



## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИЗ ПОДТОВАРНОЙ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

### **Некрасов Алексей Владимирович**

кандидат экономических наук,  
доцент кафедры нефтегазового дела  
факультета экологии и инжиниринга,  
Нижегородский государственный университет,  
Нижегород, Россия  
E-mail: aleksey.nekrasov.1974@mail.ru

### **Соловьев Алексей Алексеевич**

старший преподаватель  
кафедры нефтегазового дела  
факультета экологии и инжиниринга,  
Нижегородский государственный университет,  
Нижегород, Россия  
E-mail: alexthecat@mail.ru

Предмет исследования: оптимизация путем математического моделирования и создания программного продукта для подбора технико-экономических параметров установки комплексного извлечения гидроминерального сырья из подтоварной воды нефтегазовых месторождений.

Цель исследования: создание методики выбора оптимальной конфигурации установки для извлечения гидроминерального сырья на основе имитационного моделирования и анализа прибыльности и риска в условиях стохастических колебаний технологических и рыночных факторов.

Методы исследования: в работе применен комплекс методов системного анализа, стохастического моделирования и многокритериальной оптимизации. Основным инструментом служит имитационное моделирование методом Монте-Карло, позволяющее учитывать случайный характер технологических и экономических параметров. Для оценки эффективности использованы показатели ожидаемой прибыли и дисперсии как меры риска, а для выбора рациональных решений – принципы парето-оптимальности.

Объект исследования: технико-экономические параметры установки для комплексного извлечения гидроминерального сырья из подтоварной воды.

Основные результаты исследования: разработана структура имитационной модели, позволяющая проводить статистическую оценку технико-экономических показателей и определять наиболее эффективные варианты из множества альтернативных конфигураций установки для комплексного извлечения гидроминерального сырья из подтоварной воды. Установлено, что использование многоэлементных схем извлечения обеспечивает снижение дисперсии прибыли при сохранении рентабельности. Результаты исследования формируют подготовительный этап и методологическую основу для последующего построения программного комплекса оптимизации конфигурации установок комплексного извлечения гидроминерального сырья.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, метод Монте-Карло, парето-оптимизация, многокритериальный анализ, стохастическая модель, вычислительный эксперимент, технико-экономическая оптимизация, гидроминеральное сырье, программная реализация, моделирование эффективности.

## **OPTIMIZATION OF TECHNO-ECONOMIC PARAMETERS OF A PLANT FOR HYDROMINERAL RAW MATERIAL EXTRACTION FROM OILFIELD PRODUCED WATER USING MONTE CARLO SIMULATION MODELING**

### **Aleksey V. Nekrasov**

Candidate of Economics,  
Associate Professor Department of Oil  
and Gas Engineering,  
Faculty of Ecology and Engineering,  
Nizhnevartovsk State University,  
Nizhnevartovsk, Russia  
E-mail: aleksey.nekrasov.1974@mail.ru

### **Aleksey A. Soloviev**

Senior Lecturer Department of Oil  
and Gas Engineering,  
Faculty of Ecology and Engineering,  
Nizhnevartovsk State University,  
Nizhnevartovsk, Russia  
E-mail: alexthecat@mail.ru

Subject of research: optimization through mathematical modeling and the development of a software product for selecting the techno-economic parameters of an installation designed for the integrated extraction of hydromineral raw materials from produced water of oil and gas fields.

Purpose of research: to develop a methodology for selecting the optimal configuration of a hydromineral extraction installation based on simulation modeling and the analysis of profitability and risk under stochastic fluctuations of technological and market factors.

Methods of research: the study employs a set of methods of systems analysis, stochastic modeling, and multicriteria optimization. The main tool is Monte Carlo simulation, which makes it possible to account for the random nature of technological and economic parameters. Efficiency is evaluated using the expected profit and its variance as a measure of risk, while rational solutions are selected according to the principles of Pareto optimality.

Object of research: the techno-economic parameters of an installation for the integrated extraction of hydromineral raw materials from produced water.

Research findings: a structural framework of a simulation model has been developed that enables statistical evaluation of techno-economic indicators and identification of the most efficient alternatives among multiple configurations of installations for the integrated extraction of hydromineral raw materials from produced water. It has been established that the use of multi-element extraction schemes reduces the variance of profit while maintaining profitability. The results of the study represent a preparatory stage and provide the methodological foundation for the subsequent development of a software system for optimizing the configuration of installations for the integrated extraction of hydromineral raw materials.

**Keywords:** simulation modeling, Monte Carlo method, Pareto optimization, multicriteria analysis, stochastic model, computational experiment, techno-economic optimization, hydromineral raw materials, software implementation, efficiency modeling.



## ВВЕДЕНИЕ

Рост потребности в стратегически важных редких и редкоземельных элементах, используемых в аккумуляторной, электронной и химической промышленности, актуализирует задачу разработки вычислительных методов анализа и оптимизации процессов их извлечения из техногенных источников. Подоварная вода, образующаяся при добыче нефти и газа, представляет собой многокомпонентную минеральную систему, содержащую литий, рубидий, бром, стронций и другие ценные элементы. Потенциал ее комплексной переработки определяется не только технологическими, но и экономико-математическими факторами, требующими формализации и оптимизационного моделирования. В существующих исследованиях значительное внимание уделяется технологическим аспектам многокомпонентного извлечения, однако математическое обеспечение выбора оптимальной конфигурации установки и ее параметров остается недостаточно проработанным. Преобладают детерминированные модели, не учитывающие стохастическую природу исходных данных: изменчивость концентраций, затрат, коэффициентов извлечения и рыночных цен. В результате отсутствуют инструменты, позволяющие количественно оценить риск и устойчивость решений при проектировании многокомпонентных систем извлечения.

Научная проблема заключается в разработке математической модели оптимизации технико-экономических параметров установки комплексного извлечения гидроминерального сырья, которая учитывает многокритериальность задачи и стохастическую природу входных данных. Задача относится к классу сложных вычислительных оптимизационных проблем, требующих применения методов имитационного моделирования, статистического анализа и многокритериальной оптимизации.

Актуальность исследования определяется необходимостью создания математического аппарата, обеспечивающего количественную оценку эффективности и риска при многокомпонентном извлечении, а также возможности алгоритмической реализации оптимизационных процедур в виде программного продукта. Такой подход позволяет перейти от эвристического выбора параметров к системной оценке и формированию Парето-оптимальных решений, учитывающих противоречие между прибылью и риском.

Проведенный анализ публикаций по технико-экономическому обоснованию установок для извлечения минеральных

компонентов из рассолов показывает, что стохастические методы не применяются. Повысить качество принимаемых решений могут процедуры генерации и анализа многомерных распределений, описывающих совместное влияние технологических и рыночных факторов. Теория портфельной оптимизации и принципы парето-эффективности, широко используемые в эконометрическом анализе, пока не адаптированы для задач комплексного выбора конфигурации рассматриваемых технологических систем.

Научная новизна работы состоит в построении интегрированной стохастической модели технико-экономической оптимизации, основанной на имитационном моделировании методом Монте-Карло и многокритериальной оценке решений. Модель включает алгоритмы генерации случайных параметров, статистическую обработку множества результатов, вычисление функций распределения прибыли и затрат, а также выделение парето-оптимального множества альтернатив. Предполагается в дальнейшем реализация программного комплекса для автоматизации вычислительных экспериментов и анализа устойчивости решений.

Цель исследования – создание методики выбора оптимальной конфигурации установки для комплексного извлечения гидроминерального сырья на основе имитационного моделирования и анализа прибыльности и риска в условиях стохастических колебаний технологических и рыночных факторов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Проанализировать технологические схемы извлечения ценных компонентов, провести их экономическое обоснование и выявить преимущества комплексной переработки по сравнению с однокомпонентной.

2. Разработать методику оценки экономической эффективности и рисков для установок комплексного извлечения на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло.

3. На примере тестовых данных провести сравнительный анализ конфигураций установки, определить их прибыльность и рискованность и показать возможность применения результатов моделирования для выбора парето-оптимальных решений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современные тенденции в области добычи полезных ископаемых демонстрируют устойчивую ориентацию на рациональное природопользование и вовлечение в хозяйственный оборот вторичных ресурсов.

В данном контексте значительный интерес представляет переработка подтоварных вод нефтегазовых месторождений с целью извлечения широкого спектра гидроминеральных компонентов. В их составе идентифицированы соединения лития, брома, стронция, магния, йода и иных элементов, обладающих высокой промышленной ценностью.

Литий, являясь ключевым материалом для производства современных аккумуляторных систем, находит применение в энергетике, электротранспорте и медицинской технике. Бром и его производные служат основой для синтеза антипиренов, фармацевтических субстанций и специальных реагентов. Магний используется в металлургии при создании легких сплавов, а также в терапевтических целях. Йод обладает выраженными антисептическими свойствами и применяется в фармакологии, тогда как стронций востребован в производстве электронных компонентов, оптических стекол и медицинских имплантатов. Экономическая целесообразность извлечения указанных компонентов из подтоварных вод определяется не только рыночной конъюнктурой, но и задачами обеспечения технологического суверенитета России. В условиях санкционного давления извлечение ценных компонентов из подтоварной воды переходит из категории теоретических изысканий в разряд практических задач национального масштаба. «Стратегия развития минерально-сырьевой базы РФ до 2050 года» [9] среди приоритетных направлений выделяет «геологическое изучение, разработку и внедрение технологий использования гидроминерального сырья». Таким образом, оптимизация технико-экономических характеристик установок для извлечения гидроминерального сырья, представленная в данном исследовании, является прямым инструментом реализации государственной стратегии, направленной на импортозамещение дефицитных видов стратегического минерального сырья и обеспечение технологического суверенитета РФ.

Анализ научных публикаций подтверждает устойчивый интерес исследовательского сообщества к технологиям промышленного использования гидроминерального сырья [2; 5; 7; 14]. Патентный поиск выявил активную изобретательскую деятельность в данной области. Современные исследования сфокусированы на оптимизации режимных параметров, снижении энергоемкости операций и повышении степени извлечения ценных компонентов. Отдельное внимание уделяется разработке новых селективных сорбентов и созданию автоматизированных систем управления технологическим процессом.

Например, в патенте RU2132819C1 описана интегрированная технология очистки и концентрирования ценных компонентов, обеспечивающая минимизацию отходов [10]. Патент RU2751948C1 раскрывает усовершенствованную сорбционную методику селективного извлечения лития [12]. В патенте RU2148159C1 предложен способ совмещенной разработки нефтяных и гидроминеральных месторождений, направленный на снижение совокупных затрат [13]. Методика, изложенная в патенте RU2523318C1, предусматривает использование энергии высоконапорных пластов для интенсификации извлечения целевых компонентов [11]. Эффективность рассмотренных технологических решений определяется совокупностью факторов, включающих химический состав водной среды, параметры применяемых методов сепарации и динамику рыночных цен на конечную продукцию. Технологические подходы к переработке подтоварных вод базируются на использовании физико-химических методов (осаждение, экстракция), мембранных процессов (обратный осмос, нанофильтрация), сорбционных и электрохимических способов. Сравнительный анализ технологий, выполненный на основе данных научной литературы, представлен в таблице 1.

Несмотря на признанные перспективы, широкомасштабная добыча гидроминерального сырья сталкивается с ключевым барьером в виде требования экономической эффективности. Эта проблема находит, в частности, отражение в работе Ю. Г. Буракова [4, с. 61], который подчеркивает, что решение об организации такого производства должно базироваться на положительных результатах технико-экономического обоснования, и определяет круг наиболее подходящих для этого месторождений. Ключевыми характеристиками таких перспективных месторождений являются нахождение на завершающей стадии разработки, активный водонапорный режим, а также наличие развитой инфраструктуры – от обустройства для механизированной добычи и дожимных комплексов до полигонов для захоронения стоков и удобной транспортной доступности.

Именно эти критерии были взяты за основу в рамках стратегического проекта нашего вуза по оценке перспективности добычи гидроминерального сырья на территории ХМАО, где сосредоточено значительное количество скважин, соответствующих перечисленным характеристикам. Данная статья формирует научный задел для экономического обоснования для выбора наиболее экономически перспективных решений в рамках этого проекта.

Таблица 1. Сравнение методов извлечения ценных компонентов из подтоварной воды

Метод	Принцип работы	Эффективность	Энерго затраты	Оптимальное применение
Осаждение и экстракция	Добавление реагентов для выделения ценных компонентов в осадок	Средняя	Низкие	Воды с высокой минерализацией, где требуется извлечение тяжелых металлов
Мембранные технологии (обратный осмос, нанофильтрация)	Проход воды через полупроницаемые мембраны с отделением солей и металлов	Высокая	Средние	Воды со средней минерализацией, извлечение лития и брома
Ионно-обменные и сорбционные методы	Использование специализированных сорбентов и смол для селективного извлечения элементов	Высокая	Средние	Воды с низким содержанием целевых элементов, концентрирование лития, стронция, цезия
Электрохимические методы	Применение электролиза для выделения металлов в виде осадка или чистого вещества	Высокая	Высокие	Воды с высокой проводимостью, извлечение ценных металлов (литий, магний)
Комбинированные технологии	Сочетание нескольких методов для максимального извлечения полезных элементов	Очень высокая	Оптимизированные	Универсальное применение в зависимости от состава воды

Перспективность исследований в данном направлении подтверждается работой [1], где ХМАО отмечен как один из перспективных регионов для добычи гидроминерального сырья, также в работе приведены экономически обоснованные пороговые концентрации компонентов. При этом авторы подчеркивают, что существующие отраслевые стандарты не предусматривают обязательный анализ этих ценных компонентов в пластовых водах, что создает дефицит исходных данных. Наш проект, в рамках которого планируется провести такой анализ для скважин ХМАО, направлен на устранение этого информационного пробела.

Выбор оптимальной технологической схемы определяется конкретным компонентным составом воды, концентрацией целевых элементов и критериями экономической эффективности. Проведенный анализ научной литературы показывает, что на текущий момент уже существуют проработанные технико-экономические решения для однокомпонентного извлечения ценных элементов, в частности лития. Так, в исследовании на примере Оренбургского НГКМ был разработан расчетный модуль и установлены граничные условия рентабельности для установки по извлечению лития с минимальной концентрацией

200 мг/л при объеме перерабатываемой жидкости 1,5 млн м<sup>3</sup>/год [3, с. 31–32]. Однако столь высокие барьеры существенно ограничивают потенциальную сырьевую базу, что указывает на необходимость поиска более эффективных подходов. Перспективным направлением представляется разработка технологических решений, комбинирующих выделение сразу нескольких компонентов из подтоварной воды для повышения общей эффективности процесса, как, например, в рассмотренном выше патенте RU2132819C1.

Комплексный подход, направленный на извлечение нескольких ценных компонентов из подтоварной воды, обладает значительными технологическими и экономическими преимуществами, демонстрирует повышенную эффективность по сравнению с монокомпонентной схемой, например, ориентированной исключительно на литий.

Ключевые преимущества комплексной переработки:

1. Экономическая эффективность, а именно:

– минимизация операционных затрат, поскольку подтоварная вода уже извлекается в рамках основного технологического процесса нефтедобычи;



- формирование дополнительных доходных потоков от реализации гидроминеральной продукции;

- мультипродуктовая модель, позволяющая извлекать широкий спектр ценных элементов (бром, магний, калий, йод, стронций), повышает общую рентабельность проекта, т. к. постоянные затраты сопоставимы с извлечением одного элемента, а валовый доход будет выше.

2. Технологические и экологические преимущества, включающие:

- использование существующей инфраструктуры нефтедобывающих предприятий;

- возможность реализации интегрированных технологических решений для одновременного извлечения нескольких компонентов;

- соответствие принципам устойчивого развития и рационального природопользования.

3. Стратегические преимущества для нефтедобывающих компаний:

- диверсификация бизнес-модели и выход на новые рыночные сегменты;

- снижение зависимости от конъюнктуры нефтяного рынка;

- потенциальные возможности получения налоговых льгот;

- развитие инновационного потенциала компании;

- улучшение экологических показателей и репутации организации.

Экономический потенциал извлечения гидроминерального сырья подтверждается устойчивым ростом соответствующих товарных рынков. Согласно отчету Rare earth metals market, объем рынка редкоземельных металлов может достичь 33,5 млрд долларов США к 2037 году [15]. Однако для данных рынков характерна значительная ценовая волатильность, что подтверждается динамикой цен на литий, продемонстрировавшей пятикратный рост в 2019–2022 годах с последующей коррекцией.

В то же время при многокомпонентном извлечении существенно усложняется технико-экономическое обоснование, т. к. в отличие от однокомпонентного подхода требуется переход от простой детерминированной задачи к сложной комбинаторной и стохастической. Если в случае одного целевого компонента (например лития, как в примере Оренбургского НГКМ) оценка рентабельности сводится к анализу его концентрации и сопоставлению с затратами, то при наличии множества, например десяти потенциально перспективных для извлечения элементов, возникает огромное количество альтернативных конфигураций

установки (комбинаций одновременного извлечения двух, трех, четырех и более компонентов). Каждая такая комбинация уникальным образом влияет на итоговые технико-экономические показатели: комплексная переработка изменяет структуру как капитальных и операционных затрат, так и доходов от реализации широкой номенклатуры продукции. Более того, многокомпонентная схема принципиально меняет профиль риска, т. к. диверсификация продуктового портфеля позволяет снизить волатильность совокупной выручки, поскольку негативная ценовая динамика по одному элементу может быть компенсирована ростом цен по другим. Таким образом, задача оптимизации смещается с поиска единственного рентабельного компонента к выбору наилучшего парето-оптимального портфеля компонентов, обеспечивающего баланс между средней прибылью и дисперсией (риском), для решения которой необходимо применение методов имитационного моделирования и многокритериальной оптимизации.

Традиционные методы экономической оценки в этих условиях оказываются недостаточно эффективными для анализа перспектив комплексного извлечения гидроминерального сырья в связи с высокой рыночной динамичностью и сложностью прогнозирования ценовой конъюнктуры. Индивидуальные характеристики месторождения, включая химический состав вод, глубину залегания, геологические условия и доступность инфраструктуры, оказывают определяющее влияние на технологию добычи и экономические показатели проекта. В этих условиях методы компьютерного моделирования [6; 8] становятся необходимым инструментом для анализа множества сценариев с учетом специфики конкретного месторождения.

Для количественной оценки экономической эффективности различных конфигураций установки воспользуемся показателем прибыли. Однако для целей нашего сравнительного анализа различных вариантов более наглядным является использование не абсолютного значения прибыли, а ее относительного прироста по сравнению с базовым (эталонным) вариантом установки  $\Delta\P/\Pi_0$ . Это позволит упростить выражения, сохранив сопоставимость результатов, и наглядно продемонстрировать экономический эффект от оптимизации.

Прирост прибыли для каждого сравниваемого варианта может быть выражен при помощи следующего выражения (формула 1):

$$\Delta\P = \Pi_1 - \Pi_0 = P_1Y_1O_1 - P_0Y_0O_0, \quad (1)$$

где  $\Pi_{0,1}$  – прибыль базисного и текущего периодов,  $P_{0,1}$  – рентабельность базисного и текущего периодов;  $Y_{0,1}$  – издержкостность базисного и текущего периодов;  $O_{0,1}$  – оборот предприятия за соответствующие периоды (в руб.).

Издержкостность определяется по формуле 2:

$$Y_i = \frac{I_i}{O_i} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $I_i$  – издержки на производство продукции в соответствующий период.

На прирост прибыли влияют:

– рост производства продукции (формула 3):

$$\Delta\Pi_{(O)} = P_0 Y_0 O_1 - P_0 Y_0 O_0; \quad (3)$$

– изменение издержкостности выпускаемой продукции (формула 4):

$$\Delta\Pi_{(Y)} = P_0 Y_1 O_1 - P_0 Y_0 O_1; \quad (4)$$

– изменение рентабельности продукции (формула 5)

$$\Delta\Pi_{(P)} = P_1 Y_1 O_1 - P_0 Y_1 O_1. \quad (5)$$

Соответственно общий прирост равен сумме перечисленных частных приростов (формула 6):

$$\Delta\Pi = \Delta\Pi_{(O)} + \Delta\Pi_Y + \Delta\Pi_{(P)}. \quad (6)$$

Если перейти от абсолютных величин к относительным, то относительный прирост прибыли по отношению к базисному году можно выразить, разделив обе части выражения на  $\Pi_0$  (формула 7):

$$\Delta\Pi/\Pi_0 = \frac{P_1 Y_1 O_1 - P_0 Y_0 O_0}{P_0 Y_0 O_0} = \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{Y_1}{Y_0} \cdot \frac{O_1}{O_0} - 1 = I_p I_y I_o - 1, \quad (7)$$

где  $I_p$  – индекс рентабельности;  $I_y$  – индекс издержкостности;  $I_o$  – индекс оборота.

Представленные показатели (формулы 1–7) формируют базовую детерминированную модель технико-экономической эффективности установки. Однако в реальных условиях значения входных параметров (концентраций целевых элементов, цен на продукцию, затрат на энергию и реагенты)

изменяются во времени и имеют стохастический характер. Для учета этой неопределенности и количественной оценки устойчивости экономических результатов базовая модель была расширена до стохастической формы с использованием имитационного моделирования методом Монте-Карло. Применение данного метода позволяет рассматривать входные параметры как случайные величины с заданными законами распределения и проводить серию вычислительных экспериментов, формируя множество возможных исходов.

Алгоритм вычислений предполагает следующие этапы:

1. Задать базовые параметры из выражений (формулы 1–7).

2. Определить законы распределения случайных величин.

3. Сгенерировать  $N = 10\,000$  реализаций параметров.

4. По результатам моделирования определяется разброс (дисперсия) ключевых показателей (прибыли, себестоимости, рентабельности), что обеспечивает количественную оценку рисков проекта и позволяет выявить их чувствительность к изменению исходных факторов.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования с применением метода Монте-Карло и сравнения двух вариантов установки, позволяющего комплексно оценить объемы производства, прибыльность и риски проекта. Моделирование выполнено на данном этапе на тестовых данных в Excel (вероятности распределены по равномерному закону), чтобы показать суть предлагаемой модели. Так, при значениях индекса рентабельности  $I_p = 0,95-0,97$ , индекса издержкостности  $I_y = 0,95-1,06$  и индекса оборота (зависящего от возможных колебаний цен на компоненты извлекаемого гидроминерального сырья и объемов его извлечения)  $I_o = 0,76-1,1$ , зависимость приобретает вид темной области на рисунке 1. На этом же рисунке более светлая область отображает потенциал при изменении технологической схемы, что описывается иными прогнозными интервалами:  $I_p = 0,8-0,93$ ;  $I_y = 1,19-1,51$ ;  $I_o = 0,95-1,32$ .

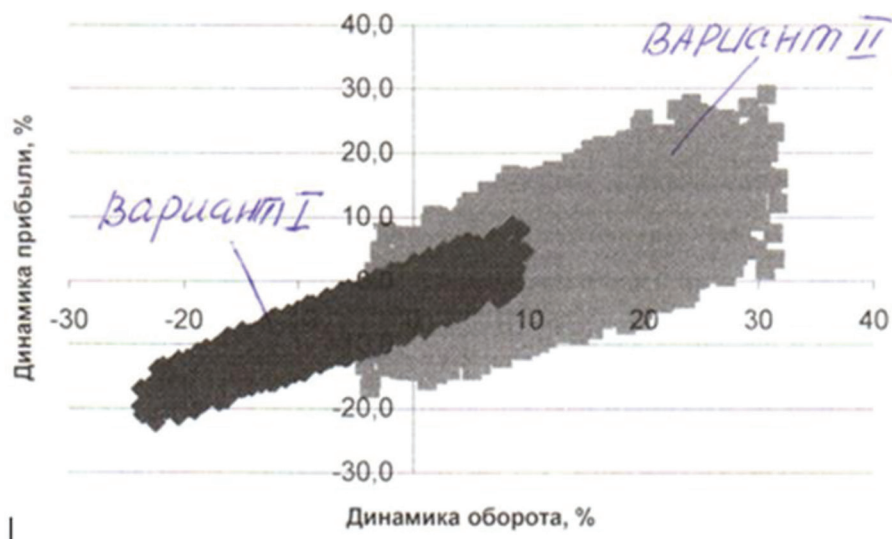


Рисунок 1. Графическое отображение результатов моделирования по двум вариантам

Результаты моделирования позволяют оценить области возможных значений прибыли и риска (дисперсии). Анализ показывает, что первоначальный набор извлечения большего количества компонентов, несмотря на снижение дисперсии (риска), характеризуется недостаточной рентабельностью. В то же время альтернативная технологическая схема демонстрирует потенциал для достижения более высоких показателей оборота, но на более высоком уровне риска.

На последующих этапах можно выбрать из сгенерированных вариантов парето-оптимальные наборы технико-экономических параметров установки для извлечения гидроминерального сырья, обеспечивающие баланс прибыльности и рисков конкретного инновационного проекта. Например, можно отобрать наиболее перспективные скважины по критерию эффективности капиталовложений. При ограниченном бюджете метод динамического программирования позволит оптимально распределить средства между наиболее перспективными скважинами, обеспечивая максимальный экономический эффект для заданного уровня риска. Для формирования продуктового портфеля модель позволяет оптимизировать ассортимент извлекаемых компонентов с учетом корреляции их ценовых колебаний и технологической совместимости процессов извлечения. Особую важность представляет анализ устойчивости проекта, который включает определение критических значений ключевых параметров, расчет вероятности сохранения рентабельности при различных сценариях рыночной конъюнктуры и построение комплексной карты рисков. Такой подход обеспечивает не

только выбор парето-оптимальных конфигураций установки, но и создает основу для адаптивного управления проектом в условиях изменяющихся внешних факторов. Все это планируется реализовать в дальнейшем в программном продукте, который позволит создать базу данных по результатам исследования состава подтоварной воды на скважинах, базу данных колебаний рыночных цен и вариантов различных технологических конфигураций, чтобы дать возможность пользователю выбрать оптимальный вариант установки исходя из его задач.

Таким образом, современные подходы к оценке потенциала добычи гидроминерального сырья предполагают комплексное моделирование, позволяющее варьировать технологические схемы переработки и анализировать влияние рыночной конъюнктуры на экономические показатели проекта. Без применения таких методов высока вероятность как недооценки скрытых затрат, так и неиспользования потенциально прибыльных возможностей, которые могут обеспечить рентабельность добычи гидроминерального сырья.

Методика компьютерного моделирования экономической эффективности добычи гидроминерального сырья реализуется через последовательность взаимосвязанных этапов, каждый из которых уточняет прогнозные оценки и минимизирует риски проекта.

Первичный этап включает сбор и систематизацию данных о месторождении: химический состав подтоварной воды, гидрогеологические условия, объемы запасов и инфраструктурные ограничения. Особое внимание уделяется анализу возможных колебаний химического состава, которые могут

существенно повлиять на выбор технологий переработки.

Этап технологического моделирования предполагает построение сценариев добычи и переработки с варьированием методов извлечения и очистки компонентов. Компьютерные симуляции позволяют определить оптимальные технологические решения с учетом энергетических затрат и технологических ограничений.

Экономический анализ включает моделирование себестоимости добычи, капитальных и операционных расходов, а также потенциальной выручки от реализации продукции. Применение методов анализа чувствительности позволяет идентифицировать факторы, оказывающие наибольшее влияние на рентабельность проекта.

Прогноз рыночных условий базируется на моделировании динамики спроса и предложения, анализе ценовой конъюнктуры и оценке влияния внешних факторов, включая изменения нормативной базы и развитие технологий.

Заключительный этап предусматривает оптимизацию стратегии разработки месторождения на основе комплексного анализа всех рассчитанных параметров с помощью специализированной компьютерной программы. Такой подход обеспечивает минимизацию рисков, адаптацию к рыночным изменениям и достижение максимальной экономической эффективности проекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В рамках данного исследования была достигнута поставленная цель – разработана методика выбора оптимальной конфигурации установки для извлечения гидроминерального сырья, основанная на имитационном моделировании и анализе прибыльности и риска. Методика интегрирует инструменты стохастического анализа (метод Монте-Карло) и многокритериальной оптимизации, что позволяет учитывать неопределенность ключевых технологических и рыночных параметров.

Практическая значимость работы заключается в создании научного фундамента для инструментов поддержки принятия решений при проектировании установок переработки подтоварной воды. Реализация методики в виде программного комплекса позволит:

- снизить капитальные и операционные затраты за счет оптимизации технологической цепочки и совместного использования инфраструктуры;
- повысить устойчивость бизнес-модели к рыночным колебаниям за счет диверсификации выпускаемой продукции.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием разработанного подхода и включают:

- уточнение стохастических моделей входных параметров на основе накопленных промышленных данных;
- разработку модулей машинного обучения для ускорения процедуры оптимизации и адаптации к изменяющимся условиям в режиме, близком к реальному времени;
- интеграцию имитационной модели с платформами цифровых двойников для создания комплексных систем управления технологическим процессом.

Таким образом, представленная методика формирует целостный подход к интеллектуальному проектированию ресурсоэффективных и экономически устойчивых производств по комплексной переработке гидроминерального сырья.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные вопросы освоения гидроминерального сырья в качестве попутно добываемого полезного ископаемого при разработке нефтяных месторождений / А. А. Гудкова, Е. А. Савельева, В. В. Касаткин, И. Ю. Белкин // Недропользование XXI век. – 2019. – № 6. – С. 70–75.
2. Атаева, Б. Возможность извлечения полезных элементов из подземных гидроминеральных вод / Б. Атаева, Х. Атаев // Мировая экономика и бизнес-администрирование : сборник материалов и докладов XX Международного научно-практического семинара (Минск, 02–03 октября 2024 г.). – Минск : Четыре четверти, 2024. – С. 212–215.
3. Бандалетова, А. А. Извлечение лития из попутных вод на примере Оренбургского НГКМ / А. А. Бандалетова, А. Ю. Гаврилов, Е. В. Галин // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 29–32.
4. Бураков, Ю. Г. Совместное освоение углеводородного и гидроминерального сырья на месторождениях нефти и газа / Ю. Г. Бураков // Вести газовой науки. – 2014. – № 4 (20). – С. 59–68.
5. Ершакова, Л. В. Анализ возможности экстракционного извлечения йода при промышленной переработке сырья / Л. В. Ершакова, А. Д. Степанов, П. А. Пономарева // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции (Оренбург, 01–03 февраля 2024 г.). – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2024. – С. 4824–4827.
6. Кленси, К. Дж. Моделирование рынка: как спрогнозировать успех нового продукта / К. Дж. Кленси. – Москва : Вершина, 2007. – 272 с.
7. Колесень, Н. А. Оценка перспектив извлечения ценных элементов из гидроминерального сырья в Восточной Сибири / Н. А. Колесень // Нефтяная смена. Энергия



- будущего! : материалы IX Всероссийской научно-практической конференции (Красноярск, 06 мая 2023 г.). – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 92–93.
8. Некрасов, А. В. Рыночный потенциал как инструмент управления региональными полиграфическими предприятиями : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.05. – Омск, 2009. – 158 с.
  9. Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года : распоряжение Правительства РФ от 11 июля 2024 г. № 1838-р // КонсультантПлюс. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_481663/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_481663/) (дата обращения: 20.09.2025).
  10. Патент 2132819 Российская Федерация, МПК C02F 1/04, C01B 7/19, 7/14, C01D 3/06. Способ комплексной переработки гидроминерального сырья : № 96116488/03 : заявл. 09.10.1996 : опубл. 10.07.1999 / Жилин А. Г., Иштерьяков А. Д., Аминов К. Х., Ксензенков В. И. – 5 с.
  11. Патент 2523318 Российская Федерация, МПК E21B 43/14 (2006.01). Способ разработки совместно залегающих углеводородов и гидроминерального сырья многопластового месторождения : № 2013109323/03 : заявл. 01.03.2013 : опубл. 20.07.2014 / Темиров В. Г., Саркаров Р. А., Селезнев В. В. – 8 с.
  12. Патент 2751948 Российская Федерация, МПК C22B 26/12 (2006.01). Способ переработки гидроминерального литийсодержащего сырья : № 2020117126 : заявл. 28.05.2020 : опубл. 21.07.2021 / Кондруцкий Д. А., Гаджиев Г. Р. – 7 с.
  13. Патент № 2148159 Российская Федерация, МПК E21 B43/20 : № 98109123/03 : заявл. 20.05.1998 : опубл. 27.04.2000 / Галлеев Р. Г., Тахаутдинов Ш. Ф., Хисамов Р. С. [и др.] ; заявитель АО «Татнефть». – 6 с.
  14. Селективное извлечение лития из минерального, гидроминерального и вторичного сырья / А. Ю. Цивадзе, В. Е. Баулин, Г. В. Костикова, А. А. Бездомников // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 7. – С. 623–630.
  15. Rare Earth Metals Market = Анализ мирового рынка редкоземельных металлов // Research Nester. – URL: <https://www.researchnester.com/ru/reports/rare-earth-metals-market/5142> (date of applocation: 20.09.2025).

