индекс согласованности:

$$\text{ИС} = \frac{3,13 - 3}{3 - 1} = 0,065$$

Находим отношение согласованности:

$$\text{ОС} = \frac{0,065}{0,58} = 0,112$$

Сравнения считаются согласованными, если  $\text{ОС} \leq 0,1$ . В ряде случаев (как правило, при сравнении по очень субъективному критерию) можно

считать неплохо согласованными сравнения при  $OC \leq 0,15$  и даже при  $OC \leq 0,2$ .

Вывод: сравнения критериев (Табл. 2), отраженные в матрице табл. 3 согласованы. Выбор наилучших решений подбора технологий ГТМ на основе метода анализа иерархий позволит вырабатывать рекомендации по выбору оптимальных проектных решений, в том числе и типовых, в соответствии с указанным набором исходных данных [4].

### Выводы

1. Метод анализа иерархий позволяет преобразовать словесные оценки в цифровую форму.
2. С использованием этого метода можно произвести выбор альтернатив (технологий ГТМ или объектов воздействия) по совокупности критериев.
3. Выбор наилучших решений подбора технологий ГТМ на основе метода анализа иерархий позволит вырабатывать рекомендации по выбору оптимальных проектных решений, в том числе и типовых, в соответствии с указанным набором исходных данных.

### Список литературы

1. В.В. Васильев и др. Методика выбора скважин-кандидатов для интенсификации добычи с использованием аппарата нечеткой логики. Нефтяное хозяйство, 2011, №6. С 120-123.
2. Т. Саати. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь. – 1993. – 278 с.
3. В.Г. Салимов и др. Гидравлический разрыв карбонатных пластов. М.: ЗАО «Издательство нефтяное хозяйство». 2013. – 472 с.
4. А.Н. Кравченко. Механизмы учета экономического эффекта типизации проектных решений объектов нефтегазового назначения. «Вестник СурГУ». 2021. Вып. 4(34) – С. 39-48.

### References

1. Vasilyev V.V. et al. *Metodika vybora skvazhin-kandidatov dlya intensivatsii dobychi s ispolzovaniem apparata nechetkoi logiki* [Methodology selection of wells for stimulation of the production using mathematical tools fuzzy logic]. Neftyanoe Khozyaistvo [Oil Industry]. 2011, No. 6. pp. 120-123. (in Russian)

2. Thomas L. Saaty The analytic hierarchy process. Moscow: Radio i Svyaz Publ. 1993. 278 p. (translated from English)
3. Salimov V.G., et al. *Gidravlicheskii razryv karbonatnykh plastov* [Hydraulic fracturing of carbonate formations]. Moscow: Neftyanoe Khozyaistvo Publ. 2013. 472 p. (in Russian)
4. Kravchenko A.N. *Mekhanizmy ucheta ekonomicheskogo effekta tipizatsii proektnykh resheniy obyektov neftegazovogo naznacheniya* [Mechanisms for accounting the economic effect of typification of design solutions for oil and gas facilities]. Vestnik SurGU [Surgut State University Journal]. 2021. Iss. 4(34) pp. 39-48. (in Russian)

### Сведения об авторах

*Кравченко Александр Николаевич*, заместитель главного инженера-начальник управления по развитию систем проектирования, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»  
Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19  
E-mail: ankravchenko-tnk@tnnc.rosneft.ru

*Васильев Владимир Васильевич*, кандидат технических наук, главный менеджер отдела типизации решений в ГиР, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»  
Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19  
E-mail: vvvasilev@tnnc.rosneft.ru

*Салимов Олег Вячеславович*, доктор технических наук, менеджер отдела типизации решений в ГиР, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»  
Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19  
E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

### Authors

*A.N. Kravchenko*, Deputy Chief Engineer - Head of Design Systems Development Administration, Tyumen Petroleum Research Center  
42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation  
E-mail: ankravchenko-tnk@tnnc.rosneft.ru

*V.V. Vasilev*, Ph.D., Chief Manager, Solutions Type Assignment Department, Tyumen Petroleum Research Center  
42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation  
E-mail: vvvasilev@tnnc.rosneft.ru

*O.V. Salimov*, Dr.Sc., Manager, Solutions Type Assignment Department, Tyumen Petroleum Research Center  
42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation  
E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

*Статья поступила в редакцию 09.03.2022*

*Принята к публикации 18.06.2022*

*Опубликована 30.06.2022*