

АННОТАЦИЯ

Актуальность работы. Для успешного применения технологий ограничения водопритоков и методов регулирования процесса разработки, повышающих эффективность мероприятий по борьбе с обводненностью, необходимы комплексные исследования, включающие анализ геолого-физических условий, изучение реологических и фильтрационных характеристик применяемых составов. Последнее требует постановки, планирования и проведения экспериментальных исследований.

Таким образом, наличие целого ряда проблем, связанных с высокой обводненностью добываемой продукции и недостаточной эффективностью технологий ограничения водопритока, свидетельствует об актуальности данной проблемы, обуславливает необходимость постановки и проведения исследований по установлению причин водопроявлений, совершенствованию технологии и составов применяемых систем для водоизоляционных работ. Увеличение эффективности водоизоляционных работ возможно при тщательном изучении и определении соответствия геолого-технических условий для применения той или иной технологии, а также за счет изучения, совершенствования и применения составов с относительно лучшей изолирующей способностью.

Цель исследования. Повышение эффективности водоизоляционных работ при эксплуатации скважин на основе моделирования и принятия решений с учетом неопределенности.

Задачи исследования

- анализ и обобщение современных представлений о состоянии и сравнительной эффективности технологий водоизоляционных работ;
- экспериментальное исследование реологических характеристик и изолирующей способности составов на полимерной основе в различной среде;
- обоснование критериев, определяющих возможность и эффективность применения осадкогелеобразующих составов для водоизоляционных работ, моделирование их с учетом основных геолого-физических и технико-технологических факторов;
- исследование влияния геолого-физических факторов на показатели эффективности изоляционных работ и разработка технологических решений по повышению эффективности ограничения водопритоков;
- разработка и реализация практических рекомендаций по ограничению водопритоков.

Методы решения задачи.

Поставленные задачи решались методом экспериментальных исследований с применением методики планирования экспериментов. При обработке данных экспериментальных исследований, промысловых данных и анализе информации применялись методы, известные из математической статистики. Принятие решений производилось с применением положений теории нечетких множеств.

Объектом исследования является проблема водопритоков в скважину.

Предметом исследования являются моделирование и принятие решений при организации и проведении водоизоляционных работ.

Научная новизна диссертации

- установлена зависимость фактора остаточного сопротивления от концентрации полимерного раствора и проницаемости среды и получено аналитическое выражение

этой зависимости;

- получено выражение для определения концентрации полимерного раствора, исходя из условия обеспечения максимального значения фактора остаточного сопротивления;
- получены зависимости показателей эффективности водоизоляционных работ от различных геологических и технологических факторов;
- путем постановки многокритериальной задачи разработана схема принятия решений водоизоляционных работ с учетом неопределенности.

Положения, выносимые на защиту:

- выражения для определения необходимой концентрации полимерного раствора, обеспечивающего максимальную изоляционную способность, и оценки влияния состава применяемых композиций на их реологические характеристики;
- модели и метод принятия решений по ограничению потоков воды в условиях неопределенности;
- способ и устройство добычи нефти из обводненных скважин.

Научно-практическая ценность работы

Фактор сопротивления раствора полимера подвержен влиянию ряда факторов: концентрации полимера, петрофизических характеристик пласта, поровой структуры породы, реологических характеристик раствора и др. В работе экспериментальным путем рассмотрено влияние концентрации ПАА, проницаемости породы на фактор остаточного сопротивления. Проведенные экспериментальные исследования позволяют развить представления о закономерностях влияния отмеченных факторов на фактор сопротивления. Результаты исследований позволяют целенаправленно выбирать как рецептуры композиционных систем, так и технологию их применения для повышения эффективности добычи нефти и ограничения водопритоков в конкретных геолого-физических условиях.

Проведенные исследования позволили предложить технологическую схему промысловых работ и метод управления зоной осадкообразования при создании водоизолирующих экранов на основе осадкогелеобразующих составов в призабойной зоне нефтяных скважин.

Использование разработанных моделей позволяет подобрать для конкретных условий такую технологию обработки призабойной зоны скважины осадкогелеобразующими составами, которая обеспечит для данных геолого-технических условий максимальный технологический и экономический эффект.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечены современными методами и средствами исследований, использованием статистических методов обработки информации, подтверждением теоретических положений экспериментальными данными.

Основная идея работы.

Анализ влияния геологофизических и технологических факторов на показатели эффективности водоизоляционных работ и принятие технологических решений с применением осадкогелеобразующих составов.

Личный вклад автора заключается в анализе поставленной проблемы и постановке задач исследований обработке данных и анализе информации полученных экспериментально и путем промысловых наблюдений.

Следует отметить что к настоящему времени накопилась большое количество исследований, свидетельствующих о серьезности данной проблемы и связанным с этим вниманием исследователей к данному вопросу. Выполнены различные экспериментальные и промысловые исследования. Изучены механизмы изоляции пластов с помощью различных составов в том числе на основе полимеров. В последние годы стали уделять серьезное внимание применению осадкогелеобразующих составов.

Как показал анализ выполненных работ, для успешного применения технологий ограничения водопритоков и методов регулирования процесса разработки, повышающих эффективность мероприятий по борьбе с обводненностью, необходимы анализ геолого-физических условий, изучение реологических и фильтрационных характеристик применяемых составов. Последнее требует постановки, планирования и проведения экспериментальных исследований. Приведенный выше обзор исследований позволил установить причины возникновения водопритоков в скважинах. Как показывают исследования, причин возникновения водопритоков, много. К числу основных причин следует также причислить многопластовость, неоднородность по петрофизическим характеристикам, в частности, проницаемости и нефтенасыщенности, наличие в продуктивных горизонтах высоковязкой нефти, высокие темпы отбора жидкости, технологические нарушения и др. В то же время выполненный обзор позволил разработать систематическую основу для решения проблемы, связанной с водопритоками, подобрать методы и методические подходы к проведению исследований, говоря другими словами, осмыслить и выработать методологию намечаемых исследований, которая позволит в рамках целостной системы обосновать и сформулировать цель и задачи, объект и предмет исследований и тем самым четко поставить и дать ответы в процессе исследований на вопросы «что исследуется?», «почему исследуется?», «как исследуется?». Необходимо уяснить, каков метод исследования, какими инструментами собираемся пользоваться и т.д.

Прежде чем дать ответ на эти и другие вопросы, необходимо дать оценку в обобщенном виде современному состоянию изученности проблемы, установить те вопросы и задачи, которые требуют своего рассмотрения. Данный анализ приводится в работе.

Следует отметить высокую технологическую эффективность от комплексного воздействия (в добывающих и нагнетательных скважинах) наместорождении РК с использованием гелеобразующих технологий, позволившего снизить обводненность добывающих скважин на участке до 20%. В этих условиях актуальным является исследование материалов и разработка эффективных составов для водоизоляционных и потоковыравнивающих работ в добывающих и нагнетательных скважинах, а также прогнозирование технологической эффективности мероприятий по снижению обводненности добываемой нефти на рассматриваемых объектах разработки.

Таким образом, подводя итог приведенному обзору, в работе сформулированы выводы позволившие наметить цель и задачи исследований. Выбор наилучшей технологии требует анализа и построения моделей, позволяющих успешно осуществлять принятие технологических решений. В этой связи, получение, анализ информации и принятие решений в отмеченных условиях представляют интерес, что и обосновывает постановку цели Исходя из этого, в диссертационной работе выполнены исследования, которые позволили обосновать возможность оценки влияния проницаемости среды и концентрации полимерного

раствора на фактор остаточного сопротивления и установить зависимость его от концентрации полимерного раствора и проницаемости среды. По результатам статистической обработки данных получено аналитическое выражение зависимости фактора сопротивления от проницаемости среды и концентрации полимерного раствора в следующем виде

$$R_{\text{ост расч}} = 19.959 \times C^{0.4287} \times K_{\text{пр}}^{-0.8453} \quad (1)$$

Основным моментом применения полимерных растворов является обоснование и выбор концентрации реагента. Предложено выражение для определения концентрации полимерного раствора, исходя из условия обеспечения максимального значения фактора остаточного сопротивления:

$$C = 0.5 \times K_{\text{пр}} , \quad (2)$$

где $K_{\text{пр}}$ -коэффициент проницаемости, мкм²

Третий раздел диссертации посвящен исследованию реологических и фильтрационных характеристик осадкогелеобразующих составов. Изучалось влияние компонентов, входящих в осадкогелеобразующий состав, на механизм образования осадка. Были обработаны результаты экспериментальных исследований

При этом строились зависимости количества осадка от концентрации щелочи при постоянных значениях концентрации ПАА, приведенных в таблице. Устанавливалась аналитическая зависимость количества осадка от концентрации щелочи для разных случаев. Далее определяется зависимость параметров этого выражения от концентрации ПАА. Таким образом, получаем зависимость количества осадка от концентраций щелочи и ПАА в виде $v=f(k\text{NaOH}, k\text{ПАА})$.

Далее приводятся результаты расчетов. Путем статистической обработки получены аппроксимации каждой из приведенных на рисунке зависимостей. Наиболее подходящей в данном случае и общей для всех случаев является зависимость в виде степенной, выраженной следующим образом:

$$V_{\text{ос}} = aC_{\text{NaOH}}^b , \quad (4)$$

где параметр b зависит от концентрации полиакриламида.

Для получения обобщенной зависимости объема выпавшего осадка от концентраций щелочи и ПАА, установлена зависимость параметра b от концентрации ПАА. В результате получена зависимость объема осадка от концентраций щелочи и полиакриламида в следующем виде:

$$V_{\text{ос}} = 0,3289 \cdot C_{\text{NaOH}}^{0,0716 \cdot e^{11,582 \cdot C_{\text{ПАА}}}} \quad (5)$$

Выполнены расчеты по данному выражению и сравнение с фактическими экспериментальными значениями показало их достаточное совпадение.

Были изучены реологические характеристики применяемых ОГОС. Ранее проведенные исследования показали, что по своим реологическим особенностям отмеченные составы подчиняются модели степенному закону Оствальда-Де Ваале.

Данная модель, как известно выражается следующим образом:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n , \quad (3.3)$$

где τ - напряжение сдвига, Па; k - коэффициент консистентности, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ - градиент скорости сдвига, с⁻¹; n - **показатель течения**. Параметры этих зависимостей в свою очередь зависят от концентраций щелочи и полимера, а также температуры. Показано, что физико-химические свойства и характер течения осадкогелеобразующих составов зависят от концентраций полимера и щелочи, температуры и минерализации воды, причем при малых концентрациях полимера состав проявляет ньютоновский характер. Выполнено моделирование реологических характеристик осадкогелеобразующих составов с учетом состава и среды-концентрации различных компонентов (полимера, щелочи), температуры, получены выражения, характеризующие зависимость реологических констант от температуры, концентраций полимера и щелочи.

Исследовано влияние концентраций щелочи и ПАА на значения этих параметров, в результате чего получены следующие выражения

$$k = 0,1837 \cdot C_{\text{ПАА}}^{-0,598} \cdot C_{\text{NaOH}}^{-0,306} \cdot t^{-1,118}$$

$$n = 1,0712 \cdot C_{\text{ПАА}}^{0,1} \cdot C_{\text{NaOH}}^{0,027} \cdot t^{0,052}$$

Приведенные зависимости обрабатывались статистическими методами с оценкой тесноты связи и адекватности согласно соответствующим критериям. Сравнение расчетных и экспериментальных значений показало достаточную их сходимость.

Четвертый раздел посвящен принятию технологических решений. С этой целью собраны, обработаны и проанализированы результаты обработок ПЗС 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: 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 мес. до обработки скважины полимером, обводненность продукции x_9 , длина фильтра скважины x_{10} (табл.1). В качестве критериев, характеризующих эффект изоляции водопритоков при обработке ПЗС раствором на основе полимера, выбраны: продолжительность эффекта изоляции Y_1 , количество дополнительно добытой нефти Y_2 , объем ограниченной воды Y_3 , прибыль по скважине с учетом стоимости полимера Y_4 . При анализе и уточнении на каком-то этапе моделей удобнее пользоваться выражениями в мультипликативном виде. В результате этого получены следующие модели

$$Y_1 = 122,504 \frac{x_1^{0,0279} x_2^{0,2117} x_3^{0,8552} x_5^{0,1911} x_6^{0,2134} x_{12}^{0,5022}}{x_4^{0,8354} x_7^{0,1116} x_8^{0,0122} x_9^{1,0794} x_{10}^{0,6955} x_{11}^{0,0266}} \quad (6)$$

дополнительной добычи нефти:

$$Y_2 = 10258,863 \frac{x_2^{0,0199} x_3^{0,2676} x_5^{0,2869} x_8^{0,1664} x_{12}^{0,15}}{x_1^{0,0329} x_4^{0,3559} x_6^{0,0187} x_7^{0,1458} x_9^{1,2373} x_{10}^{0,2664} x_{11}^{0,0446}} \quad (7)$$

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:

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

В качестве объекта анализа в настоящей работе служат факторы, характеризующие геолого-физические условия и технологический процесс, оказывающие совместное влияние на показатели эффективности водоизоляционных работ (выходные переменные).

Даны оценки вкладов указанных факторов в регрессионные модели.

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

Результаты расчетов показали достаточную высокую степень идентичности.

Согласно постановке 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 выглядит в следующем виде:

$$\mu_i = \frac{1}{1 + 9e^{-ay_i}} \quad (13)$$

Определены значения параметра а выражения (13) для каждого из критериев, в результате получены следующие выражения:

продолжительности эффекта

$$\mu_1 = \frac{1}{1 + 9e^{-0.74y_1}}$$

дополнительной добычи нефти:

$$\mu_2 = \frac{1}{1 + 9e^{-0.12y_2}}$$

объема ограниченной воды:

$$\mu_3 = \frac{1}{1 + 9e^{-0.11y_3}}$$

прибыли по скважине с учетом стоимости полимера:

$$\mu_4 = \frac{1}{1 + 9e^{-0.006y_4}}$$

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:

$$\mu_D = \min(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4) \quad (14)$$

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

N	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	μ ₁	μ ₂	μ ₃	μ ₄	μ _D
1	8	37.1	48	257.1	0.975722	0.899162	0.963551	0.361174	0.361
2	4	32.3	75	714.9	0.678784	0.834876	0.998261	0.911067	0.679
3	6	30.6	27	1141.2	0.902111	0.805284	0.706975	0.993467	0.707
4	9	34.5	11	542.2	0.988225	0.867683	0.280246	0.774495	0.28
5	7	29.2	45	646.3	0.950605	0.778022	0.94944	0.869054	0.778
6	6	28.3	21,8	626.3	0.902111	0.759108	0.571493	0.853967	0.571
7	2	18.8	241	1216.1	0.326399	0.506227	1	0.995923	0.326
8	14	39.5	22	574.2	0.9997	0.922128	0.577067	0.807891	0.577
9	7	33.1	18	875.2	0.950605	0.847503	0.463752	0.965813	0.464
10	5	24.7	35	568	0.815258	0.673109	0.857261	0.801728	0.673

Основные выводы и рекомендации.

1. Как показал обзор публикаций, накопленных к настоящему времени, принятие решений, направленных на повышение эффективности водоизоляционных работ, значительно усложняется вследствие наличия различного рода неопределенностей, проявляющихся в виде многокритериальности и многофакторности процесса принятия решений, неоднозначности критериев, неточностей и неполноты входных данных, а также связанной с этим необходимостью обработки данных.
2. Как уже отмечалось, пластовые условия и насыщающие их флюиды представляют собой сложную систему, в которой присутствует неопределенность, как случайного, так и нечеткого характера, в связи с чем выбор того или иного метода представляет процедуру принятия решений в нечеткой среде.
3. По результатам статистической обработки данных получено аналитическое выражение зависимости фактора сопротивления от проницаемости среды и концентрации полимерного раствора.
4. Предложено выражение для определения концентрации полимерного раствора, исходя из условия обеспечения максимального значения фактора остаточного сопротивления; полученное выражение позволяет определить необходимую концентрацию в соответствии с проницаемостью пласта;

5. 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, другой - снижаются, а третьей - 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 1м фильтра - к снижению продолжительности эффекта изоляции водопритоков.

6. Увеличение расчлененности пласта, пластового давления, вязкости нефти в пластовых условиях, дебита скважины по воде и охвата ПЗС полимерным раствором приводит к росту, а увеличение проницаемости пласта, забойного давления, текущего КИН, дебита скважины по нефти, обводненности, длины фильтра и количества полимера на 1м фильтра - к снижению дополнительной добычи нефти. Точно также можно оценить влияние факторов на другие показатели эффективности водоизоляционных работ.

7. В результате выполненного анализа 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 путём рассмотрения их в качестве функций геолого-физических условий и технологических мероприятий. Построены зависимости отмеченных показателей от характеристик геолого-физических условий и технологических мероприятий.

8. Разработана методология, в рамках которой с применением методов математической статистики и нечеткой логики реализован алгоритм оценки оптимальных технологических 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, построение моделей, статистическая оценка показателей достоверности, принятие решений с учетом неопределенности.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих международных конференциях: The International Scientific and Practical Conference "Heydar Aliyev and Azerbaijan oil strategy: Advances in oil and gas geology and geotechnologies" (Baku, Azerbaijan, May 23-26, 2023) «Improvement of technological solutions for limiting water flows in producing wells in conditions of uncertainty»; на международной конференции «Сатпаевские чтения» на тему «Технология водоизоляции скважины с применением пакера водонабухающих эластомеров» (Алматы, 8-12 апреля 2023 г.); Alternative Energy Sources, Materials & Technologies (AESMT'18) First edition, Plovdiv, (Bulgaria 14-15 May 2018) «Numerical Analysis of the Near Wellbore Flow Mechanisms Controlling Well Productivity»; на международной конференции «Сатпаевские чтения» на тему «Моделирование технологий изоляции водопритоков и водоотведения в призабойной зоне нефтяных скважин» (Алматы, 10-12 апреля 2019 г.).

Научно исследовательские работы по данной тематике проводятся в рамках проекта «Жас галым» Грантового Финансирования Министерства Образования и Науки РК 2022–2024 г.г. №AP14971684 на тему «Совершенствование способа добычи нефти в обводненных скважинах и устройство для его осуществления».

Публикации. Основные положения работы представлены в 10 публикациях, в том числе в 2 изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК (Вестник КазНУ, Нефть и газ, Комплексное Использование Минерального Сырья). 2 статьи в зарубежных изданиях с ненулевым импакт-фактором, входящем в базу Scopus, «Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, № 1, «Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, № 3» - 5 статьи в материалах международных конференций