

УДК 622.276

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-4-3-14

Научная статья

EDN: XZMWHX

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРОЕКТА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С УЧЕТОМ РИСКА ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЗАПАСОВ

А.Х. ШАХВЕРДИЕВ, Ю.П. ПАНОВРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ),
МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Мониторинг большого числа месторождений углеводородного сырья в Российской Федерации показал существенное отклонение проектных показателей разработки от фактически достигнутых, что, несомненно, определяет высокий уровень риска, который может привести к нерациональности проекта и к серьезным коллизиям между собственником недр, инвестором и недропользователем. Многовариантность и многофакторность решаемой задачи определяются сложностью методики выбора варианта системы разработки нефтяной залежи. Проект считается устойчивым и рентабельным для сторон, если при возможных изменениях основных технологических параметров проекта (коэффициента извлечения нефти, газа, конденсата [КИН, КИГ, КИК] и его экономического составляющего – чистого дисконтированного дохода [ЧДД]) он оказывается финансово эффективным, а возможные неблагоприятные последствия устраняются мерами, предусмотренными организационными, технологическими и экономическими механизмами в рамках проекта. В процессе выбора оптимального варианта проектов разработки месторождений углеводородного сырья (УВС) необходимо учитывать неполноту и неточность используемой информации об условиях реализации проекта. Наиболее сложной задачей является априорное испытание чувствительности проекта при ожидаемом отклонении геологических и извлекаемых запасов от утвержденных в проекте запасов. Исследования, проводимые в рамках первого этапа, показали, что поиск оптимального решения возможен путем совместного учета и синтеза результатов вероятностно-статистических методов, методов теории игр, в том числе критерий Лапласа, критерий минимаксного риска Севиджа, критерий пессимизма-оптимизма Гурвица, критерий Ходжа-Лемана, критерий максимума ожидаемой полезности, а также их свертывания с использованием аппарата теории нечетких множеств Л. Заде и построения

Original article

SELECTION OF THE OPTIMAL PROJECT OPTION FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROCARBON FIELDS, TAKING INTO ACCOUNT THE RISK OF RESERVE DEVIATION

A.KH. SHAKHVERDIEV, YU.P. PANOVRUSSIAN STATE GEOLOGICAL
EXPLORATION UNIVERSITY NAMED AFTER
S. ORDZHONIKIDZE (MGRI), MOSCOW,
RUSSIAN FEDERATION

Monitoring of a large number of hydrocarbon fields in the Russian Federation has shown a significant deviation of project development indicators from the actually achieved ones, which undoubtedly determines a high level of risk that can't lead to rationality of the project and to serious collisions between the subsoil owner, investor and subsoil user. The multi-variability and multifactor nature of the problem to be solved determine the complexity of the methodology for selecting a variant of the oil deposit development system. The project is considered sustainable and profitable for the parties if, in case of possible changes in the main technological parameters of the project - oil, gas, condensate recovery factor [ORF, CIG, CIC] and its economic component - net discounted income [NDI] - it turns out to be financially effective, and possible adverse effects are eliminated by measures provided for by organizational, technological and economic mechanisms within the project. In the process of selecting the optimal variant of projects for the development of hydrocarbon deposits (HCS) it is necessary to take into account the incompleteness and inaccuracy of the used information about the conditions of the project implementation. The most difficult task is a priori testing of the project sensitivity under the expected deviation of geological and recoverable reserves from the reserves approved in the project. The research conducted within the framework of the first stage showed that the search for an optimal solution is possible by jointly taking into account and synthesising the results of probabilistic and statistical methods, game theory methods, including the Laplace criterion, Sevidge's minimax risk criterion, Hurwitz's pessimism-optimism criterion, Hodge-Lehman criterion, maximum expected utility criterion, as well as their convergence using the apparatus of L. Zadeh's fuzzy set theory and building a strategic decision-making scenario. The basis for such a decision,

стратегического сценария принятия решения. Основой такого решения являются результаты, рассчитанные с помощью геолого-гидродинамической модели объекта разработки, в том числе технологических и экономических показателей, сведенных в матрицы прибылей или риска. Выбор оптимального варианта разработки осуществлен на основе нечеткой логики расчетным подбором максимального значения функции принадлежности. На основе разработанной методики и программного продукта «ОПТИМАКС» обеспечивается выбор оптимального варианта проекта разработки углеводородной залежи.

Ключевые слова: выбор оптимального варианта проекта, коэффициент извлечения нефти, чисто дисконтированный доход, нечеткие множества, функция принадлежности, минимаксные принципы, геологические и извлекаемые запасы

«С возрастанием сложности точные утверждения становятся менее осмысленными, а осмысленные утверждения теряют точность».

А. Заде

ВВЕДЕНИЕ

Глобализация мировой экономики и сопровождающие эти процессы неопределенности и риски в области принятия глобальных и оперативных локальных решений привели к вторжению в прикладную науку новейших математических методов цифровизации, компьютерных технологий моделирования объектов и процессов, которые, в свою очередь, обеспечивают возможность решить возникшие сложные задачи в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Перспективы состоят в том, что удастся включить в этот сложный процесс прогрессивные методы математического аппарата: искусственный интеллект, нечеткую логику, фрактальную геометрию, теорию хаоса, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, теорию катастроф, игровые методы теории принятия решений, а также экспертные системы оценки оптимальности решений и рисков, составляющие основу новой парадигмы.

В замечательной монографии Питера Бернстайна «Против богов», посвященной «укрощению риска», автор лаконично отмечает, что «сущность управления риском состоит в максимизации набора обстоятельств, которые мы можем контролировать, и минимизации набора обстоятельств, контролировать которые нам не удастся и в рамках которых связь причины и следствия от нас скрыта» [3].

Следовательно, очевидны актуальность и востребованность проблем принятия решений в условиях неопределенности и недостаточности информации, чреватой большими рисками в сфере недропользова-

are the results calculated using a geological and hydrodynamic model of the development object, including technological and economic indicators, summarised in profit or risk matrices. The choice of the optimal development variant is carried out on the basis of fuzzy logic by computational selection of the maximum value of the belonging function. On the basis of the developed methodology and software product 'OPTIMAX' the selection of the optimal variant of the hydrocarbon deposit development project is provided.

KEY WORDS: selection of the optimal project variant, oil recovery factor, net discounted income, fuzzy sets, belonging function, minimax principles, geological and recoverable reserves

ния, в особенности при разработке месторождений жидкого и газообразного углеводородного сырья.

Как известно, нефтяная или газовая залежь со всеми наземными и подземными коммуникациями представляет собой сложную динамическую систему, анализ, диагноз, прогноз и управление которой основаны на мультидисциплинарном подходе теории больших и сложных систем. Важное значение для такой системы имеет признак целостности, подразумевающий не просто сумму составляющих его элементов. Решающим правилом здесь является то, что выделение или разделение на элементы возможно, потому что существует целое, а не наоборот [13, 26].

Исходя из общих соображений, система может быть структурно простой, но ее динамическое поведение – чрезвычайно сложным. Таким образом, большое количество скважин необязательно означает большую сложность системы и наоборот.

В случае, когда динамическое поведение системы претерпевает существенные изменения, возникают неопределенности, необратимости и неустойчивости. Однако динамическую систему в подобных условиях невозможно моделировать системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, точнее исследовать динамическую систему только детерминированными методами [13, 26, 33].

Все это связано с рядом принципиальных решений относительно методов оптимизации проектирования и управления разработкой нефтяных месторождений в условиях низкого качества и дефицита информации и, как следствие, характером и степенью рисков, возникающих из-за следующих факторов:

- ограничений в ходе физического моделирования лабораторных исследований;
- погрешностей, допущенных при промысловых сейсмических, комплекса геофизических, геологических и гидродинамических исследований;

– допущенных осреднений, ограничений и идеализации при математической формализации, геологическом и гидродинамическом моделировании объектов разработки;

– несовершенства нормативно-правовой базы проектирования месторождений жидкого и газообразного углеводородного сырья.

Следовательно, детерминированные многомерные, многофазные геолого-гидродинамические модели, направленные на описание сложного объекта и динамики процесса, не всегда адекватны в целях управления разработкой и долгосрочного прогноза основных показателей.

В процессе выбора оптимального варианта проектов разработки месторождений углеводородного сырья (УВС) необходимо учитывать неполноту и неточность используемой информации об условиях реализации проекта.

Такие ключевые показатели эффективности проекта, как конечный коэффициент извлечения УВС, чистый дисконтированный доход, внутренняя норма рентабельности, индекс доходности затрат, индекс доходности инвестиций, срок окупаемости, исчисленные с учетом факторов риска и неопределенности, именуются ожидаемыми. Они используются только для обоснования положительных или отрицательных решений для выбора лучшего из нескольких вариантов одного проекта. Поэтому эти показатели не являются ни минимально возможными, ни гарантированными, и не могут использоваться для установления каких-либо обязательств для участников проекта. Согласно основным положениям, методическим рекомендациям [4, 12], проект считается устойчивым и приемлемым для сторон, если при возможных изменениях основных технологических параметров проекта (коэффициента извлечения нефти, газа, конденсата [КИН, КИГ, КИК] и его экономического составляющего – чистого дисконтированного дохода [ЧДД]) он оказывается рентабельно реализуемым и эффективным, а возможные неблагоприятные последствия устраняются мерами, предусмотренными организационными, технологическими и экономическими механизмами в рамках проекта. И, соответственно, проект считается неустойчивым и неприемлемым для сторон, если при некоторых достаточно вероятных изменениях его основных технологических параметров или его экономической составляющей он оказывается финансово нереализуемым или приводит к последствиям, не отвечающим целям и интересам сторон.

Российская практика создания проектного документа на разработку нефтяного месторождения и методика выбора оптимального или рационального варианта проекта разработки осуществляется на основании нормативных документов и экспертизы [8, 17] и решения Центральной комиссии по разработке месторождений полезных ископаемых (ЦКР Роснедра).

Процесс выбора стратегии разработки нефтегазовых месторождений отличается зависимостью показателей и критериев оценки эффективности проектных решений от геолого-геофизической информации, структуры запасов, изменчивости природных условий, вероятностного характера большинства технико-экономических показателей разработки и формирования структуры капиталовложений. На основе этих особенностей формируются системы рисков, к основным из которых относятся следующие отклонения и ошибки:

- при расчетах геологических и извлекаемых запасов углеводородов;
- конечного коэффициента извлечения нефти, газа, конденсата;
- динамики текущей и накопленной добычи нефти, газа, конденсата;
- при прогнозе цен на углеводородные продукты и волатильности валютного рынка;
- при изменении капитальных вложений и сроков окупаемости инвестиций;
- целого ряда неверных технологических решений и форс-мажорных обстоятельств.

Последствия таких рисков в общем случае можно оценить потерями, которые могут иметь место при несоответствии проектных и технологических решений разработки месторождения ожидаемым экономическим результатам: чистому дисконтированному потоку наличности, внутренней норме доходности, индексу дисконтированной доходности затрат и инвестиций, сроку окупаемости инвестиций и другим экономическим критериям. Многовариантность и многофакторность решаемой задачи определяют сложность выбора системы разработки нефтяной залежи. При расчетах вариантов разработки на основе многомерных детерминированных геолого-гидродинамических моделей используются крайне ограниченные, часто косвенные и весьма приближенные сведения о залежах. Как следствие, низкая надежность получаемых данных ведет к регулярному уточнению проектных показателей разработки, пересчету балансовых геологических и извлекаемых запасов, текущего и конечного коэффициента извлечения нефти, газа и конденсата [1, 2, 6, 7, 9, 11, 14, 21, 30, 31, 34].

Для оценки проектов разработки нефтяных месторождений, как правило, используются следующие основные показатели экономической эффективности [17]:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- внутренняя норма рентабельности (ВНР);
- индекс доходности затрат;
- индекс доходности инвестиций;
- срок окупаемости.

Кроме того, в систему оценочных показателей включаются следующие показатели:

- капитальные вложения на освоение месторождения;

- эксплуатационные затраты на добычу нефти;
- доход государства (налоги и платежи, отчисляемые в бюджетные и внебюджетные фонды РФ).

Как правило, оценивается влияние следующих факторов риска, изменение которых может отражаться на эффективности проекта:

- объем добычи нефти;
- цены реализации нефти на внутреннем и внешнем рынках;
- объем капитальных вложений;
- объем текущих затрат и другие показатели.

На практике, как правило, рекомендуемый вариант разработки выбирается с большим запасом прочности, и поэтому проведенный анализ чувствительности остается устойчивым по отношению к нормативно установленным изменениям рисков. В реальности риски, связанные с подобным рода неопределенностью, сохраняются от проекта к проекту и отражаются на неоправданно низких значениях КИН.

Отметим некоторые особенности и недостатки вышеуказанного подхода при процедуре выбора оптимального варианта проекта рациональной разработки месторождений углеводородов.

Во-первых, проект разработки и содержащиеся в его основе геологическая и гидродинамическая модели объекта разработки рассчитываются исключительно на утвержденный государственным балансом запас углеводородного сырья (УВС) в соответствии с границами лицензионного участка. Целью проектного документа является достижение максимального чистого дисконтированного дохода и максимально возможного коэффициента извлечения нефти, газа и конденсата.

В соответствии с этими требованиями нормативных документов проект разработки залежи рассчитывается на весь срок разработки на утвержденный объем запасов. При этом протоколами ЦКР Роснедра основные показатели разработки утверждаются на существенно ограниченный срок – 3, 5, 7 лет – в зависимости от статуса проектного документа.

Следовательно, за всю историю разработки месторождения приходится составлять десяток новых проектных документов и дополнений к ним, и каждый раз без должной оценки возможного изменения в перспективе запасов и без априорной оценки риска, связанного с вероятными отклонениями утвержденных геологических и извлекаемых запасов.

Очевидно, что и геологические, и извлекаемые запасы за весь срок разработки объекта с высокой вероятностью будут изменяться в большую или меньшую сторону, зачастую эти изменения становятся существенными [11, 19, 21, 27].

Во-вторых, для полноценного учета факторов неопределенности и риска требуется производить расчеты не только показателей ожидаемой эффективности единственного избранного варианта проекта с боль-

шим запасом устойчивости, необходимо априорно анализировать чувствительность наиболее рискованных вариантов проекта разработки объекта, в первую очередь рассчитанную на существенное отклонение утвержденных в проекте запасов.

Таким образом, для нефтегазовой сферы достаточно ограничиться тремя нормированными показателями эффективности проекта разработки месторождений: одним экономическим – ЧДД, одним технологическим показателем – КИН и одним смешанным показателем – произведением КИН*ЧДД.

Исследования, проводимые в рамках первого этапа, показали, что поиск оптимального решения возможен путем совместного учета и синтеза результатов вероятностно-статистических методов, эвристических критериев, их свертывания с использованием аппарата теории нечетких множеств и построения стратегического сценария принятия решения. Основой такого решения являются результаты, рассчитанные с помощью геолого-гидродинамической модели объекта разработки, в том числе технологических и экономических показателей, сведенных в матрицы прибылей или риска. Выбор оптимального варианта разработки осуществляется на основе нечеткой логики расчетным подбором максимального значения функции принадлежности. При составлении технологической схемы или проекта разработки залежи углеводородов многие характеристики пласта известны с некоторой неопределенной погрешностью. В то же время такие показатели, как технология разработки, плотность сетки скважин [28], система воздействия (в том числе инновационные технологии повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти [22–25, 29, 32]) в существенной степени зависят от фильтрационно-емкостных свойств пласта. Поэтому необходимо выбрать такую стратегию действий, чтобы по возможности уменьшить риск, возникающий из-за принятого к реализации варианта проекта разработки залежи, который основан на исходных данных, содержащих существенные погрешности и неопределенности.

Критический анализ и синтез методов принятия решений в условиях неопределенности и риска на основе обзора отечественных и зарубежных источников [1–4, 6–9, 11–14, 17, 21, 26, 30, 31, 34] позволил установить, что в мировой практике используются различные методы оценки эффективности инвестиционных проектов в условиях риска и неопределенности, к наиболее распространенным из которых следует отнести следующие методы:

- метод корректировки ставки дисконтирования (премия за риск);
- метод достоверных эквивалентов (коэффициентов достоверности);
- анализ чувствительности показателей эффективности;

- метод сценариев;
- метод построения «дерева решений»;
- имитационное моделирование по методу Монте-Карло;
- методы теории статистического анализа (критерий Лапласа, Вальда, критерий минимаксного риска Севиджа, критерий пессимизма-оптимизма Гурвица, критерий Ходжа-Лемана, критерий максимума ожидаемой полезности);
- теория нечетких множеств Л. Заде.

Метод анализа чувствительности показателей эффективности проекта позволяет на количественной основе оценить влияние на проект изменения его главных показателей эффективности. Главный недостаток данного метода заключается в том, что в нем допускается изменение одного параметра проекта изолированно от всех остальных, т. е. все остальные параметры проекта остаются неизменными и равны спрогнозированным величинам и не отклоняются от них. Возможны обстоятельства, когда соображения о вероятностях стратегий расплывчаты, тогда выбор решения затруднителен и зависит от опыта и знания проектантов и экспертов и математической формализации их опыта и знаний.

ПРИМЕР ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРОЕКТА РАЗРАБОТКИ

Отклонение геологических и извлекаемых запасов в зависимости от категории и объема запасов по оценке экспертов может колебаться в среднем более 50% в большую или меньшую сторону по сравнению с утвержденными в проектных документах [11, 20, 21]. При применении статистических критериев, методов теории игр, теории вероятности и теории нечетких множеств, конкретизируемых на основе оценки степени и характера неопределенности, выбирается оптимальное решение. Выбор оптимального варианта системы разработки производится путем обработки исходных данных (рис. 1, табл. 1). Здесь ячейки матрицы заполнены значениями чистого дисконтированного дохода [ЧДД] для всех семи вариантов проекта при соответствующих отклонениях запасов. Результаты расчета приведены в таблице 2, по всем семи вариантам проекта получены 13 столбцов альтернатив оптимальности выбора проекта разработки по все критериям.

Параметр K определяет значение пессимизма, и при $K=1$ критерий Ходжа-Лемана сводится к критерию максимина Вальда, в связи чем этот критерий исключен из расчета. Варьируя K , можно достаточно четко подобрать нужное значение пессимизма, отражающее реальные желания разработчика. На основании исходных данных одного из месторождений в качестве примера составлена исходная матрица ЧДД на случай вероятного колебания запасов (табл. 1). Для удобства разнознаковые элементы нормируем исклю-

чительно в положительные, прибавив к каждому значению ЧДД поправочный коэффициент, равный 3671. Таким образом, без ущерба для конечной цели получается приведенная матрица в таблице 2.

В столбце 5 таблицы 2 также представлены КИН по всем семи вариантам только для утвержденного в проекте уровня запасов при нулевом отклонении.

Оптимальный вариант разработки находится в отдельности по каждому из значений K и соответствует максимальному значению критерия при данном K . Таким образом, в данном случае при $K=0,1$ и $0,2$ оптимальным вариантом является вариант №4. При $K=0,5, 0,8, 0,9$ оптимальным вариантом разработки является первый вариант. По всем критериям подобраны оптимальные альтернативы и выбраны 1 и 4 варианты проекта согласно оценке 13 критериев.

ОПТИМАЛЬНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА СОГЛАСНО ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Теория нечетких множеств достаточно точно моделирует процессы принятия решений и легко синтезируется с другими методами принятия решений в условиях неопределенности и риска, обусловленных недостаточностью и нечеткостью информации [5, 10, 15, 16, 18].

Нечеткая логика является системой, где дробные величины увеличивают способность теории множеств моделировать реальность, при этом применение теории нечетких множеств обусловило успехи искусственного интеллекта [5, 10, 15, 16, 18].

Необходимо различать случайность (randomness) и расплывчатость (fuzziness), причем последняя является основным источником неточности во многих процессах принятия решений. Под расплывчатостью подразумевается та неточность, которая связана с расплывчатыми множествами, то есть с классами, в которых нельзя указать границу, отделяющую элементы, принадлежащие к данному классу, и элементы, не принадлежащие к нему. По этой причине даже в тех случаях, когда расплывчатость в процессе принятия решений может быть представлена вероятностной моделью, обычно удобнее оперировать с ней методами теории расплывчатых множеств без привлечения аппарата теории вероятностей. Известно, что для методов теории вероятностей и математической статистики основное требование – это однородность выборки, свойство репликации и рандомизации.

Основное определение теории расплывчатых множеств по профессору Л. Заде гласит: $X = \{x\}$ – совокупность объектов (точек), обозначаемых через x . Тогда расплывчатое множество A в X есть совокупность упорядоченных пар (1).

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X, \quad (1)$$

где $\mu_A(x)$ представляет собой степень принадлежности

ТАБЛИЦА 1.

Пример исходных данных в виде матрицы

Варианты	КИН	+50	+35	+25	+10	0	-10	-25	-35	-50
Вероятность реализации состояния природы		0,16	0,32	0,18	0,12	0,1	0,07	0,03	0,015	0,005
Вариант 1	0,189	1647	1602	1551	1206	974	715	321	223	56
Вариант 2	0,274	2225	2013	1818	1036	509	-163	-1188	-1424	-2137
Вариант 3	0,312	2646	2556	2289	1478	934	113	-1137	-1634	-2050
Вариант 4	0,330	2312	2155	2199	2289	1932	1030	-335	-1813	-1956
Вариант 5	0,345	1715	1783	1925	2153	2289	1272	-270	-2057	-2204
Вариант 6	0,352	1587	1523	1680	1867	2235	1054	-523	-2417	-2768
Вариант 7	0,360	1315	1217	1423	1315	1815	623	-1007	-2956	-3670

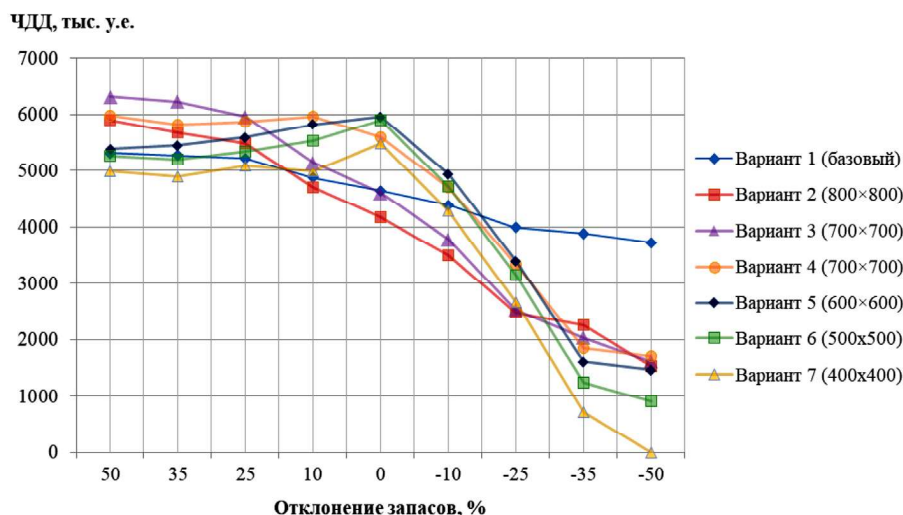


РИС. 1.

Графическое изображение матрицы ЧДД при отклонении запасов по всем вариантам

х к А, а $\mu_A(x): X \rightarrow M$ – функция, отображающая X в пространстве M , называемом пространством принадлежности. Когда M содержит только две точки 0 и 1, A является не расплывчатым, и его функция принадлежности совпадает с характеристической функцией не расплывчатого множества. Таким образом, основное предположение состоит в том, что расплывчатое множество A , несмотря на нечеткость его границ, может быть точно определено путем сопоставления каждому объекту x числа, лежащего между 0 и 1, которое представляет степень его принадлежности к A .

Для целей предложенной задачи более подходящими являются функции принадлежности, представленные в таблице 4. После проведения всех описанных выше расчетов матрица 1 оценена по нескольким критериям. Этот результат можно представить так: получено несколько нечетких множеств типа «оптимальное решение по j -му критерию», нумерация критериев произвольна. Элементами каждого из данных

нечетких множеств являются варианты разработки, т.е. альтернативы принятия решения. Функции же принадлежности в каждом из множеств различны.

Причем значение функции принадлежности множества, соответствующее альтернативе A_i , позволяет судить, насколько i -я альтернатива близка к оптимуму по j -му критерию. Чем ближе значение функции принадлежности к единице, тем благоприятнее i -я альтернатива по j -му критерию. Для оптимальной альтернативы значение функции принадлежности равно 1, для наименее благоприятной по данному критерию – 0. В данной работе вместо нуля и единицы как граничных значений функций принадлежности используются 0,1 и 0,9. Этот выбор субъективен и никак не влияет на результаты расчетов. Таким образом, мы приходим к еще одному нечеткому множеству, которое можно назвать «оптимальное решение по совокупности критериев». Его элементами также являются альтернативы, только теперь им не соответствуют значения

ТАБЛИЦА 2.

Приведенная матрица ЧДД

Варианты разработки	КИН	Отклонение количества запасов, %								
		50	35	25	10	0	-10	-25	-35	-50
Вариант 1 (базовый)	0,189	5317	5272	5221	4876	4644	4385	3991	3893	3726
Вариант 2 (800×800)	0,274	5895	5683	5488	4706	4179	3507	2482	2246	1533
Вариант 3 (700×700)	0,312	6316	6226	5959	5148	4604	3783	2533	2036	1620
Вариант 4 (700×700)	0,330	5982	5825	5869	5959	5602	4700	3335	1857	1714
Вариант 5 (600×600)	0,345	5385	5453	5595	5823	5959	4942	3400	1613	1466
Вариант 6 (500×500)	0,352	5257	5193	5350	5537	5905	4724	3147	1253	902
Вариант 7 (400×400)	0,360	4985	4887	5093	4985	5485	4293	2663	714	1

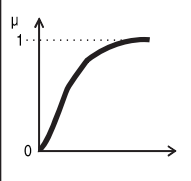
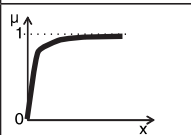
ТАБЛИЦА 3.

Соответствие ЧДД и вариантов разработки по всем критериям

Вариант	Лаплас	Сэвидж	Гур (K=0,1)	Гур (K=0,2)	Гур (K=0,5)	Гур (K=0,8)	Гур (K=0,9)	Макс. о.п.	Х-Л (K=0,1)	Х-Л (K=0,2)	Х-Л (K=0,5)	Х-Л (K=0,8)	Х-Л (K=0,9)
1	4592	1315	3885	4044	4522	4999	5158	5031	3856	3987	4378	4770	4900
2	3969	2193	1969	2405	3714	5023	5459	5094	1889	2245	3313	4381	4737
3	4247	2106	2090	2559	3968	5377	5846	5533	2011	2403	3577	4750	5142
4	4538	2036	2141	2568	3848	5128	5555	5618	2104	2495	3666	4837	5228
5	4404	2280	1915	2365	3713	5060	5510	5388	1858	2250	3427	4603	4996
6	4141	2824	1402	1903	3404	4904	5405	5169	1329	1755	3036	4316	4742
7	3678	3726	549	1097	2743	4388	4937	4816	482	963	2408	3853	4334

ТАБЛИЦА 4.

Функция принадлежности

№П/П	График	Формула
1		$\mu(x) = 1 - \exp(-Kx^a), K > 0, a > 0$
2		$\mu(x) = 1 - \frac{1}{k_1 x + k_2}, k_1 > 0, k_2 > 1$

принадлежности множества «оптимальное решение по совокупности критериев». Функция принадлежности пересечения нечетких множеств определяется так: для любого $x: \mu(x) = \min(\mu_i(x))$, где $\mu_i(x)$ – функции принадлежности всех нечетких множеств вида «оптимальное решение по критерию ...».

Авторы [16], сопоставляя различные методы, приходят к выводу о том, что «подход, основанный на теории нечетких множеств, преодолевает недостатки вероятностного и минимаксного подходов, связанных с учетом неопределенности». Далее таблицу 3 с помощью теории нечетких множеств трансформируем в таблицу 4, в которой рассчитаны функции принадлежности по всем семи вариантам проекта разработки. Максимальное значение среди минимальных значений функции принадлежности равно 0,813, что указывает на оптимальность 4 варианта проекта разработки (рис. 4).

Для удобства и наглядности используется приведенный КИН, параллельно смещенный и приближенный на уровень пересечения с кривыми ЧДД. Это позволяет сделать сравнительный анализ для выбора

ЧДД. Используя операцию пересечения нечетких множеств, мы непосредственно определим значения функции принадлежности, соответствующие каждой альтернативе. Это значит, что мы определяем функцию

ТАБЛИЦА 5.

Финальное распределение значений принадлежностей

Вариант	Лаплас	Сэвидж	Гур (K=0,1)	Гур (K=0,2)	Гур (K=0,5)	Гур (K=0,8)	Гур (K=0,9)	Макс. о.п.	Х-Л (K=0,1)	Х-Л (K=0,2)	Х-Л (K=0,5)	Х-Л (K=0,8)	Х-Л (K=0,9)	min μ
1	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,849	0,695	0,714	0,900	0,900	0,900	0,893	0,852	0,695
2	0,746	0,852	0,796	0,802	0,832	0,853	0,839	0,761	0,792	0,795	0,808	0,830	0,805	0,746
3	0,850	0,859	0,808	0,819	0,862	0,900	0,900	0,890	0,805	0,813	0,843	0,891	0,891	0,805
4	0,895	0,864	0,813	0,820	0,849	0,871	0,860	0,900	0,814	0,822	0,853	0,900	0,900	0,813
5	0,878	0,845	0,790	0,797	0,832	0,860	0,851	0,866	0,789	0,796	0,825	0,873	0,870	0,789
6	0,822	0,775	0,705	0,718	0,773	0,826	0,824	0,801	0,701	0,709	0,746	0,811	0,807	0,701
7	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100

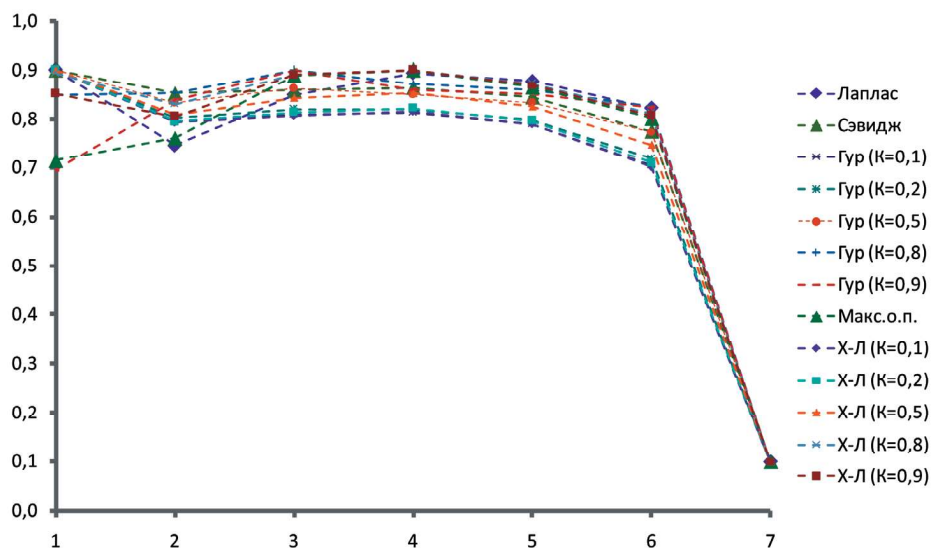


РИС. 2.

Функции принадлежности нечетких множеств

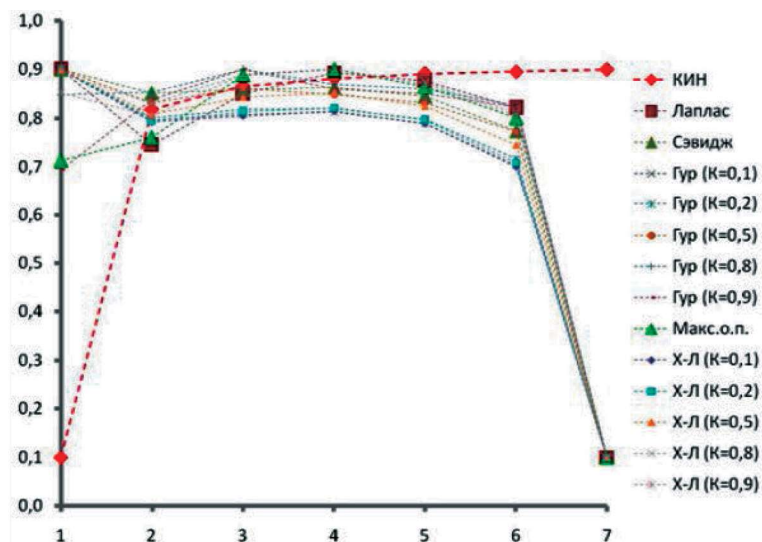


РИС. 3.

КИН и ЧДД как критерии при выборе варианта проекта

ТАБЛИЦА 6.

Матрица ЧДД с соответствующими значениями КИН

Варианты разработки	Отклонение количества запасов, %								
	50	35	25	10	0	-10	-25	-35	-50
Вариант 1 (базовый)	0,181	0,183	0,186	0,189	0,189	0,191	0,192	0,192	0,194
	5317	5272	5221	4876	4644	4385	3991	3893	3726
Вариант 2 (800×800)	0,269	0,271	0,271	0,273	0,274	0,275	0,277	0,277	0,279
	5895	5683	5488	4706	4179	3507	2482	2246	1533
Вариант 3 (700×700)	0,306	0,31	0,31	0,312	0,312	0,314	0,314	0,317	0,319
	6316	6226	5959	5148	4604	3783	2533	2036	1620
Вариант 4 (700×700)	0,325	0,326	0,326	0,328	0,33	0,33	0,333	0,333	0,335
	5982	5825	5869	5959	5602	4700	3335	1857	1714
Вариант 5 (600×600)	0,34	0,343	0,342	0,344	0,345	0,346	0,348	0,348	0,35
	5385	5453	5595	5823	5959	4942	3400	1613	1466
Вариант 6 (500×500)	0,347	0,348	0,35	0,351	0,352	0,354	0,354	0,355	0,357
	5257	5193	5350	5537	5905	4724	3147	1253	902
Вариант 7 (400×400)	0,356	0,358	0,36	0,36	0,36	0,361	0,363	0,364	0,365
	4985	4887	5093	4985	5485	4293	2663	714	1

ТАБЛИЦА 7.

Распределение значений принадлежности для матрицы ЧДД · КИН

Вариант	Лаплас	Сэвидж	Гур (K=0,1)	Гур (K=0,2)	Гур (K=0,5)	Гур (K=0,8)	Гур (K=0,9)	Макс. о.п.	Х-Л (K=0,1)	Х-Л (K=0,2)	Х-Л (K=0,5)	Х-Л (K=0,8)	Х-Л (K=0,9)	min μ
1	0,10	0,10	0,90	0,88	0,10	0,10	0,10	0,10	0,90	0,89	0,10	0,10	0,10	0,10
2	0,76	0,71	0,85	0,84	0,77	0,83	0,83	0,82	0,85	0,84	0,66	0,80	0,81	0,66
3	0,86	0,84	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,88	0,89	0,87	0,88	0,88	0,84
4	0,90	0,90	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,90	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89
5	0,90	0,90	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,88	0,89	0,89	0,90	0,90	0,88
6	0,89	0,88	0,83	0,85	0,88	0,90	0,90	0,90	0,83	0,84	0,85	0,89	0,89	0,83
7	0,86	0,81	0,10	0,10	0,75	0,88	0,89	0,89	0,10	0,10	0,49	0,87	0,88	0,10

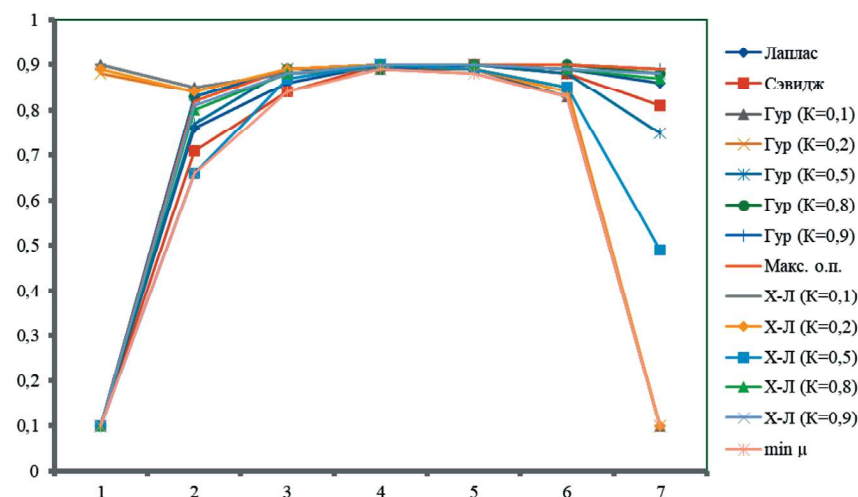


РИС. 4.

Определение оптимального варианта проекта разработки нефтяной залежи при исходной матрице с элементами ЧДД×КИН

оптимального варианта при условии максимума ЧДД при возможном максимуме КИН. К примеру, можно рассчитать и сопоставить выигрыш по КИН потери по ЧДД между 4 и 5 вариантами проекта. Эту же оценку можно сделать, рассчитав матрицу, составленную для произведения ЧДД×КИН (табл. 6), и определив минимальное значение функции принадлежности в таблице 7. Теперь рассмотрим множество «оптимальное решение по совокупности критериев» с только что определенной функцией принадлежности. Альтернатива, которой соответствует максимальное значение функции принадлежности, и есть искомое оптимальное решение.

Из таблиц видно, что варианты проектов 4 и 5 стали еще ближе по рассчитанной функции принадлежности, соответственно, 0,89 и 0,88 для случая произведения ЧДД×КИН, и тем не менее 4 вариант сохраняет оптимальность. При необходимости и определенных изменениях в системе разработки 5 варианта разработки можно добиться его оптимальности, поскольку функции принадлежности достаточно близки. Для этого необходимо заново запустить расчеты с новыми исходными данными и пересчитать функцию принадлежности по всем вариантам и критериям. Максимальный среди минимальных функций принадлежности будет оптимальным вариантом проекта разработки.

Как правило, крайние случаи – 1 вариант с минимальным значением КИН при максимальном ЧДД и 7 вариант проекта при максимальном КИН и при минимальном или отрицательном ЧДД – не могут рассматриваться в качестве оптимального по известным причинам. На рис. 4 предметом обсуждения являются с 2 по 6 варианты проекта разработки нефтяной залежи. Безусловно, в методике имеется возможность существенно сократить количество вариантов с 7 до 5 или критериев оценки с 13 до 9 или 7 без ущерба методике выбора и увеличения степени риска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика позволяет априорно определить оптимальный вариант проекта разработки месторождения углеводородов в условиях неопределенности и риска, связанного с ожидаемым отклонением геологических и извлекаемых запасов. Моделирование опирается на статистический анализ, различные критерии теории игр и их свертывания с применением теории нечетких множеств. Методика позволяет как сократить, так и увеличить число критериев оценки и количество вариантов проекта для рассмотрения.

Рассчитываются матрицы наиболее значимых для процесса разработки показателей: ЧДД и КИН, а также их произведения ЧДД×КИН в соответствии с заданными значениями отклонения запасов, определяемые с помощью гидродинамических моделей объектов разработки. Имеется возможность учета и других тех-

нологических и экономических показателей процесса разработки в необходимом количестве.

Впервые предлагается научно обоснованная методика для выбора оптимального варианта проекта разработки нефтяной залежи в условиях априорного учета риска, возникающего из-за возможного отклонения утвержденных в проекте геологических и извлекаемых запасов.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛТУНИН А.Е., СЕМУХИН М.В. Расчеты в условиях риска и неопределенности в нефтегазовых технологиях. Тюмень: ТГУ, 2004. 296 с.
2. БЕЛЛМАН Р., ЗАДЕ Л.А. Принятие решений в расплывчатых условиях. / Вопросы анализа и процедура принятия решений. М.: Мир, 1976.
3. БЕРНСТАЙН П.А. Против богов. Укрощение риска. М.: Олимп-Бизнес, 2000. 396 с.
4. ВИЛЕНСКИЙ П.А., ЛИВШИЦ В.Н., СМОЛЯК С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. М.: Дело, 2008. 1104 с.
5. ГОРБУНОВ А.Т., МОСКВИН В.Д., БРУСЛОВ А.Ю., СТАРКОВСКИЙ А.В., РОГОВА Т.С. и др. Способ обработки призабойной зоны добывающей скважины. Патент RU 2023143 С1, 15.11.1994.
6. ЗАДЕ Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Математика сегодня. М.: Знание, 1974. С. 5–49.
7. ЗАДЕ Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
8. ЗАДЕ Л.А. Тени нечетких множеств // Проблемы передачи информации. 1966. Т. 2. № 1. С. 37–44.
9. КАНДЕЛЬ А., БАЙАТТ У. Нечеткие множества, нечеткая алгебра, нечеткая статистика // Труды американского общества инженеров-радиоэлектроников. 1978. Т. 66. № 12. С. 37–61.
10. МАНДРИК И.Э. Потенциал повышения нефтеизвлечения на основе новых технологий стимулирования нефтяного пласта // Вестник РАЕН. 2007. Т. 7. №4. С. 14–19.
11. МАНДРИК И.Э., ШАХВЕРДИЕВ А.Х., СУЛЕЙМАНОВ И.В. Оценка и прогноз нефтеотдачи на основе моделирования нейронными сетями // Нефтяное хозяйство. 2005. № 10. С. 36–39.
12. Методические рекомендации по проектированию разработки нефтяных и газонефтяных месторождений. Приложение к приказу МПР России от 21.03.2007 г. № 61.
13. МИРЗАДЖАНЗАДЕ А.Х., ШАХВЕРДИЕВ А.Х. Динамические процессы в нефтегазодобыче: системный анализ, диагноз, прогноз. М.: Наука, 1997. 254 с.
14. НЕДОСЕКИН А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. СПб.: Сезам, 2002. 181 с.

15. Норвич А.М., Турксен И.Б. Фундаментальное измерение нечеткости / Нечеткие множества и теория возможностей. М: Радио и связь, 1986. С. 54–64.
16. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В. Концепция мониторинга и оптимизации процесса заводнения нефтяных пластов при неустойчивости фронта вытеснения // Нефтяное хозяйство. 2021. № 11. С. 104–109.
17. Шахвердиев А.Х., Дутов Д.В., Шахвердиев Э.А. Проблемы гармонизации нормативно-правовых аспектов законодательства о недропользовании // Нефтяное хозяйство. 2009. № 10. С. 20–23.
18. Шахвердиев А.Х. Еще раз о нефтеотдаче // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. С. 44–48.
19. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбичкая Л.П., Галушко В.В. Способ определения местоположения застойных и слабодренлируемых зон нефтяной залежи. Патент RU 2105136 С1, 20.02.1998.
20. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбичкая Л.П. Моделирование залежей нефти с позиции системной оптимизации процессов // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 19–23.
21. Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э., Абасов М.Т., Аббасова Н.Н. Модельная основа выбора оптимального варианта разработки нефтяного месторождения при мультикритериальности решений // Нефтяное хозяйство. 2007. №10. С. 82–85.
22. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М., Мандрик И.Э., Бахтияров С.И. Интегративная эффективность воздействия на пласт при внутрипластовой генерации газа // Нефтяное хозяйство. 2006. № 11. С. 76–80.
23. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М. Синергетические эффекты при системном воздействии на залежь термореохимическими методами // Нефтяное хозяйство. 2002. № 11. С. 61–65.
24. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2244110 С1, 10.01.2005.
25. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Чукчиев О.А., Галеев Ф.Х. Способ гидроразрыва пласта. Патент RU 2122111 С1, 20.11.1998.
26. Шахвердиев А.Х. Системная оптимизация процесса разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 2004. 452 с.
27. Шахвердиев А.Х. Унифицированная методика расчета эффективности геолого-технических мероприятий // Нефтяное хозяйство. 2001. № 5. С. 44–47.
28. Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э. Оптимизация плотности сетки скважин и ее влияние на коэффициент извлечения нефти // Нефтяное хозяйство. 2007. № 12. С. 54–58.
29. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М., JIANG R., BAKHTIYAROV S. Высокоэффективная технология повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти на основе внутрипластовой генерации CO₂ // Нефтяное хозяйство. 2014. № 5. С. 90–95.
30. Шопин А.Г. Построение функции принадлежности нечеткого множества и оценка его вероятностных характеристик // Электронный журнал «Исследовано в России». 2003. С. 453–467. <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2003/040.pdf>
31. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/index.php> (дата обращения: 15.07.2024).
32. GUMERSKY K.H., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery // Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France. 2000. P. 499-504.
33. SHESTOPALOV Y., SHAKHVERDIEV A. Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems // Symmetry. 2021. T. 13. № 10.
34. ZADEH L.A. Furry Sets // Information and Control. 1965. № 8. P. 338–353.

REFERENCES

1. ALTUNIN A.E., SEMUKHIN M.V. Calculations under Risk and Uncertainty in Oil and Gas Technologies. Tyumen: TSU. 2004:296. (In Russian).
2. BELLMAN R., ZADE L.A. Decision Making in Vague Conditions. Collection. "Questions of Analysis and Decision Making Procedure". Moscow: Mir. 1976. (In Russian).
3. BERNSTEIN P.L. Against the Gods. Taming Risk. Moscow: Olimp-Business. 2000:396. (In Russian).
4. VILENSKY P.L., LIVSHITS V.N., SMOLYAK S.A. Evaluation of Investment Projects Effectiveness. Theory and Practice. Moscow: Delo. 2008:1104. (In Russian).
5. GORBUNOV A.T., MOSKVIN V.D., BRUSLOV A.YU., STARKOVSKY A.V., ROGOVA T.S. ET AL. Method of processing the bottomhole zone of a production well. Patent RU 2023143 С1, 11.15.1994. (In Russian).
6. ZADE L.A. Fundamentals of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes. In the book Mathematics today. Moscow: Knowledge. 1974:5–49. (In Russian).
7. ZADE L.A. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions. Moscow: Mir. 1976:165. (In Russian).
8. ZADE L.A. Shadows of fuzzy sets. *Problemy peredachi informatsii*. 1966; 2, 1: 37–44. (In Russian).
9. KANDEL A., BYATT W. Fuzzy Sets, Fuzzy Algebra, Fuzzy Statistics. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov – radioelektronikov. 1978; 66, 12:37–61.

- (In Russian).
10. MANDRIK I.E. The oil recovery efficiency increase potential with new bed stimulation technologies. *Vestnik RAYEN*. 2007; 7, 4:14–19. (In Russian).
 11. MANDRIK I.E., SHAKHVERDIEV A.KH., SULEIMANOV I.V. Oil recovery estimation and prediction using artificial neural networks. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2005; 10:36–39. (In Russian).
 12. Methodical Recommendations for Designing the Development of Oil and Gas Oil Fields. Appendix to the order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated March 21. 2007;61. (In Russian).
 13. MIRZAJANZADE A.KH., SHAKHVERDIEV A.KH. Dynamic Processes in Oil and Gas Production: Systems Analysis, Diagnosis, Forecast. Moscow: Nauka. 1997:254. (In Russian).
 14. NEDOSEKIN A.O. Fuzzy-set analysis of stock investment risk. SPb.: Sezam. 2002:181. (In Russian).
 15. NORVICH A.M., TURKSEN I.B. Fundamental measurement of fuzziness. In the collection: Fuzzy sets and the theory of possibilities. Moscow: Radio and communication. 1986:54–64. (In Russian).
 16. SHAKHVERDIEV A.KH., AREFIEV S.V. The concept of monitoring and optimization of oil reservoirs waterflooding under the conditions of displacement front instability. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2021;11:104–109. (In Russian).
 17. SHAKHVERDIEV A.KH., DUTOV D.V., SHAKHVERDIEV E.A. Problems of harmonization of normative-legal aspects of the legislation on the subsoil use in Russia. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2009;10:20–23. (In Russian).
 18. SHAKHVERDIEV A.KH. Once again about oil recovery. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014; 1:44–48. (In Russian).
 19. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P., GALUSHKO V.V. Method for determining the location of stagnant and poorly drained zones of an oil deposit. Patent RU 2105136 C1, 02.20.1998. (In Russian).
 20. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P. Modeling of oil deposits from the standpoint of systemic optimization of processes. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2000; 12:19–23. (In Russian).
 21. SHAKHVERDIEV A.KH., MANDRIK I.E., AVASOV M.T., ABBASOVA N.N. Model basis of a choice of an optimum variant of an oil field development at multicriteriality of decisions. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2007;10:82–85. (In Russian).
 22. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., MANDRIK I.E., BAKHTIYAROV S.I. Integrative efficiency of bed stimulation at intrastratal gas generation. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2006;11:76–80. (In Russian).
 23. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Synergetic effects at the system influence on deposit with thermo-rheochemical technologies summary. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2002;11:61–65. (In Russian).
 24. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M. Method of developing an oil deposit. Patent RU 2244110 C1, 01.10.2005. (In Russian).
 25. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEIMANOV B.A., ABBASOV E.M., CHUKCHEEV O.A., GALEEV F.KH. Formation hydraulic fracturing method. Patent RU 2122111 C1, 11/20/1998. (In Russian).
 26. SHAKHVERDIEV A.KH. Systematic Optimization of the Oil Field Development Process. Moscow: Nedra. 2004:452. (In Russian).
 27. SHAKHVERDIEV A.KH. Unified methodology for calculating the effectiveness of geological and technical measures. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2001; 5:44–47. (In Russian).
 28. SHAKHVERDIEV A.KH., MANDRIK I.E. Well grid density optimisation and its impact on recovery ratio. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2007;12:54–58. (In Russian).
 29. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., JIANG R., BAKHTIYAROV S. High efficiency EOR and IOR technology on in-situ CO₂ generation. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014;5:90–95. (In Russian).
 30. SHOPIN A.G. Construction of the Membership Function of a Fuzzy Set and Estimation of Its Probability Characteristics. *Elektronnyy zhurnal «Issledovano v Rossii»*. 2003:453–467. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/040.pdf> (In Russian).
 31. SHTOVBA S.D. Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/index.php> (date of access: 07.15.2024). (In Russian).
 32. GUMERSKY KH.KH., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery. Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France. 2000:499–504.
 33. SHESTOPALOV Y., SHAKHVERDIEV A. Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems. *Symmetry*. 2021;13:10:1884.
 34. ZADEH L.A. Furry Sets. *Information and Control*. 1965; 8:338–353.

Шахвердиев Азизага Ханбаба Оглы,
 д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений» Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе

☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
 117997, Moscow, st. Miklouho-Maklaya, 23
 e-mail: ah_shah@mail.ru

Панов Юрий Петрович,
 к.т.н., ректор Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе

☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
 117997, Moscow, Miklukho-Maklaya Str, 23
 e-mail: panovyp@mgri.ru