

УДК 622.276

DOI: 10.31660/0445-0108-2024-1-92-107

Статистический анализ и принятие решений по повышению эффективности мероприятий по ограничению водопритоков в добывающих скважинах в условиях неопределенности

**Г. М. Эфендиев¹, Г. Ж. Молдабаева^{2*}, С. Н. Бастриков³,
О. Г. Кирисенко¹, А. Х. Сыздыков², Ш. Р. Тузельбаева², Б. А. Балуанов²**

¹*Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджанская Республика*

²*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан*

³*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия*

**g.moldabayeva@satbayev.university*

Аннотация. Данная статья посвящена построению и статистическому анализу моделей, выражающих связь между показателями эффективности и большим числом геолого-технологических факторов. В качестве показателей эффективности приняты такие, как продолжительность эффекта, объем дополнительно добытой нефти, объем ограниченной воды и прибыль по скважине с учетом стоимости полимера. В результате обработки данных и анализа получены множественные уравнения. Показаны пути оценки весовых вкладов каждого из факторов в формирование значений выходных переменных. Дана оценка адекватности и достоверности моделей с помощью соответствующих критериев.

Ключевые слова: обводненность, моделирование, функция принадлежности, эффективность водоизоляционных работ, геолого-физические условия, осадкогелеобразующие составы

Благодарности: данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ AP19674847).

Для цитирования: Статистический анализ и принятие решений по повышению эффективности мероприятий по ограничению водопритоков в добывающих скважинах в условиях неопределенности / Г. М. Эфендиев, Г. Ж. Молдабаева, С. Н. Бастриков [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-1-92-107 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 1. – С. 92–107.

A statistical analysis and decision-making to enhance the effectiveness of measures for water influx in production wells under conditions of uncertainty

**Galib M. Efendiyev¹, Gulnaz Zh. Moldabayeva^{2*}, Sergey N. Bastrikov³,
Oleg G. Kirisenko¹, Askar Kh. Syzdykov², Sholpan R. Tuzelbayeva²,
Bakytzhan A. Baluanov²**

¹*Institute of Oil and Gas of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, the Republic of Azerbaijan*

²*Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan*

³*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

**g.moldabayeva@satbayev.university*

Abstract. This article focuses on modelling and statistically analysing models that express the relationship between efficiency indicators and multiple geological and technological factors. Efficiency indicators include parameters such as the duration of the effect, the volume of additionally extracted oil, the volume of restricted water, and the well's profit considering polymer costs. The article presents multiple equations derived from data processing and analysis. It demonstrates techniques for evaluating the contributions of each factor in determining the values of the output variables. The adequacy and reliability of the models are evaluated using appropriate criteria.

Keywords: water-cut, modelling, membership function, water shut-off efficiency, geological and physical conditions, sediment-forming compositions

Acknowledgements: this study received financial support from the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (No. AP19674847).

For citation: Efendiyev, G. M., Moldabayeva, G. Zh., Bastrikov, S. N., Kirisenko, O. G., Syzdykov, A. Kh., Tuzelbayeva, Sh. R., & Baluanov, B. A. (2024). A statistical analysis and decision-making to enhance the effectiveness of measures for water influx in production wells under conditions of uncertainty. *Oil and Gas Studies*, (1), pp. 92-107. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-1-92-107

Введение

Одной из технологий, позволяющих повысить эффективность обработок призабойной зоны скважин, является правильное применение осадкогелеобразующих составов, что требует глубокого анализа геологических условий и опыта применения различных технологических решений, анализа показателей эффективности и влияния на них различных факторов, построения моделей и прогнозных оценок по ним, принятия решений. Здесь при принятии решений необходимо рассмотрение возможности применения методов, учитывающих неопределенность.

Анализ результатов исследований, посвященных технологиям ограничения водопритоков в нефтедобывающих скважинах

Одной из основных проблем, с которой сталкиваются нефтедобывающие компании, является проблема водопритоков. В большинстве своем эта проблема типична для старых скважин, однако она также может возникать и в новых добывающих скважинах месторождения. Данное обстоятельство, как известно, создает многочисленные технико-технологические и экономические проблемы. Эти проблемы известны, так как они уже на протяжении многих лет привлекают внимание исследователей, посвятивших им свои многочисленные труды. Например, в одной из работ отмечается следующее: «...если скважина представляет собой газлифтную скважину, количество газа, нагнетаемого для подъема флюида из ствола скважины на поверхность, выше при добыче избыточной воды, чем без ее добычи...» [1]. Кроме того, добыча воды также приводит к возникновению дополнительных проблем, в частности к увеличению накипи, коррозии и деградации в промысловых сооружениях, начиная от ствола скважины и заканчивая наземными сооружениями [2]. Еще одна серьезная проблема заключается в том, что затраты на сепарацию, очистку и утилизацию пла-

стовой воды ложатся тяжелым бременем на бюджеты нефтяных компаний [3, 4]. Так, например, в Альберте (провинция Канады) утилизация пластовой воды обходится примерно в 1 млрд долларов в год. Избавление от такого производства помогает сократить расходы операторов и повысить прибыльность их деятельности [3]. Поэтому необходимость разработки технологических мероприятий по ограничению водопритоков очевидна. При наличии достаточной информации о характеристиках пласта и отличительных проблемах месторождения можно избежать ненужной добычи воды на этапе проектирования ствола скважины [4, 5]. В данном случае по поводу водопритоков возникает вопрос: «Наличие водопритоков всегда ли плохо? Всегда ли этот фактор играет негативную роль?» Судя по работам исследователей, правильный ответ: «Нет!». Водоприток является одним из наиболее важных факторов добычи нефти, поскольку он помогает управлять пластом, мобилизовать нефть и вытеснять ее из однородных пород [4, 5]. Большинство исследователей, естественно, считают, что нежелательная добыча воды должна быть устранена и снижена для повышения производительности и прибыльности добывающих скважин [3–6]. Операции по перекрытию воды сосредоточены на устранении нежелательной подачи воды, которую также называют «плохой водой». В некоторых случаях нагнетательная скважина связана с добывающей скважиной через открытую трещину или особенности, также известные как «зоны поглощения». Открытые объекты также могут привести к избыточному количеству воды, если они соединены с водоносным горизонтом. Кроме того, трещины и открытые элементы могут способствовать нежелательной добыче воды, когда они связаны с водоносными пластами [7].

Разработка мероприятий по ограничению водопритоков обычно начинается со сбора геолого-технологических данных с мест проведения данного геолого-технического мероприятия.

Наиболее важной частью любой операции по перекрытию воды является точный анализ условий возникновения проблемы. Необходимо знать точку входа воды, расчлененность пород-коллекторов, иметь сведения о пластовых и забойных давлениях, конструкции скважин и др. Фактически, как отмечается в различных исследованиях [4, 5, 7, 8], вся доступная информация о скважине считается ценной. Дело в том, что каждая скважина будет иметь свою собственную информацию, характеризующую полностью геолого-физические условия и применяемую технологию. Правильное использование данной информации, в свою очередь, позволит правильно смоделировать процесс и привести к принятию адекватных технологических решений по ограничению водопритоков и, как результат, увеличению добычи нефти, а также экономии затрат на проведение технологических операций. Авторы выполненных работ отмечают значимость каротажных работ в добывающих скважинах при определении обводненности как важный шаг в планировании мероприятий по ограничению водопритоков.

Группа работ посвящена анализу разработки высокообводненных месторождений, динамике добычи нефти и воды.

Отмечается о закрытии скважин на этих месторождениях по достижении их обводненности 98 %. Это позволяет эффективно контролировать соотношение воды и нефти, повышать добычу и экономить на разработке [9]. Ряд работ посвящен полимерному заводнению. В настоящее время полимерное заводнение является наиболее широко используемой технологией химического заводнения. При этом основным механизмом полимерного заводнения является добавление полимеров в нагнетаемую воду с образованием высоковязкой вытесняющей жидкости [5, 10].

Водоизоляционные работы могут быть проведены с использованием обработок различными химическими составами. Эти составы приводят к лучшему блокированию зон водопритоков. Идея состоит в том, чтобы иметь возможность закрыть пути наименьшего сопротивления перед водой за счет уменьшения проницаемости зон водопритоков с целью предотвращения через них поступления воды в скважину. Другими словами, цель состоит в том, чтобы заблокировать открытые каналы высокой проницаемости [11]. Результаты применения составов могут быть достигнуты через определенное время в зависимости от характера коллектора и свойств закачиваемых химикатов. Синтетические полимеры более распространены, поскольку они дешевле, доступнее и хорошо работают с малосоленой водой. Полиакриламид (ПАА) и гидролизованный полиакриламид (ГПАА) представляют собой два типа синтетических полимеров. Полимеры также могут играть роль в снижении проницаемости [12]. Наконец, исходя из характеристик коллектора и экономических соображений, правильный полимер выбирают в случае химической закачки. В работе [13] приводится общий обзор полимерных систем, используемых для водоизоляционных работ, а также их химические соединения и свойства. Существуют и другие химические методы перекрытия воды, такие как смолы, твердые частицы и пены.

Из наиболее известных механических решений при водоизоляционных работах внутри ствола скважины следует отметить установку пакеров и пробок. Они обычно используются нефтяными операторами для отключения избыточного поступления воды [14, 15]. Это оборудование известно своей экономичностью и надежностью в достижении водоизоляции. Их можно установить с помощью гибкой трубы, по которой они могут работать через ствол скважины.

Таким образом, из приведенного краткого обзора следует, что в связи с вступлением крупнейших нефтяных месторождений мира в стадию высокой обводненности и снижения коэффициента извлечения нефти, при чрезвычайно сложном распределении остаточной нефти основным методом, необходимым для дальнейшего повышения нефтеотдачи, являются более точные выбор и оценка эффективности мероприятий в коллекторах с высокой обводненностью. Разработка (совершенствование) способов и

подходов к принятию решений с целью повышения технологической и экономической эффективности вытеснения нефти, коэффициента извлечения нефти и снижения обводненности коллекторов имеет большое значение для увеличения добычи на нефтяных месторождениях, как следует из обзора, является актуальной проблемой. Применение различных прикладных методов построения моделей эффективности мероприятий, в том числе учитывающих неопределенность условий моделирования и принятия решений, позволит добиться в конечном итоге ограничения водопритоков и повышения нефтеотдачи. В зависимости от конкретной ситуации в пласте с высокой обводненностью перспективным является обоснованный выбор технологий добычи нефти, основанный на применении полимерных и осадкогелеобразующих составов.

Анализ факторов, влияющих на эффективность изоляции водопритоков в добывающих скважинах

Для повышения эффективности водоизоляционных работ необходимо комплексное изучение влияния как геолого-физических, технических, так и технологических факторов на процесс ограничения водопритоков.

С этой целью собраны, обработаны и проанализированы результаты обработок призабойной зоны скважины (ПЗ) полимерным раствором на одном из нефтедобывающих предприятий, построены уравнения, выражающие зависимости показателей эффективности. На основании проведенного анализа в качестве геолого-физических и технических факторов, характеризующих призабойную зону (ПЗ) и скважину, были выбраны [5, 16]: проницаемость (x_1), расчлененность пласта (x_2), пластовое (x_3) и забойное (x_4) давления, вязкость нефти в пластовых условиях (x_5), текущий коэффициент извлечения нефти (КИН) (x_6), средний дебит нефти (x_7), воды (x_8) за 3 месяца до обработки скважины полимером, обводненность продукции (x_9), длина фильтра скважины (x_{10}) (табл. 1).

Для этого предварительно входные и выходные переменные были вначале представлены в логарифмическом виде, по этим данным в результате реализации программы линейной регрессии построены уравнения в виде многочлена, затем потенцированием получены выражения в мультипликативном виде. По такой же исходной информации, собранной по одному из месторождений Республики Казахстан, проведена идентификация полученных моделей. Для этого путем сравнения расчетных по предварительным моделям типа

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^{12} a_i x_i \quad (1)$$

и фактических данных таблиц производились уточнение и идентификация их к рассматриваемым условиям. В результате такой обработки для каждого показателя эффективности получены отмеченные модели.

Таблица 1

**Значения геолого-физических и технических факторов скважин
одного из месторождений Республики Казахстан**

Проницаемость, мкм ²	Расчлененность	Пластовое давление, МПа	Забойное давление, МПа	Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с	Текущий коэффициент нефтеотдачи	Дебит скважины до обработки		Обводненность, %	Длина фильтра, м	Количество полимера на 1 м фильтра, кг	% заводнения ПЭС полимером
						Нефть, т/сут	Вода, м ³ /сут				
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
0,728	5,8	36	38	0,997	31,4	1,3	24,9	94,99	8	4,4	19,2
1,34	5,8	19,6	22,1	0,997	31,4	6,1	129,1	95,47	19,5	3,8	16,5
15,6	5,8	26,8	28,8	0,997	31,4	3,4	140,6	97,61	26	7,8	34,2
5,67	5,8	25,7	29,2	1,22	31,4	3,6	116,2	96,97	14	14	61,4
2,98	2,2	22,6	24,6	0,97	31,4	5,4	183,7	97,14	18	16,6	72,6
14,4	2,2	20,4	22,4	0,997	31,4	6,7	232,6	97,19	16	11,3	49,5
4,6	2,2	28	30	0,8	31,4	4,1	53,6	92,87	31	2,7	11,7
3,91	5,8	27,4	29,4	0,997	31,4	3	139	97,86	15	20,5	90
9,35	5,8	27,4	29,4	0,997	31,4	7,7	279,9	97,33	19	10,3	45,2
45,6	2,5	21,3	23,3	1,02	31,4	3,4	46,7	93,16	13	3,1	13,7

Таблица 2

Значения технологических показателей для скважин месторождения X

Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
Продолжительность эффекта, мес.	Средние значения дополнительной добытой нефти и ограничения водопритоков за время эффекта		Прибыль по скважине с учетом стоимости полимера, тыс. тенге
	Нефть, т	Вода, м ³	
8	37,1	48	257,1
4	32,3	75	714,9
6	30,6	27	1 141,2
9	34,5	11	542,2
7	29,2	45	646,3
6	28,3	21,8	626,3
2	18,8	241	1 216,1
14	39,5	22	574,2
7	33,1	18	875,2
5	24,7	35	568

В данном случае проводился статистический анализ с целью построения моделей, выражающих связь отмеченных в таблице 1 факторов и в таблице 2 выходных переменных, то есть показателей эффективности изоляционных работ — продолжительность эффекта, значения количества дополнительной добытой нефти, объема ограничения водопритоков за время эффекта и прибыль по скважине.

В результате реализации программы линейной регрессии получены множественные корреляционные уравнения.

Для построения зависимостей отобранного ряда критериев, которые оказывают влияние на эффективность проведения геолого-технологических мероприятий, их обработку проводят в соответствии с корреляционным анализом. При этом статистическая обработка данных проводилась по двум направлениям посредством применения программы линейной регрессии.

1. Были построены зависимости значений показателя эффективности и геолого-технологических факторов по их фактическим значениям. Для этого находились логарифмы входных и выходных переменных и с применением программы линейной регрессии строились линейные множественные уравнения типа (1):

- для продолжительности эффекта:

$$Y_1^* = 2,088 + 0,0279X_1 + 0,2117X_2 + 0,8552X_3 - 0,8354X_4 + 0,1911X_5 + 0,2134X_6 - 0,1116X_7 - 0,0122X_8 - 1,0794X_9 - 0,6955X_{10} - 0,0266X_{11} + 0,5022X_{12}, \quad (2)$$

- дополнительной добычи нефти:

$$Y_2^* = 4,011 - 0,0329X_1 + 0,0199X_2 + 0,2676X_3 - 0,3559X_4 + 0,2869X_5 - 0,0187X_6 - 0,1458X_7 + 0,1664X_8 - 1,2373X_9 - 0,2664X_{10} - 0,0446X_{11} + 0,15 X_{12}, \quad (3)$$

- объема ограниченной воды:

$$Y_3^* = 2,673 - 0,2207X_1 - 0,1253X_2 - 0,8418X_3 + 0,9415X_4 - 0,6897X_5 - 0,1753X_6 + 0,2407X_7 - 0,4635X_8 + 0,3228X_9 + 1,0051X_{10} - 0,0456X_{11} - 0,5124X_{12}, \quad (4)$$

- прибыли по скважине с учетом стоимости полимера:

$$Y_4^* = -0,75 - 0,0078X_1 - 0,2062X_2 - 1,1539X_3 + 1,6104X_4 - 0,9984X_5 + 0,0487X_6 + 0,017X_7 + 0,0217X_8 + 1,1505X_9 + 1,0366X_{10} - 0,1685X_{11} + 0,0943X_{12}, \quad (5)$$

где $X_i = \log x_i$, $Y_i^* = \log Y_i$.

2. Посредством проведения операций потенцирования выражений (2)–(5) получены искомые зависимости в мультипликативном виде с последующим уточнением параметров:

- для продолжительности эффекта получена следующая зависимость:

$$Y_1 = 122,50 \frac{x_1^{0,0279} x_2^{0,2117} x_3^{0,8552} x_5^{0,1911} x_6^{0,2134} x_{12}^{0,5022}}{x_4^{0,8354} x_7^{0,1116} x_8^{0,0122} x_9^{1,0794} x_{10}^{0,6955} x_{11}^{0,0266}}, \quad (6)$$

- дополнительной добычи нефти:

$$Y_2 = 10\,258,863 \frac{x_2^{0,0199} x_3^{0,2676} x_5^{0,2869} x_8^{0,1664} x_{12}^{0,15}}{x_1^{0,0329} x_4^{0,3559} x_6^{0,0187} x_7^{0,1458} x_9^{1,2373} x_{10}^{0,2664} x_{11}^{0,0446}}, \quad (7)$$

- объема ограниченной воды:

$$Y_3 = 471,068 \frac{x_4^{0,9415} x_7^{0,2407} x_9^{0,3228} x_{10}^{1,0051}}{x_1^{0,2207} x_2^{0,1253} x_3^{0,8418} x_5^{0,6897} x_6^{0,1753} x_8^{0,4635} x_{11}^{0,0456} x_{12}^{0,5124}}, \quad (8)$$

- прибыли по скважине с учетом стоимости полимера:

$$Y_4 = 0,1779 \frac{x_4^{1,6104} x_6^{0,0487} x_7^{0,017} x_8^{0,0217} x_9^{1,1505} x_{10}^{1,0366} x_{12}^{0,0943}}{x_1^{0,0078} x_2^{0,2062} x_3^{1,1539} x_5^{0,9984} x_{11}^{0,1685}}. \quad (9)$$

Следует отметить, что в научных исследованиях с применением регрессионного анализа считается необходимой сравнительная оценка степени важности (значимости) входных (независимых) переменных по степени их влияния на выходную. В одной из работ с целью отработки принятия решений об остановке добывающих скважин на воду на основе метода случайного поиска предлагается подход для оценки весовых коэффициентов. В качестве переменных рассматривались те же факторы, учитывающие давление, обводненность скважин, остаточную нефтенасыщенность. Целью использования этого алгоритма является повышение точности принятия решения о выборе скважины. Поскольку вес фактора или важность признака являются частью расчета, что определенно повлияет на конечный результат.

В работе [17] представлен метод вычисления оценок значимости факторов линейных регрессионных моделей. В работе [18] оценку значимости факторов в регрессионной модели производят посредством вычисления вкладов независимых факторов. В качестве объекта анализа в данной работе выступают факторы, характеризующие геолого-физические условия и технологический процесс, оказывающие совместное влияние на показатели эффективности водоизоляционных работ (выходные переменные).

Оценки вкладов указанных факторов в регрессионных моделях (6)–(9) находим с помощью выражения [18]

$$\alpha_i = \frac{100\% |a_i x_i^*|}{\sum_{j=1}^2 |a_j x_j^*|}, \quad (10)$$

где x_j^* — максимальное на всей выборке значение j -й переменной.

Результаты расчетов весовых вкладов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчетов весовых вкладов

Модель	Весовой вклад											
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
Y_1	1	3,7	21,9	21,6	2,1	5,3	2,1	0,3	21,5	10,4	0,3	9,8
Y_2	2	0,6	11,4	15,3	5,2	0,8	4,6	6,8	41	6,6	1	4,9
Y_3	7	1,9	18,6	21	6,5	3,8	3,9	9,8	5,5	12,9	0,52	8,6
Y_4	0,2	2,79	22,64	31,89	8,32	0,93	0,2	0,41	17,58	11,87	1,70	1,41

Согласно данным таблицы, наибольший вклад в значения показателей эффективности мероприятий по ограничению водопритоков вносят такие факторы, как пластовое давление, забойное давление, вязкость нефти в пластовых условиях, обводненность, длина фильтра [16].

После полученных уравнений регрессии устанавливается степень соответствия расчетных значений фактическим. Количественная оценка степени соответствия определяется мерой идентичности согласно следующей формуле, значения которой должны изменяться в пределах от нуля до единицы:

$$I = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{расч } i} - Y)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{расч } i} - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

Результаты проведенных расчетов и оценка погрешностей показали достаточную достоверность построенных моделей.

Полученные уравнения позволили установить степень влияния каждого фактора в рассмотренных в данном случае пределах его изменения на продолжительность эффекта изоляции, количество дополнительно добытой нефти, объем ограниченной воды (см. табл. 3).

Как показал анализ, на количество дополнительно добытой нефти Y_2 наибольшее влияние оказывают определяющие ее значимость факторы: на первом месте обводненность — 41 %, далее по степени влияния следуют забойное и пластовое давления — соответственно 15,3 и 11,4 %, дебит скважины по воде — 6,8 %, длина фильтра — 6,6 % и т. д. На объем ограниченной воды Y_3 наибольшее влияние оказывают прежде всего забойное и пластовое давления — соответственно 21 и 18,6 %, затем длина фильтра — 12,9 %, далее дебит скважины по воде — 9,8 % и т. д.

На прибыль по скважине с учетом стоимости полимера Y_4 на первом месте по степени влияния идут забойное и пластовое давления — соответственно 31,89 и 22,64 %, далее следуют обводненность — 17,58 %, длина фильтра — 11,87 %, вязкость нефти в пластовых условиях — 8,32 % и т. д.

Для определения в целом общей оценки влияния каждого фактора на эффективность изоляции водопритоков полимерными растворами воспользуемся подходом, ранее примененным в работе [19].

Принятие решений по выбору технологии водоизоляционных работ

Исходя из постановки и необходимости решения нашей задачи, задача в данном случае представляет собой принятие решений в условиях неопределенности. Это обосновывается многокритериальностью и многофакторностью. Как следует из вышеприведенного анализа, в данном случае необходимо принять такое решение, которое удовлетворяло бы всем четырем критериям, а именно оно (решение) должно отражать такой комплекс технологических вариантов, который для данных геологических условий позволит добиться максимальных продолжительности эффекта; дополнительной добычи нефти; объема ограниченной воды; прибыли по скважине с учетом стоимости полимера. Для этого вначале проводились расчеты по полученным моделям, наилучшие варианты определялись с помощью отмеченных четырех критериев (представляющих собой цели и ограничения) с применением теории нечетких множеств, предложенной Л. Заде. Согласно положениям этой теории, оценивались функции принадлежности множеств целей и ограничения, исходя из стремления добиться максимума каждого критерия, в связи с чем максимальному значению каждого из них ставилось в соответствие значение функции принадлежности близкое к единице. Выражение для определения функций принадлежности имеет следующий вид:

$$\mu_i = \frac{1}{1 + 9e^{-ay_i}} \quad (12)$$

Определены значения параметра a выражения (12) для каждого из критериев, соответствующие выражения приведены в таблице 4, по ним выполнены расчеты функций принадлежности.

Для принятия решения находятся функции принадлежности множества решений. Каждая из приведенных в таблице функций принадлежности является «функцией принадлежности множества целей (или ограничений)». Множество решений, согласно теории нечетких множеств, представляет собой множество, являющееся пересечением этих множеств. Пересечением нечетких множеств называют некоторое нечеткое множество, функция принадлежности которого для данного случая выглядит следующим образом:

$$\mu_D = \min(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4). \quad (13)$$

В таблице 4 в последнем столбце показаны значения функций принадлежности множества решений, каждая строка которого представляет собой наименьшее значение среди множеств принадлежности критериев. Оптимальным решением будет (выделено жирным начертанием)

строка, соответствующая наибольшему значению функции принадлежности множества решений.

Таким образом, наибольшее значение функции принадлежности множества решений в совокупности расчетных данных соответствует наилучшему решению, которое соответствует пятой строке таблицы 1.

Таблица 4

Показатели эффективности мероприятий по ограничению водопритоков и соответствующие функции принадлежности

Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	$\mu_1 = \frac{1}{1 + 9e^{-0,74y_1}}$	$\mu_2 = \frac{1}{1 + 9e^{-0,12y_2}}$	$\mu_3 = \frac{1}{1 + 9e^{-0,11y_3}}$	$\mu_4 = \frac{1}{1 + 9e^{-0,006y_4}}$	$\mu_D = \min(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4)$
8	37,1	48	257,1	0,975722	0,899162	0,963551	0,361174	0,361
4	32,3	75	714,9	0,678784	0,834876	0,998261	0,911067	0,679
6	30,6	27	1 141,2	0,902111	0,805284	0,706975	0,993467	0,707
9	34,5	11	542,2	0,988225	0,867683	0,280246	0,774495	0,28
7	29,2	45	646,3	0,950605	0,778022	0,94944	0,869054	0,778
6	28,3	21,8	626,3	0,902111	0,759108	0,571493	0,853967	0,571
2	18,8	241	1 216,1	0,326399	0,506227	1	0,995923	0,326
14	39,5	22	574,2	0,9997	0,922128	0,577067	0,807891	0,577
7	33,1	18	875,2	0,950605	0,847503	0,463752	0,965813	0,464
5	24,7	35	568	0,815258	0,673109	0,857261	0,801728	0,673

Выводы

Выполненный анализ показал, что с изменением одной группы геолого-физических, технических и технологических факторов, характеризующих ПЗС, скважину и технологию обработки, значения показателей, выбранных в качестве критериев эффективности изоляции водопритоков полимерными растворами, увеличиваются, с изменением другой группы факторов — снижаются, а с изменением третьей группы факторов увеличение или снижение значений носит избирательный характер. Например, увеличение проницаемости и расчлененности пласта, пластового давления, вязкости нефти в пластовых условиях, текущего КИН и охвата ПЗС полимерным раствором приводит к росту, а увеличение забойного давления, дебитов скважины по нефти и воде, обводненности, длины фильтра и количества полимера на 1 м фильтра — к снижению продолжительности эффекта

изоляции водопритоков. Точно так же можно оценить влияние факторов на другие показатели эффективности водоизоляционных работ.

Подытоживая результаты исследований, можно сформулировать следующие выводы.

1. Выполнен анализ изменения показателей эффективности технологии ограничения водопритоков, даны оценки параметрам исследуемых зависимостей — продолжительности эффекта; дополнительной добычи нефти; объема ограниченной воды; прибыли по скважине с учетом стоимости полимера путем рассмотрения их в качестве функций геолого-физических условий и технологических мероприятий. В результате статистического анализа построены зависимости отмеченных показателей от характеристик геолого-физических условий и технологических мероприятий.

2. Разработан и реализован алгоритм оценки оптимальных решений по четырем критериям на основе информации о геолого-физических условиях месторождения и опыте внедрения геолого-технических мероприятий по ограничению водопритоков, включающий анализ факторов, их весовой вклад, статистическую оценку показателей достоверности, принятие решений с учетом неопределенности.

Список источников

1. Taha, A. Overview of Water Shutoff Operations in Oil and Gas Wells; Chemical and Mechanical Solutions / A. Taha, M. Amani. – Text : electronic // ChemEngineering. – 2019. – Vol. 3, Issue 2. – URL: <https://doi.org/10.3390/chemengineering3020051>.

2. Ahmad, N. Comprehensive Diagnostic and Water Shut-off in Open and Cased Hole Carbonate Horizontal Wells / N. Ahmad, H. Al-Shabibi, S. Malik. – Text : electronic // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and conference, Abu Dhabi, UAE, 11–12 November 2012. – URL: <https://doi.org/10.2118/162287-MS>.

3. Extracting Lessons Learned of 35 Water Shut-off Jobs in Mature Fields to Improve Success Ration of Water Shut-off Job / D. Permana, G. Ferdian, M. Aji, E. Siswati. – Text : electronic // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Bali, Indonesia, 20–22 October 2015. – URL: <https://doi.org/10.2118/176191-MS>.

4. Кучин, В. Н. Обоснование и разработка вязкоупругих систем и технологии изоляции водопроявляющих пластов при бурении скважин : специальность 25.00.15 «Технология бурения и освоения скважин» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кучин Вячеслав Николаевич ; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2021. – 104 с. – Текст : непосредственный.

5. Абасов, М. Т. Повышение эффективности ограничения водопритоков в нефтяных скважинах : монография / М. Т. Абасов, А. С. Стреков, Г. М. Эфендиев. – Баку : Nafta-Press, 2009. – 256 с. – Текст : непосредственный.

6. Sydansk, D. Reservoir Conformance Improvement / D. Sydansk, L. Romero-Zeron. – 1st edition. – Richardson : Society of Petroleum Engineers, 2011. – 138 p. – Direct text.

7. Guo, B. Petroleum Production Engineering a Computer-Assisted Approach / B. Guo, W. C. Lyons, A. Ghalambor. – DOI 10.1016/B978-0-7506-8270-1.X5000-2. – Oxford : Gulf Professional Publishing, 2007. – 312 p. – Direct text.
8. Understanding Excessive Water Production in Highly Faulted Mature Gas Condensate Field : From Well Operations to Revival of Integrated History Matching / M. Fayzullin, P. Toppel, J. Gonzalez, S. Egger. – Text : electronic // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Bangkok, Thailand, 25–27 August 2014. – URL: <https://doi.org/10.2118/170548-MS>.
9. Xue, L. Status and Prospect of Improved Oil Recovery Technology of High Water Cut Reservoirs / L. Xue, P. Liu, Y. Zhang. – Text : electronic // Water. – 2023. – Vol. 15, Issue 7. – URL: <https://doi.org/10.3390/w15071342>.
10. Li, X. Review on polymer flooding technology / X. Li, F. Zhang, G. Liu. – Text : electronic // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 675. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012199>.
11. Zeinijahromi, A. Controlling Excessive Water Production Using Induced Formation Damage / A. Zeinijahromi, P. Bedrikovetski. – Text : electronic // SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, Budapest, Hungary, 3–5 June 2015. – URL: <https://doi.org/10.2118/174229-MS>.
12. Gharbi, R. The Potential of a Surfactant/Polymer Flood in a Middle Eastern Reservoir / R. Gharbi, A. Alajmi, M. Algharaib. – DOI 10.3390/en5010058. – Direct text // Energies. – 2012. – Vol. 5, Issue 1. – P. 58–70.
13. El-Karsani, K. S. Polymer Systems for Water Shutoff and Profile Modification: A Review Over the Last Decade / K. S. El-Karsani, G. A. Al-Muntasheri, I. A. Hussein. – DOI 10.2118/163100-PA. – Direct text // SPE Journal. – 2014. – Vol. 19, Issue 01. – P. 135–149.
14. Swellable Packer Fluids Designed for Zonal Isolation in Openhole Completions / M. Offenbacher, B. Gadiyar, D. Messler [et al.]. – Text : electronic // SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, Budapest, Hungary, 3–5 June 2015. – URL: <https://doi.org/10.2118/174181-MS>.
15. Эпов, И. Н. Потокоотклоняющие технологии как метод увеличения нефтеотдачи в России и за рубежом / И. Н. Эпов, О. П. Зотова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12 (часть 4) – С. 806–810.
16. Modeling and Adoption of Technological Solutions in Order to Enhance the Effectiveness of Measures to Limit Water Inflows into Oil Wells under Conditions of Uncertainty / G. Z. Moldabayeva, G. M. Efendiyev, A. L. Kozlovskiy [et al.]. – DOI 10.3390/chemengineering7050089. – Text : electronic // ChemEngineering. – 2023. – Vol. 7, Issue 5. – URL: <https://doi.org/10.3390/chemengineering7050089>.
17. Моисеев, Н. А. Вычисление истинного уровня значимости предикторов при проведении процедуры спецификации уравнения регрессии / Н. А. Моисеев. – DOI 10.21686/2500-3925-2017-3-10-20. – Текст : непосредственный // Статистика и Экономика. – 2017. – № 3. – С. 10–20.
18. Носков, С. И. Сравнительная оценка значимости предикторов при использовании различных методов идентификации параметров регрессионной модели / С. И. Носков. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-228-231. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 228–230.
19. Strekov, A. S. Decisions-making on the choice of geological and technical measures under uncertainty / A. S. Strekov, P. Z. Mamedov, A. I. Koyschina. – Direct text // Seventh International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control, Izmir, Turkey, 2–3 September 2013. – P. 381–384.

References

1. Taha, A., & Amani, M. (2019). Overview of Water Shutoff Operations in Oil and Gas Wells; Chemical and Mechanical Solutions. *ChemEngineering*, 3(2). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/chemengineering3020051>
2. Ahmad, N., Al-Shabibi, H., & Malik, S. (2012). Comprehensive Diagnostic and Water Shut-off in Open and Cased Hole Carbonate Horizontal Wells. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and conference, Abu Dhabi, UAE, November, 11-12, 2012. (In English). Available at: <https://doi.org/10.2118/162287-MS>
3. Permana, D., Ferdian, G., Aji, M., & Siswati, E. (2015). Extracting Lessons Learned of 35 Water Shut-off Jobs in Mature Fields to Improve Success Ration of Water Shut-off Job. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Bali, Indonesia, October, 20-22, 2015. (In English). Available at: <https://doi.org/10.2118/176191-MS>
4. Kuchin, V. N. (2021). Obosnovanie i razrabotka vyazkouprugikh sistem i tekhnologii izolyatsii vodoproyavlyayushchikh plastov pri burenii skvazhin. Diss. ... kand. techn. nauk. St. Petersburg, 104 p. (In Russian).
5. Abasov, M. T., Strelkov, A. S., & Efendiev, G. M. (2009). Povyshenie effektivnosti ogranicheniya vodopritokov v neftyanykh skvazhinakh. Baku, Nafta-Press Publ., 256 p. (In Russian).
6. Sydansk, D., & Romero-Zeron, L. (2011). Reservoir Conformance Improvement. 1st edition. Richardson, Texas, Society of Petroleum Engineers Publ., 138 p. (In English).
7. Guo, B., Lyons, W. C., & Ghalambor, A. (2007). Petroleum Production Engineering a Computer-Assisted Approach. Oxford, Gulf Professional Publishing, 312 p. (In English). DOI: 10.1016/B978-0-7506-8270-1.X5000-2
8. Fayzullin, M., Tippel, P., Gonzalez, J., & Egger, S. (2014). Understanding Excessive Water Production in Highly Faulted Mature Gas Condensate Field: From Well Operations to Revival of Integrated History Matching. Presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Bangkok, Thailand, August, 25-27, 2014. (In English). Available at: <https://doi.org/10.2118/170548-MS>
9. Xue, L., Liu, P., & Zhang, Y. (2023). Status and Prospect of Improved Oil Recovery Technology of High Water Cut Reservoirs. *Water*, 15(7). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/w15071342>
10. Li, X., Zhang, F., & Liu, G. (2021). Review on polymer flooding technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 675. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012199>
11. Zeinijahromi, A., & Bedrikovetski, P. (2015). Controlling Excessive Water Production Using Induced Formation Damage. SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, Budapest, Hungary, June, 3-5, 2015. (In English). Available at: <https://doi.org/10.2118/174229-MS>
12. Gharbi, R., Alajmi, A., & Algharaib, M. (2012). The Potential of a Surfactant/Polymer Flood in a Middle Eastern Reservoir. *Energies*, 5(1), pp. 58-70. (In English). DOI: 10.3390/en5010058
13. El-Karsani, K. S., Al-Muntasheri, G. A., & Hussein, I. A. (2014). Polymer Systems for Water Shutoff and Profile. Modification: A Review Over the Last Decade. *SPE Journal*, 19(01), pp. 135-149. (In English). DOI: 10.2118/163100-PA
14. Offenbacher, M., Gadiyar, B., Messler, D., Krishnamoorthy, S-R., & Abasher, D. (2015). Swellable Packer Fluids Designed for Zonal Isolation in Openhole Completions. SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, Budapest, Hungary, June, 3-5, 2015. (In English). Available at: <https://doi.org/10.2118/174181-MS>

15. Eпов, I. N., & Zotova, O. P. (2016). Flow diverting technologies as a method of enhanced oil recovery in Russia and abroad. *Fundamental Research*, (12(part 4)), pp. 806-810. (In Russian).

16. Moldabayeva, G. Z., Efendiyev, G. M., Kozlovskiy, A. L., Buktukov, N. S., & Abbasova, S. V. (2023). Modeling and Adoption of Technological Solutions in Order to Enhance the Effectiveness of Measures to Limit Water Inflows into Oil Wells under Conditions of Uncertainty. *ChemEngineering*, 7(5). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/chemengineering7050089>

17. Moiseev, N. A. (2017). Calculating the true level of predictors significance when carrying out the procedure of regression equation specification. *Statistics and Economics*, (3), pp. 10-20. (In English). DOI: 10.21686/2500-3925-2017-3-10-20

18. Noskov, S. I. (2021). Comparative estimation of the significance of the predictors using different methods for identification of the parameters of the regression model. *Izvestiya Tula State University. Tekhnicheskie nauki*, (9), pp. 228-230. (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-228-231

19. Strekov, A. S., Mamedov, P. Z., Koysheva, A. I. (2013). Decisions-making on the choice of geological and technical measures under uncertainty. *Seventh International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control*, Izmir, Turkey, September, 2-3, 2013, pp. 381-384. (In English).

Информация об авторах / Information about the authors

Эфендиев Галиб Мамед оглы,
доктор технических наук, член-корреспондент Национальной Академии наук Азербайджана, профессор, Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика

Galib M. Efendiyev, Doctor of Engineering, Corresponding Member of Azerbaijan National Academy of Sciences, Professor, Institute of Oil and Gas of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, the Republic of Azerbaijan

Молдабаева Гульназ Жаксылыковна,
доктор технических наук, профессор кафедры нефтяной инженерии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан, g.moldabayeva@satbayev.university

Gulnaz Zh. Moldabayeva, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan, g.moldabayeva@satbayev.university

Бастриков Сергей Николаевич,
доктор технических наук, действительный член Российской академии естественных наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Sergey N. Bastrikov, Doctor of Engineering, Full Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen

Кирисенко Олег Георгиевич, доктор философии по техническим наукам, Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика

Сыздыков Аскар Хамзаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры нефтяной инженерии, директор Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

Тузельбаева Шолпан Рыскулбековна, докторант кафедры нефтяной инженерии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

Балуанов Бакытжан Айтуарович, докторант кафедры нефтяной инженерии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

Oleg G. Kirisenko, PhD in Engineering, Institute of Oil and Gas of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, the Republic of Azerbaijan

Askar Kh. Syzdykov, Candidate of Engineering, Professor at the Department of Petroleum Engineering, Director of the Geology and Oil-gas Business Institute named after K. Turyssov, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

Sholpan R. Tuzelbayeva, Doctoral Student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

Bakytzhan A. Baluanov, Doctoral Student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 17.10.2023; принята к публикации 23.10.2023.

The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 17.10.2023; accepted for publication 23.10.2023.