

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
УПРАВЛЕНИЯ, ЭКОНОМИКИ И ИНФОРМАЦИИ РОСАТОМА
(ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ»)

На правах рукописи

УДК

БРОНЗ ПОЛИНА ВЛАДИМИРОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО ИНТЕРВАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством
специализация – экономика, организация и управление
предприятиями, отраслями, комплексами
(промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Научный руководитель
Профессор, д.т.н. Вошинин Александр Павлович

Москва – 2007

Оглавление	Стр.
Введение.....	4
Глава 1. Обзор и анализ существующих методик оценки инвестиционных проектов на стадии тендерной заявки при неопределенности и нечеткости данных.....	9
1.1. Существующие подходы к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов.....	11
1.1.1. Методические рекомендации UNIDO по оценке эффективности инвестиционных проектов.....	11
1.1.2. Методические рекомендации МАГАТЭ для оценки инвестиционных проектов АЭС на стадии тендерной заявки.....	18
1.1.3. Методики проектных организаций Росатома для оценки эффективности проектов АЭС по укрупненным данным.....	21
1.2. Оценка устойчивости и рисков инвестиционных проектов.....	24
1.3. Модели описания неопределенности.....	35
1.4. Операции с неопределенными числами при оценке рисков.....	43
1.4.1. Общие свойства неопределенных чисел.....	44
1.4.2. Операции со случайными числами.....	45
1.4.3. Операции с интервальными числами.....	47
1.4.4. Операции с нечеткими числами.....	52
Выводы к главе 1.....	58
Глава 2. Разработка метода оценки эффективности инвестиционных проектов электростанций по интервальным данным.....	60
2.1. Гипотезы сопоставимости инвестиционных проектов электростанций по укрупненным данным.....	60
2.2. Проверка монотонности зависимости показателей эффективности от варьируемых ТЭП.....	65
2.3. Определение допустимых границ изменения ТЭП при расчете интервальных показателей.....	67

2.3.1. Условия монотонности показателя NPV	68
2.3.2. Условия монотонности показателя УДЗ.....	73
2.3.3. Условия монотонности показателя ДЗ.....	77
2.4. Метод оценки рисков инвестиционных проектов электростанций	83
2.5. Построение многофакторных моделей показателей эффективности по данным вычислительного эксперимента	86
2.6. Оценка чувствительности и рисков инвестиционного проекта с использованием многофакторных моделей	100
Выводы к главе 2.....	105
Глава 3. Оценка эффективности инвестиционного проекта АЭС с реакторной установкой ВВЭР – 1000 и его сравнение с проектами ТЭС на газе и угле. 107	
3.1. Описание разработанного пакета программ.....	109
3.1.1. Описание программы «Интервал-Инвест» для оценки эффективности инвестиционного проекта АЭС по интервальным данным	109
3.1.2. Описание программы «Модели ПФЭ» для построения приближенных многофакторных моделей показателей эффективности.....	114
3.1.3. Описание программы «Энерго-Инвест» для оценки сравнительной эффективности проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе.....	118
3.2. Оценка экономической эффективности и рисков инвестиционного проекта АЭС с реакторной установкой ВВЭР - 1000.....	122
3.3. Оценка сравнительной эффективности проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе	131
Выводы к главе 3.....	137
Выводы по работе	139
Список литературных источников	140

Введение

Актуальность исследования. В настоящее время основная доля производства электроэнергии в мире приходится на электростанции, работающие на газе, угле и ядерном топливе. Углубляющийся разрыв между энергопотреблением и известной ресурсной базой органического сырья определил качественно новый этап развития мировой энергетики, одной из главных составляющих которого является ренессанс мировой атомной энергетики.

Правительство России в 2006 году утвердило федеральную целевую программу Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007 - 2010 годы и на перспективу до 2015 года, в которой предусмотрен масштабный ввод атомных электростанции с темпом 2 ГВт в год. Программа реализуется в виде совокупности инвестиционных проектов и предполагает оценку конкурентоспособности и сравнительной экономической эффективности масштабных инвестиционных проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе, которые требуют значительных капиталовложений и имеют длительные от 40 до 60 лет сроки службы.

Любой инвестиционный проект может быть охарактеризован с различных сторон - технической, организационной, экологической, социальной и др. Для инвестора решающее значение имеет экономическая эффективность проекта, определяемая целом рядом показателей эффективности, описанных в существующих зарубежных и отечественных Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов.

Важным элементом процедуры принятия решения о выборе предпочтительного проекта электростанции является оценка экономических рисков ИП, порождаемых неопределенностью макроэкономических условий развития (динамика цен и тарифов на электроэнергию, топливо, стоимость

рабочей силы и т.п.) и неточностью исходных технико-экономических параметров будущей электростанции.

В существующих методических рекомендациях эта оценка проводится путем анализа ИП при различных сценариях (What-if-Analysis), каждому из которых экспертным путем приписывается определенная вероятность. Риск оценивается как сумма вероятностей сценариев с отрицательными результатами. Неточность и нечеткость исходных данных, которые трудно описать в вероятностных терминах, при этом не учитывается.

Это обстоятельство требует формирования новых методов к оценке эффективности ИП электростанций, которые позволяют учесть факторы неопределенности любой природы и разработки новых моделей описания неопределенности и неточности данных, включая нечеткие и интервальные модели.

Цель работы. Основной целью работы является разработка методов оценки экономической эффективности инвестиционных проектов электростанций по интервальным данным при неточности технико-экономических параметров проектов и неопределенности макроэкономических условий их реализации.

Задачи исследования. Для реализации поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Обзор и сравнительный анализ существующих методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности с учетом специфики инвестиционных проектов электростанций. Анализ возможности применения интервальных и нечетких моделей при оценке эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности.
2. Разработка методов и моделей оценки интервальных показателей экономической эффективности инвестиционных проектов электростанций по интервальным данным.

3. Выявление допустимой области изменения технико-экономических параметров проектов, в которой задача нахождения интервальных показателей сводится к расчету их границ для двух экстремальных наборов технико-экономических параметров проекта.
4. Разработка алгоритма построения многофакторных моделей, описывающих зависимость показателей эффективности инвестиционного проекта электростанции от варьируемых технико-экономических параметров проекта.
5. Оценка экономической эффективности разрабатываемого проекта АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000 и его сравнительный анализ с проектами ТЭС на газе и угле.

Объектом исследования являются инвестиционные проекты электростанций.

Предметом исследования в настоящей работе являются методы и модели оценки эффективности инвестиционных проектов электростанций при неточных и неопределенных данных.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методология UNIDO и МАГАТЭ оценки экономической эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности, методы проверки монотонности экономических функций в заданной области, методы интервального анализа данных, а также элементы теории оптимального эксперимента.

Научная новизна исследования состоит в следующих результатах:

1. На основе исследования и анализа моделей описания неопределенности и подходов к оценке экономических рисков в существующих методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов электростанций показана необходимость их дополнения за счет включения интервальных моделей, позволяющих учесть неточность технико-экономических параметров проекта.

2. Разработан новый метод оценки экономической эффективности и рисков инвестиционных проектов электростанций, позволяющий по интервальным данным рассчитать интервальные значения показателей эффективности.
3. Определена допустимая область изменения интервальных данных, в которой нахождение интервальных показателей эффективности инвестиционного проекта электростанции сводится к формированию двух экстремальных наборов, определяющих границы возможного изменения показателей эффективности.
4. Разработан алгоритм построения многофакторных моделей, описывающих зависимости показателей эффективности проектов от варьируемых исходных данных на основе реализации оптимального вычислительного эксперимента.
5. На основе сформированных интервальных данных проведено сравнение экономической эффективности инвестиционного проекта АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000 с инвестиционными проектами электростанций на газе и угле.

Практическая ценность. Разработанные в диссертации методы и модели оценки экономической эффективности и рисков инвестиционных проектов электростанций на основе интервальных данных позволяют Руководству и предприятиям атомной отрасли:

1. Выявить факторы неопределенности и границы неточности инвестиционных проектов АЭС и применить разработанные методы для определения показателей эффективности проекта и оценки экономического риска.
2. Повысить достоверность и обоснованность решений при отборе наиболее эффективного проекта на стадии проведения конкурса проектов.
3. Использовать разработанные методы и инструментальные средства для оценки сравнительной эффективности инвестиционных проектов АЭС и

ТЭС на органическом топливе при разработке новой Энергетической стратегии России.

Апробация и реализация результатов работы. Основные теоретические и методические положения диссертации были доложены и обсуждены на международных, всероссийских научно-практических конференциях: Второй Международной конференции Energy_Strat'2004 «Планирование развития энергетики: методология, программное обеспечение, приложения» (Москва, 2004 г.), Международной конференции Украинского ядерного общества «Ядерная энергетика Украины – пути развития и международное сотрудничество» (Киев, 2005 г.), Всероссийском (с международным участием) совещании по интервальному анализу и его приложениям ИНТЕРВАЛ-2006 (Санкт-Петербург, 2006 г.), а также на научных сессиях МИФИ-2006 и МИФИ-2007. Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, использованы в отчетах НИР ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», разработанных по контракту с Управлением атомной энергетики Росатома по теме «Сценарное и вариантное обоснование устойчивого и конкурентоспособного развития атомной энергетики в условиях прогнозируемых изменений макроэкономических параметров экономики России», а также для решения различных производственно-аналитических задач ФГУП ГНЦ РФ НИИАР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 87 наименований, имеет объем 150 страниц, включая 31 рисунок и 26 таблиц.

Глава 1. Обзор и анализ существующих методик оценки инвестиционных проектов на стадии тендерной заявки при неопределенности и нечеткости данных

Развитие экономики любой страны реализуется в виде совокупности инвестиционных проектов (ИП). При этом ключевую роль в контексте конкурентоспособности национальной экономики играют показатели экономической эффективности инвестиционных проектов.

В общем случае эффективность проекта, в том числе и инвестиционного, – это категория, выражающая соответствие результатов и затрат проекта целям и интересам его участников, включая в необходимых случаях государство и население [1].

Как категория эффективность проекта имеет много разных видов. В общем случае она включает:

- экономическую эффективность, отражающую соответствие затрат и результатов проекта целям и интересам его участников в денежной форме;
- социальную эффективность, отражающую соответствие затрат и социальных результатов проекта целям и социальным интересам его участников (включая государство и общество);
- экологическую эффективность, отражающую соответствие затрат и экологических результатов проекта интересам государства общества;
- оборонную эффективность, отражающую соответствие затрат и результатов проекта интересам безопасности страны;
- другие виды эффективности.

В данной работе будут рассмотрены только вопросы оценки первого вида эффективности – экономической эффективности инвестиционных проектов, в связи с чем термин «экономическая» часто будет опускаться.

Учитывая, что инвестиционные проекты электростанций относятся к долгосрочным проектам с жизненным циклом более 40÷50 лет, оценку их экономической эффективности можно отнести к задачам принятия решений в условиях неопределенности [2, 3].

Очевидными факторами неопределенности для проектов энергоблоков на горизонте планирования являются:

- неточность технико-экономических характеристик существующих энерготехнологий;
- совершенствование технологий и практики проведения ремонтных работ;
- изменение нормы дисконта и банковского кредита;
- уровень мировых цен на ядерное и органическое топливо;
- тарифы на электроэнергию;
- характеристики энергоблоков нового поколения.

В главе рассматриваются существующие подходы к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов, как общего плана, так и проектов энергоблоков и электростанций. Известно, что подобные инвестиционные проекты относятся к долгосрочным, крупномасштабным проектам с большим сроком окупаемости и требуют привлечения значительных финансовых средств. Учитывая, что цена принятия ошибочного решения при выборе наилучшего среди альтернативных проектов очень высока, для строгого обоснования принимаемых решений необходимы серьезные методические разработки в части сравнения эффективности альтернативных проектов в энергетике.

Оценку любого инвестиционного проекта с длительным жизненным циклом приходится находить в условиях неопределенности будущих условий развития, включая динамику цен и тарифов на электроэнергию, топливо, стоимость рабочей силы и т.п. В связи с этим в главе проводится обзор и анализ литературы по различным моделям описания неопределенности и их

возможному использованию в задачах оценки экономической эффективности и рисков инвестиционных проектов.

1.1. Существующие подходы к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов

В зависимости от выбранной методики для анализа экономической эффективности проекта рекомендуются применять те или иные показатели экономической эффективности.

В экономической литературе имеется большое количество, как зарубежных методик, так и отечественных методик, рекомендуемых для оценки эффективности инвестиционных проектов, которые в контексте оценки проектов АЭС можно условно разбить на три группы:

1. Методики [1, 4÷7] для проектов общего плана, основанные на методических рекомендациях UNIDO.
2. Методические рекомендации МАГАТЭ для оценки ИП АЭС на стадии тендерной заявки, учитывающие специфику инвестиционных проектов в электроэнергетике [8].
3. Методики проектных организаций Росатома для оценки эффективности проектов АЭС по укрупненным данным [9÷14]

1.1.1. Методические рекомендации UNIDO по оценке эффективности инвестиционных проектов

С экономической точки зрения инвестиционные проекты описываются финансовыми потоками (потоками платежей и поступлений). Как правило, вначале необходимо вкладывать деньги (производить затраты), а затем за счет поступлений возмещать затраты и получать прибыль.

В конкретный промежуток времени обычно происходят как поступления, так и платежи. Как элемент финансового потока рассматривается итоговый результат, т.е. поступления минус платежи. Этот результат может быть как положительным, так и отрицательным.

В финансовом плане, когда речь идет о целесообразности принятия того или иного инвестиционного проекта, необходимо получить ответы на три вопроса:

- а) каков необходимый объем финансовых ресурсов?
- б) где найти источники финансирования (кредитования) в требуемом объеме и какова цена их услуг?
- в) окупятся ли сделанные вложения, т.е. достаточен ли объем прогнозируемых поступлений по сравнению со сделанными инвестициями?

Ответ на первый вопрос определяется инженерной сутью проекта и выражается в виде финансового потока, обоснованного в бизнес-плане. Ответ на второй вопрос зависит от конкретной ситуации на финансовом рынке. Для ответа на третий вопрос необходимо от финансового потока как функции от времени перейти к той или иной его обобщенной характеристике. Такой переход целесообразен также при сравнении различных проектов.

В настоящее время достаточно широко используются как теоретические подходы к сравнению инвестиционных проектов (см. например, [15÷17]), так и компьютерные системы, в частности, ТЭО-Инвест, Computer Model of Feasibility Analysis and Reporting (COMFAR), Project Profite Screening and Preappraisal Information System (PROPSIN), Project Expert, Альт-Инвест. При этом иногда системы поддержки принятия решений (т.е. инструментарий менеджера) вносят необоснованные ограничения. Так, в одном из известных программных продуктов горизонт планирования ограничен 10 годами. Значит, с его помощью трудно рассчитывать экономический эффект от долговременных проектов типа строительства электростанции или моста, разработки новой марки автомашины или - в масштабах фермерского хозяйства - улучшения качества земельного участка. Тем более необходима осторожность при использовании подобных программных средств для анализа последствий применения имеющих долговременное влияние управляющих воздействий на демографические процессы или процессы налогообложения. Следует

отметить, что инвестиционные проекты имеют не только экономические, но и социальные, технологические, экологические и даже политические последствия.

В основе процесса принятия управленческих решений инвестиционного характера лежит оценка и сравнение объема предполагаемых инвестиций и будущих денежных поступлений. Общая логика анализа с использованием формализованных показателей в принципе достаточно очевидна — необходимо сравнивать величину требуемых инвестиций с прогнозируемыми доходами.

Ниже рассмотрены показатели экономической эффективности ИП, предлагаемые в рамках методик [1, 4, 5, 6] для проектов общего плана, основанные на методических рекомендациях UNIDO.

В этих методиках используются показатели экономической эффективности инвестиционных проектов, включающие: чистую текущую стоимость или чистый дисконтированный доход (*Net Present Value, NPV*), внутреннюю норму доходности (*Internal Rate of Return, IRR*), дисконтированный срок окупаемости проекта (*Discounted Payback Period, DPP*), дисконтированные затраты (ДЗ), индекс доходности дисконтированных затрат (ИДДЗ), и ряд других. Все показатели задают единственное число, характеризующее эффективность проекта на всем жизненном цикле от начала строительства до вывода из эксплуатации.

Любой ИП независимо от его специфики на каждом шаге t порождает разновременные, положительные и отрицательные денежные потоки $\phi(t)$. Для их приведения к единому моменту t_0 применяется операция дисконтирования, сводящаяся к умножению $\phi(t)$ на член дисконтирования $\alpha(t)=1/(1+d)^{-(t-t_0)}$, где d - заданная норма дисконта, t –момент окончания текущего шага.

С позиции инвестора наиболее важным показателем является *NPV*, который рассчитывается по формуле:

$$NPV = \sum_t \phi_t \cdot \alpha_t(d) \quad (1.1a)$$

Очень часто в экономической литературе встречается следующая запись этого показателя:

$$NPV = \sum_{t=T_1}^{T_2} \frac{D_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t}, \quad (1.16)$$

где D_t – текущие доходы в моменты времени t ; R_t – текущие денежные расходы в моменты времени t ; d – норма дисконтирования; T_1 – длительность строительства, лет; T_2 – длительность жизненного цикла проекта, лет; t – дискретное время (номер года или квартала).

На рис. 1.1 показан типичный график чистой кумулятивной текущей стоимости на жизненном цикле инвестиционного проекта в миллионах долларов.



Рис. 1.1. Чистая кумулятивная текущая стоимость инвестиционного проекта

На графике рис. 1.1 можно выделить два участка:

- поток накопленных капитальных вложений в строительство объекта при длительности строительства 7 лет. Общая дисконтированная стоимость строительства составляет 949 млн.долл.;

- чистая кумулятивная текущая стоимость на участке эксплуатации объекта от начала эксплуатации объекта в 8-м году до конца жизненного цикла в 45-м году.

Чистая кумулятивная текущая стоимость в 45-м году, равная 930 млн.долл., определяет значение показателя NPV .

Важными дополнительными оценками [1] экономической эффективности и устойчивости проекта являются т. н. предельные параметры проекта. Предельным параметром проекта x для показателя $f(x)$ называется такое значение x_0 , при котором показатель экономической эффективности равен нулю, т.е. $f(x_0)=0$.

В качестве предельных параметров для NPV выступают:

- внутренняя норма доходности проекта (IRR), т.е. процентная ставка, при которой NPV равен 0.
- срок окупаемости проекта DPP , т.е. период времени, необходимый для того, чтобы доходы, генерируемые инвестициями, с учетом дисконтирования, покрыли затраты на инвестиции. Этот показатель определяют последовательным расчетом NPV для каждого периода проекта. Точка, в которой NPV примет положительное значение, будет являться точкой окупаемости. (с математической точки зрения, номер года, при котором $NPV=0$).

На рис. 1.1 срок окупаемости объекта определяется как точка пересечения накопленного потока с горизонтальной осью, где $NPV=0$. Как видно на рис. 1.1 срок окупаемости исследуемого инвестиционного проекта составляет 18 лет.

Считается, что чем выше значение IRR и больше разница между ее значением и заданной ставкой дисконта, тем устойчивее данный проект. Т.к. инвестор начнет получать доход от проекта только при $t > DPP$, очевидно, что срок окупаемости должен быть значительно меньше длительности жизненного цикла.

Если в качестве инвестора выступает собственник, например, государство, то основным показателем экономической эффективности обычно выступают дисконтированные затраты (DZ), находимые по формуле:

$$DZ = \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t}, \quad (1.2)$$

где T_2 – длительность жизненного цикла проекта.

Показатель DZ также используется при расчете среднесрочных и долгосрочных программ развития энергосистем. При этом оптимальной считается программа, которая на множестве вариантов обеспечивает минимальное значение общих DZ на программу. При ранжировании проектов часто используются также показатель удельных дисконтированных затрат, измеряемый в рублях и центах за кВт·ч.

Необходимо подчеркнуть, что в формулах (1.1) и (1.2) финансовые потоки R_t и D_t в общем случае задаются на горизонте планирования в виде функций времени и дисконтируются.

Известно, что изменение нормы дисконтирования может менять результат сравнения ИП по любому из рекомендуемых показателей эффективности. Это заставляет более внимательно рассмотреть суть и обоснование необходимости методики дисконтирования.

В современной зарубежной и отечественной экономической литературе концепция дисконтирования является фундаментом, на котором строятся оценки и показатели сравнительной эффективности различных ИП. Основной принцип методики дисконтирования в популярной литературе разъясняется короткой формулой: *«Доллар, сегодня - дороже, чем доллар завтра»*.

Обоснование необходимости дисконтирования обычно проводится в схеме, включающей двух участников проекта: заемщика (предположительно собственника будущего объекта) и инвестора (кредитора), у которого есть две альтернативы: дать необходимую сумму заемщику на определенных условиях или положить эти деньги в банк под определенный процент. В

последнем случае кредитор рассчитывает ожидаемую прибыль, используя формулу сложных процентов, в соответствии с которой один вложенный доллар через T лет будет стоить $\sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+E)^t}$ долей доллара, где E – банковский процент на капитал.

При учете риска и инфляции используется более сложная формула дисконтирования:

$$\sum_{t=0}^T \frac{1}{(1-I)^t (1+E)^t (1+R)^t}, \quad (1.3)$$

где I -коэффициент инфляции, R - поправка на риск (премия за риск). Часто, как и в данной работе, формулу (1.3) упрощают, записывая ее знаменатель в виде $(1+d)^t$ и принимая норму дисконта $d \cong E-I+R$.

Необходимость применения методики дисконтирования в экономической литературе считается не требующей доказательств. Споры идут лишь о том, какую норму дисконта $d > 0$ необходимо задать при проведении расчетов.

В [5] подчеркивается, что «норма дисконта является экзогенно задаваемым основным экономическим нормативом, используемым при оценке эффективности инвестиционного проекта». С утверждением можно согласиться, однако неясно, сколько и каких участников проекта имеется, кто из них «экзогенно задает» норму, совпадают ли точки зрения участников на норму дисконта и их приоритеты при оценке эффективности проекта?

Ситуацию не проясняет и приведенная в [5] классификация норм дисконтирования:

- коммерческая норма (определяется с учетом альтернативного вложения капитала);
- норма участника проекта (выбирается самим участником);
- социальная норма (устанавливается федеральными органами управления России),

- бюджетная норма (устанавливается федеральными или региональными органами).

Учитывая, что в настоящее время Правительство России не определило ни социальной, ни бюджетной нормы дисконта, в [5] указано, что в этих условиях может применяться коммерческая норма.

Несомненным достоинством подхода UNIDO является обеспечение единой, обоснованной методологии для всех участников при оценке экономической эффективности любого инвестиционного проекта.

К недостатку подхода UNIDO следует отнести его ориентацию, в основном, на внешнего инвестора, для которого главным показателем является NPV , зависящий от неопределенного тарифа на электроэнергию. Для современных экономических условий России, когда строительство АЭС в основном производится из средств собственника (государства), главным показателем оценки экономической эффективности проектов АЭС и ТЭС обычно принимаются интегральные дисконтированные затраты (DZ).

Приведенные выше показатели эффективности применяются для проектов общего плана.

1.1.2. Методические рекомендации МАГАТЭ для оценки инвестиционных проектов АЭС на стадии тендерной заявки

Методология оценки эффективности проектов АЭС, детально описанная в техническом отчете МАГАТЭ №396 2000 года [8], рекомендуется на стадии тендерной заявки для стран, не имеющих собственной атомной промышленности.

Схема расчетов оценки эффективности и ранжировки проектов АЭС приведена на рис. 1.2.

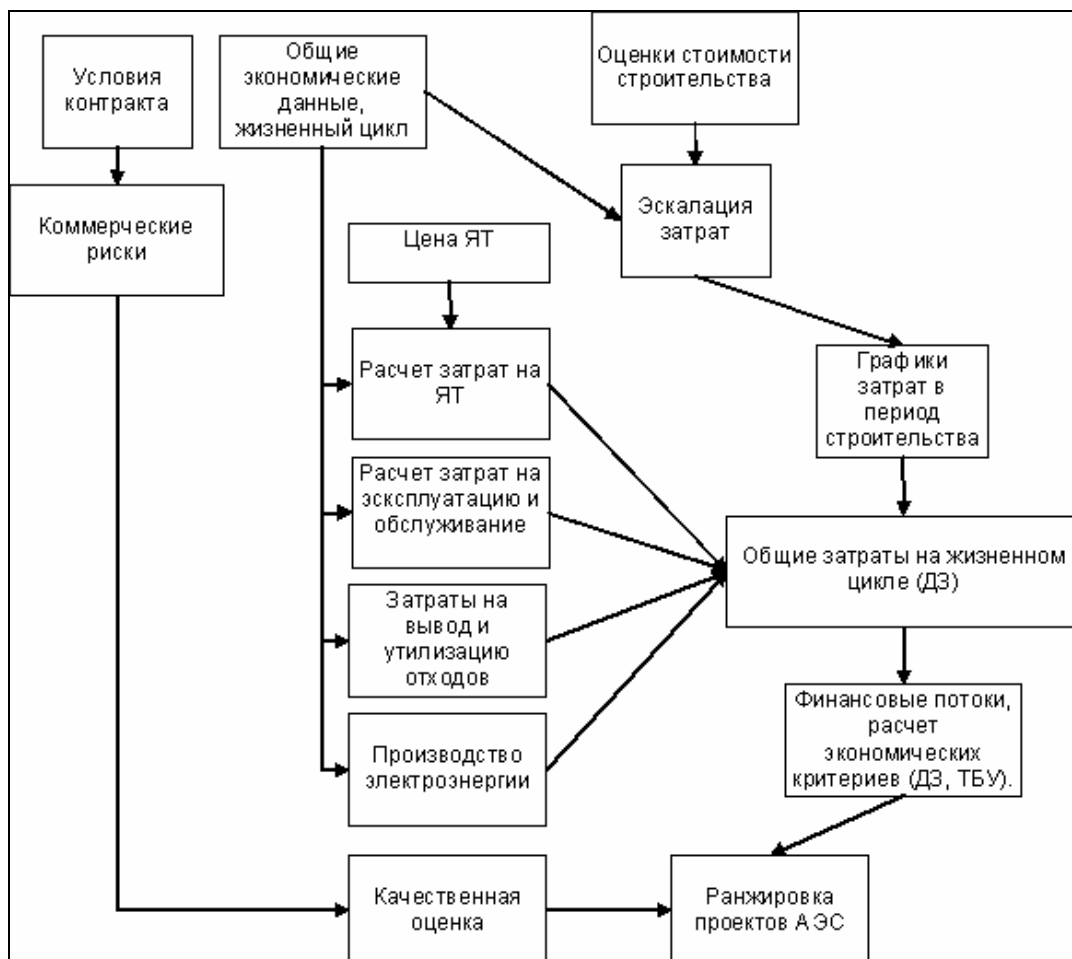


Рис. 1.2. Схема отбора проектов АЭС на стадии тендера

На схеме рис. 1.2 показан алгоритм расчета составляющих проектов АЭС, включая затраты на капитальное строительство, ядерное топливо, эксплуатацию и обслуживание, а также общие затраты на жизненном цикле АЭС. При расчетах обычно закладывается эскалация затрат на горизонте планирования, вызванная прогнозируемым ростом цен на товары и услуги.

Предусматривается две оценки эффективности проекта АЭС - качественная, связанная с условиями контракта и коммерческими рисками, и количественная, на основе расчетных показателей эффективности.

Для количественной оценки экономической эффективности и ранжировки проектов используется показатель C_{lev} минимальной дисконтированной стоимости производства электроэнергии (Lowest levelized discounted electricity generation cost). Показатель C_{lev} определяет такой постоянный тариф на продаваемую электроэнергию, при котором суммарная

дисконтированная выручка от продажи энергии точно равна сумме дисконтированных общих затрат, т.е. выполняется равенство

$$\sum_{t=T_0}^{T_L} \frac{C_{lev} \cdot W_t}{(1+d)^{t-T_D}} = \sum_{t=T_B}^{T_E} \frac{C_t}{(1+d)^{t-T_D}} \quad (1.4)$$

где t – текущий год на горизонте планирования, C_t - полные затраты АЭС (капитальные, на топливо, эксплуатацию и вывод из эксплуатации); W_t производство электроэнергии (кВт.ч. в год); d - коэффициент дисконтирования; T_B - дата подачи заявки на тендер; T_D - момент приведения разновременных затрат, т.е. дата, к которой приводятся расчеты; T_O - дата начала коммерческого производства электроэнергии; T_L - дата окончания срока жизни установки; T_E - дата снятия АЭС с эксплуатации. Необходимо отметить, что дата снятия АЭС с эксплуатации T_E не совпадает с датой окончания срока жизни установки T_L . При этом $T_E < T_L$, т.к. необходимо определенное время на вывод АЭС из эксплуатации и утилизацию отходов. В связи с этим число членов в «левой» сумме равенства (1.4) меньше, чем число членов в «правой» сумме. Момент приведения T_D может выбираться собственником или инвестором и, как правило, он совпадает или с датой подачи заявки на тендер или с датой начала эксплуатации, т.е. началом коммерческого производства электроэнергии.

В левой части равенства (1.4) стоит суммарная дисконтированная выручка от продажи электроэнергии с начала эксплуатации, если тариф равен C_{lev} . Учитывая, что в правой части равенства (1.4) стоят суммарные дисконтированные общие затраты за время жизненного цикла, равенство (1.4) означает, что при тарифе C_{lev} на жизненном цикле АЭС суммарная выручка от продажи электроэнергии равна суммарным полным затратам, т.е. доход собственника АЭС равен нулю.

Учитывая, что показатель C_{lev} имеет ясный экономический смысл, в отечественной литературе он иногда переводится как **минимальные удельные дисконтированные затраты на производство электроэнергии (УДЗ)**. Этот же показатель рекомендуется **ИНЭИ РАН [18÷20]**.

В формулу (1.4) показатель C_{lev} входит в неявном виде, однако, разрешив уравнение (1.4) относительно неизвестной C_{lev} , можно записать явное выражение для показателя:

$$УДЗ = C_{lev} = \sum_{t=T_B}^{T_E} \frac{C_t}{(1+d)^{t-T_D}} \Bigg/ \sum_{t=T_0}^{T_L} \frac{W_t}{(1+d)^{t-T_D}} \quad (1.5)$$

Если не принимать во внимание методологическую схему обоснования показателя эффективности C_{lev} , то формула (1.5) может вызвать недоумение, т.к. формально в ее знаменателе стоит значение «дисконтированной выработки энергии» в кВт.ч. На первый взгляд, дисконтирование киловатт-часов не имеет экономического смысла, т.к. в экономике операция дисконтирования применяется только к денежным, а не материальным потокам. Однако, это - кажущееся противоречие, т.к. в правой части равенства формулы (1.4) дисконтирование применяется к денежному потоку выручки от продажи, а формула (1.5) просто результат алгебраического преобразования.

Очевидно, что при сравнении и ранжировке проектов АЭС по экономическому показателю предпочтение отдается тому проекту, у которого значение показателя $УДЗ$ окажется минимальным.

1.1.3. Методики проектных организаций Росатома для оценки эффективности проектов АЭС по укрупненным данным

В основе методик [9÷14] проектных организаций Росатома, включая ФГУП «Атомэнергопроект» в Москве и Санкт-Петербурге, лежит метод определения проектной себестоимости производства электроэнергии на АЭС, по укрупненным составляющим затрат в предположении постоянства их ежегодных значений.

Рассматриваются следующие составляющие затрат:

- капитальные затраты АЭС на строительство;
- полные годовые издержки производства, включая: операционные (эксплуатационные) расходы; расходы на топливо; отчисления на реновацию (амортизационные отчисления).

По международной практике в стоимость строительства АЭС включаются все затраты: промышленного строительства, собственника, первой загрузки тяжелой воды и топлива. Иногда в полную стоимость строительства включается стоимость снятия АЭС с эксплуатации, если она не учитывается в эксплуатационных расходах.

Полные годовые издержки производства рассчитываются по формуле

$$I(n) = I(\varepsilon) + I(\text{рен}) + I(m) \quad (1.6)$$

где $I(n)$ – полные годовые издержки производства, $I(\varepsilon)$ – годовые эксплуатационные расходы, $I(\text{рен})$ – отчисления на реновацию (амортизационные отчисления), $I(m)$ – расходы на топливо.

Эксплуатационные расходы складываются из расходов на капитальные ремонты, зарплаты с начислениями и прочих расходов (текущие ремонты, материалы, энергия, налоги по нормативам и пр.)

$$I(\varepsilon) = I(\text{кр}) + I(\text{пр}) + I(\text{зн}), \quad (1.7)$$

где $I(\text{кр})$ – среднегодовые расходы на капитальный ремонт, $I(\text{пр})$ – прочие годовые расходы, $I(\text{зн})$ – годовые расходы на заработную плату.

Расходы на капитальный ремонт в формуле (1.7) принимаются прямо пропорциональными сметной стоимости строительства:

$$I(\text{кр}) = \alpha \cdot K(\text{см}), \quad (1.8)$$

где α – коэффициент, устанавливаемый различными проектными организациями для различных типов реакторов и состава АЭС, зависит от срока службы энергоблока; $K(\text{см})$ – сметная стоимость строительства АЭС.

Прочие расходы принимаются прямо пропорциональным сумме расходов на реновацию, капитальный ремонт и зарплату.

$$I(\text{пр}) = \beta \cdot (I(\text{рен}) + I(\text{кр}) + I(\text{зн})), \quad (1.9)$$

где β – коэффициент, устанавливаемый различными проектными организациями для различных типов реакторов и состава АЭС.

Расходы на реновацию определяются делением сметной стоимости строительства на первоначально назначенный срок службы энергоблока.

$$I(\text{рен}) = K(\text{см}) / T(\text{сл}), \quad (1.10)$$

где $T(сл)$ – первоначально назначенный срок службы энергоблока (АЭС).

Расходы на зарплату (с начислениями) определяются численностью персонала и его зарплатой.

$$I(зн) = m \cdot Z, \quad (1.11)$$

где m – штатная численность промышленно-производственного персонала (ППП), Z – средняя годовая зарплата одного работника АЭС с начислениями.

Из анализа данных различных источников [21÷26] было выявлено, что при использовании уравнений (1.6)÷(1.11), определяющих структуру и размер полных издержек производства, коэффициенты α и β принимают следующие значения (в зависимости от числа энергоблоков на АЭС, типа реактора, первоначально назначенного срока службы и др.) см. табл. 1.

Таблица 1.

Варианты коэффициентов α и β по разным источникам

Источники	α *	β
[18]	0,0295	0,200
[19]	0,0210	0,240
[20]	0,0315	0,525
[21]	0,0300	0,250
[22]	0,0200	0,240
[23]	0,0295	0,31

* α –размерность коэффициента 1/год, β –безразмерный коэффициент.

Анализ табл. 1 показывает, что значения коэффициентов в различных методиках достаточно близки, а именно $0,0200 \leq \alpha \leq 0,0315$; $0,0200 \leq \beta \leq 0,31$

Вместе с тем, можно констатировать, что в настоящее время в Росатоме отсутствует единая утвержденная методика определения укрупненных составляющих и полной проектной себестоимости производства электроэнергии атомных энергоблоков (АЭС). Вопрос о разработке единой для всех АЭПов методики определения себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, неоднократно поднимался заинтересованными организациями. Так несколько лет назад на секции №10 НТС Минатома было принято решение о разработке такой методики под руководством ВНИПИЭТ (М.И. Завадский). На совещании специалистов отрасли по проекту «АЭС-

2006» (Коллонтаево, декабрь 2005 г.) также было принято решение о разработке такой методики под руководством АЭП (В.Н. Крушельницкий).

При постоянных ежегодных значениях всех статей затрат формула расчета проектной себестоимости приобретает достаточно простой вид

$$C_{полн} = \frac{K \cdot T_{стр} + OM \cdot T_{сл}}{W \cdot T_{сл}} = \frac{K \cdot T_{стр}}{W \cdot T_{сл}} + \frac{OM}{W} \quad (1.12)$$

где K – ежегодные капитальные вложения, $T_{стр}$ – срок строительства; OM – полные годовые издержки на производство электроэнергии; W – ежегодная выработка электроэнергии.

Исследования показали, что если в формуле (1.5) для расчета показателя $УДЗ$, рекомендуемого МАГАТЭ, принять ежегодные значения затрат, такими же как в проектной методике, а норму дисконта задать равной нулю, то значение показателя $УДЗ$ и значение проектной себестоимости совпадают.

1.2. Оценка устойчивости и рисков инвестиционных проектов

При анализе экономической эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности необходимо уделять должное внимание проблемам оценки проектных рисков, что может существенно изменить оценку экономической эффективности проекта. В случае игнорирования фактора риска, количество принятых ошибочных решений при стратегическом планировании возрастает.

При использовании статистических методов управления качеством риски – это вероятности некоторых событий (в статистическом приемочном контроле риск поставщика – это вероятность забракования партии продукции хорошего качества, а риск потребителя – приемки "плохой" партии; при статистическом регулировании процессов рассматривают риск незамеченной разладки и риск излишней наладки) [27]. В теории принятия решений риск – это плата за принятие решения, отличного от оптимального, он обычно

выражается как математическое ожидание. В экономике плата выражается обычно в денежных единицах, т.е. в виде потока платежей в условиях неопределенности.

Как указано в [28], понятие риск для инвестиционных проектов применяется для обозначения трех разных составляющих:

- событие, связанное с риском (фактор риска);
- вероятность риска;
- величина денежной суммы, подвергаемой риску.

При этом каждый участник проекта в общем случае имеет свою, отличную от других участников, точку зрения на риск и его последствия.

На основании обобщения результатов исследований многих авторов по проблеме количественной оценки экономического риска, в [29] приводится шкала рисков (табл. 2), которую рекомендуют применять, когда в качестве количественной оценки риска используется вероятность наступления рискованного события.

Таблица 2.

Международная шкала градации уровней риска

Риск (вероятность нежелательного исхода)	Наименование градаций риска
0,0÷0,1	минимальный
0,1÷0,3	малый
0,3÷0,4	средний
0,4÷0,6	высокий
0,6÷0,8	максимальный
0,8÷1,0	критический

При анализе эффективности и устойчивости проекта в условиях неопределенности рекомендуются следующие оценки и методы:

1. Укрупненная оценка устойчивости
2. Расчет уровней безубыточности
3. Анализ чувствительности (метод вариации параметров)
4. Сценарный анализ

5. Метод Монте-Карло.

Каждый следующий метод в приведенном списке является более точным (хотя и более трудоемким) и требует большего объема необходимой исходной информации.

Согласно [1] первыми тремя методами рекомендуется пользоваться на более ранних стадиях разработки проектов. Все методы, кроме первого, предусматривают разработку сценариев реализации проектов в наиболее вероятных или наиболее «опасных» для каких-либо участников условиях и оценку финансовых последствий осуществления таких сценариев.

Однако, применяя тот или иной метод анализа риска, следует иметь в виду, что кажущаяся высокая (особенно при использовании имитационного моделирования) точность результатов может быть обманчивой и ввести в заблуждение аналитиков и лиц, принимающих решение [1].

Укрупненная оценка устойчивости проекта

В соответствии с [5] «проект считается устойчивым, если при всех сценариях он оказывается эффективным и финансово реализуемым, а возможные неблагоприятные последствия устраняются предусмотренными организационно-экономическими мерами».

В качестве основного показателя экономической эффективности при оценке устойчивости проекта принимается NPV . Результат проекта при фиксированном сценарии считается положительным, если $NPV > 0$. Под устойчивостью инвестиционного проекта понимается его эффективность при реализации альтернативных сценариев. При этом:

- проект считается *абсолютно устойчивым*, если он эффективен при любом сценарии;
- проект считается *достаточно устойчивым*, если он неэффективен только для сценариев с малой степенью возможности;
- проект считается *неустойчивым*, если он неэффективен только для сценариев с достаточно большой степенью возможности.

Необходимо подчеркнуть, что анализ устойчивости проекта в условиях неопределенности может проводиться каждым участником проекта на основе индивидуальных предпочтений и оценки степени возможности сценариев, в связи с этим различают:

- укрупненную оценку устойчивости проекта в целом;
- укрупненную оценку устойчивости проекта с точки зрения его участников.

Укрупненная оценка инвестиционного проекта в целом, т.е. без учета схемы его финансирования, определяется на основе умеренно-пессимистических прогнозов технико-экономических параметров (ТЭП) проекта и параметров экономического окружения (цен, ставок налогов, курсов валют и др.).

Для обеспечения устойчивости проекта в целом рекомендуются среди прочих следующие мероприятия:

- создание резервных средств на дополнительные, непредвиденные расходы (из-за задержек платежей, ошибок в проекте, увеличения сроков строительства и т.п.);
- уменьшение проектных объемов производства и реализации продукции.
- увеличение нормы дисконта на величину премии за риск (поправки на риск).

Инвестиционный проект рассматривается как устойчивый в целом [30], если он имеет достаточно высокие значения интегральных показателей, в частности, положительное значение ожидаемого NPV . Кроме показателя NPV могут использоваться и другие показатели, в частности, внутренняя норма доходности (IRR), т.е. предельное значение нормы дисконта, и индекс доходности затрат [31]. Проект в целом можно считать достаточно устойчивым, если при изменениях внешних условий выполняется условие $IRR > d$ (где d значение нормы дисконта, заданное инвестором при оценке

экономической эффективности инвестиционного проекта), а индекс доходности затрат больше значения 1.2.

В [28] детально разработаны различные методы оценки премии за риск, включая кумулятивный метод. В этом методе учитываются три вида рисков:

- страновой риск;
- риск ненадежности участника проекта;
- риск недополучения предусмотренных проектов доходов (несистематический риск).

Премия за страновой риск, который отражает инвестиционный климат страны, оценивается экспертным путем на основе международного рейтинга стран мира по уровню риска (может достигать 200% от безрисковой нормы дисконта). Риск ненадежности участника проекта оценивается каждым участником проекта самостоятельно с учетом собственных обязательств и обязательств других участников проекта (может достигать 75% от безрисковой нормы дисконта).

Укрупненная оценка устойчивости проекта с точки зрения его участников осуществляется для базисного сценария на основе анализа динамики денежных потоков по всем видам деятельности участника, включая условия предоставления и погашения займов [32]. Если на том или ином шаге проекта возможна авария, то потери на возмещение ущерба (произведение потерь на вероятность аварии) включаются в состав ожидаемых затрат.

В [28] рекомендуется «оценить проект как устойчивый, если его параметры умеренно-пессимистические и включают необходимые резервы, а норма дисконта учитывает риск...».

При этом необходимо иметь в виду, что каждый участник проекта имеет разные точки зрения на риск и его последствия [1].

Расчет уровней безубыточности

Показатели безубыточности имеют ясный экономический смысл, вытекающий из фундаментального соотношения между прибылью (Π),

выручкой (B) и полными издержками (Z), которое задается простой формулой $\Pi=B-Z$. Если прибыль равна нулю, то $B-Z=0$ и отношение затрат к выручке $Z/B=1$. Очевидно, что для прибыльных проектов это отношение должно быть меньше единицы. Эти свойства отношения позволяют использовать его как индикатор динамики изменения денежных потоков. Уровнем безубыточности $УБ$ на каждом i -м расчетном шаге инвестиционного проекта в самом общем виде можно считать отношение:

$$УБ_i = \frac{Z_i}{B_i}. \quad (1.13)$$

В [1] принято разделение полных издержек на условно-постоянные ($Z^{пост.}_i$) и условно-переменные ($Z^{перем.}_i$). При отсутствии внереализационных доходов формула для уровня безубыточности имеет вид:

$$УБ_i = \frac{Z^{пост.}_i}{B_i - Z^{перем.}_i}, \quad (1.14)$$

где $Z^{пост.}_i$ - постоянная часть полных операционных издержек; $Z^{перем.}_i$ - переменная часть полных операционных издержек; B_i - выручка от реализации продукции.

В этих методиках для проектов, предусматривающих производство нескольких видов продукции, рекомендуется использовать общую формулу без разделения по видам продукции. В [1] предлагается проект считать устойчивым, если в целом по проекту уровень безубыточности после освоения проектных мощностей не превышает 0.6-0.7 (в [33] – 0.7-0.8). Близость значения $УБ_i$ к единице – свидетельство недостаточной устойчивости проекта.

Дополнительным показателем, определяющим динамику роста прибыли по сравнению с объемом продаж является *операционный рычаг* (OL – operation leverage), который при отсутствии внереализационных доходов рассчитывается по формуле:

$$OL_i = \frac{B_i - Z^{перем.}_i}{B_i - Z^{перем.}_i - Z^{пост.}_i} \quad (1.15)$$

Из формулы (1.15) следует, что если постоянные издержки равны нулю, то $OL=1$. Это означает, что при увеличении объема продаж на 1%, объем прибыли также увеличится на 1%. В общем случае числитель формулы (1.15) всегда больше знаменателя, т.е. значение OL всегда больше единицы, что означает более быстрый прирост прибыли, чем прирост объема продаж.

Кроме того, важными дополнительными (к уровням безубыточности) оценками устойчивости проекта являются т.н. предельные параметры проекта (IRR , срок окупаемости и др.).

Анализ чувствительности (метод вариации параметров)

Анализ чувствительности – это наиболее простой метод количественного анализа рисков и чаще всего применяемый на практике. Целью этого подхода является определение степени влияния каждого из варьируемых факторов на результат проекта. В качестве информационной основы здесь используются данные потока денежных средств инвестиционного проекта, а в качестве интегральных показателей, характеризующих результаты проекта, обычно рассматриваются показатели экономической эффективности, такие как NPV , IRR , срок окупаемости и ряд других (см. пункт 1.1). При классическом анализе чувствительности, применяемого к проекту, рассматривается влияние на конечный результат проекта (его эффективность) только одного варьируемого параметра (фактора переменной), проверяемого на риск, при сохранении неизменными всех остальных параметров.

В общем случае рекомендуется проверять реализуемость и эффективность проекта в зависимости от изменения следующих параметров:

- инвестиционных затрат (увеличение на 20% от проектного уровня);
- объема производства (снижение на 20% от проектного уровня);
- издержек производства (увеличение на 20-30% от проектного уровня);
- прогнозов индекса цен и инфляции;

- длительности строительства;
- других параметров, включая норму дисконта, проценты за кредит (увеличение на 40% в руб. на 20% в СКВ), задержку платежей (увеличение на 100%).

На основе полученных данных эксперт должен сделать заключение о чувствительности показателя к выбранному параметру и принять решение об экономической эффективности проекта в условиях неопределенности. Например, проект считается экономически эффективным [1] по отношению к возможным изменениям параметров, если при всех вариантах обеспечивается положительное значение NPV и обеспечивается необходимый резерв финансовой реализуемости проектов. В общем случае процедура принятия решения не формализована. Очевидно, что подход не позволяет получить информацию об изменении показателей при одновременном изменении нескольких параметров проекта.

При использовании метода вариации параметров является важным следующее утверждение:

Показатели эффективности проекта меняются линейно при не слишком больших изменениях параметров.

Как будет показано в 3-ей главе, это утверждение позволяет построить расчетные линейные модели вида $f(x)=a+b \cdot x$, связывающие показатель и изменяемый параметр проекта.

Сценарный анализ

Одним из методов, применяемых при количественной оценке риска, анализ сценариев (Scenario analysis, What-If analysis), – позволяет исправить основной недостаток анализа чувствительности, так как включает одновременное (параллельное) изменение нескольких факторов риска и, таким образом, представляет собой развитие методики анализа чувствительности.

В рамках этого метода под отдельным сценарием понимается [34] определенная фиксированная комбинация значения внутренних проектных параметров и параметров внешней экономической среды.

Предполагается, что число различных сценариев конечно и каждому из них экспертным путем приписывается определенная вероятность p_1, p_2, p_3 и т.д. Для каждого сценария с фиксированными параметрами внешней экономической среды рассчитывается интегральный показатель ожидаемой эффективности проекта $\mathcal{E}_{ож}$ по формуле:

$$\mathcal{E}_{ож} = \sum_i \mathcal{E}_i \cdot p_i . \quad (1.16)$$

Риск неэффективности проекта R_9 и средний ущерб V_9 от реализации неэффективных проектов рассчитываются по формулам:

$$R_9 = \sum_j p_j^- , \quad (1.17)$$

$$V_9 = \frac{\sum_i |\mathcal{E}_j| \cdot p_j^-}{R_9} , \quad (1.18)$$

где p_j^- в двух последних формулах означает вероятности для сценариев с отрицательными интегральными эффектами \mathcal{E}_j .

Главной проблемой практического использования сценарного подхода является необходимость построения модели инвестиционного проекта и выявление связи между переменными. Кроме того, недостатками сценарного подхода являются:

- необходимость значительного качественного исследования модели проекта, т.е. создания нескольких моделей, соответствующих каждому сценарию, включающих объемные подготовительные работы по отбору и аналитической переработке информации;
- достаточная неопределенность, «размытость» границ сценариев; правильность их построения зависит от качества построения модели и исходной информации, что значительно снижает их прогностическую ценность; при построении оценок значений переменных для каждого

сценария допускается некий волонтаризм;

- ограниченное число возможных комбинаций переменных, так как количество сценариев, подлежащих детальной проработке ограничено, так же как и число переменных, подлежащих варьированию, в противном случае возможно получение чрезмерно большого объема информации, прогностическая сила и практическая ценность которой сильно снижаются.

Отметим, что для получения общего распределения последствий проекта, необходимо использовать имитационное моделирование.

Сценарный метод анализа проектных рисков обладает следующими особенностями, которые можно рассматривать в качестве его преимуществ:

- учет взаимосвязи между переменными и влияния этой зависимости на значение интегрального показателя;
- построение различных вариантов осуществления проекта;
- содержательность процесса разработки сценариев и построения моделей, позволяющего проектному аналитику получить более четкое представление о проекте и возможностях его будущего осуществления, выявить как узкие места проекта, так и его позитивные стороны.

Однако метод сценариев наиболее эффективно применим в том случае, когда количество возможных значений показателей, например NPV , конечно. Вместе с тем, как правило, при проведении анализа рисков инвестиционного проекта эксперт сталкивается с неограниченным количеством различных вариантов развития событий. Ниже описано имитационное моделирование по методу Монте-Карло, помогающее разрешить отмеченную проблему. В этом методе, который является одним из наиболее сложных в количественном анализе проектных рисков, активно используется математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Метод Монте-Карло

Одним из методов, позволяющих учитывать влияние неопределенности на эффективность инвестиционного проекта, является имитационное моделирование по методу Монте-Карло.

Метод имитационного моделирования Монте-Карло [35] является развитием сценарного подхода к анализу рисков и одновременно может быть отнесен к группе теоретико-вероятностных методов анализа риска. На основе статистических данных и экспертных оценок аналитиками подбираются законы распределения некоторых из составляющих проекта, а на основании повторяющихся имитационных экспериментов с заданным уровнем точности можно подобрать закон распределения результирующего параметра и вычислить его основные характеристики: математическое ожидание, дисперсию, среднее квадратичное отклонение (СКО).

Имитационное моделирование состоит из трех этапов: построение математической модели, осуществление имитации, анализ результатов.

На этапе построения математической модели выбираются риск-переменные (случайные составляющие денежных потоков проекта) на основе рейтинга эластичностей и оценки прогнозируемости переменной, по имеющимся статистическим данным и экспертной информации для каждой риск-переменной подбирается закон распределения, учитываются условия вероятностной зависимости переменных.

Результирующая модель для выбранного показателя экономической эффективности Y имеет вид:

$$Y = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; a_1, \dots, a_j, \dots, a_m), \quad (1.19)$$

где x_i – риск-переменные (составляющие денежного потока, являющиеся случайными величинами); n – число риск-переменных; a_j – детерминированные параметры модели; m – количество параметров модели.

Вероятность реализации неэффективного проекта по показателю NPV вычисляется как отношение числа отрицательных значений NPV в полученной выборке к общему объему выборки.

Имитация осуществляется с использованием специально разработанных компьютерных программ, число проводимых имитационных экспериментов может быть выбрано с помощью методов математической статистики.

Комплексный подход к оценке риска, реализуемый при применении метода Монте-Карло, заключается в том, что аналитик получает различные показатели:

- a) распределение вероятностей результирующей проектной переменной;
- b) оценки среднего значения, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации результирующего показателя;
- c) любые другие специальным образом сконструированные измерители риска (коэффициент ожидаемых потерь, вероятность реализации неэффективного проекта).

Принятие инвестиционных решений может основываться на результатах визуального анализа, т.е. изучения профиля риска и кумулятивного профиля риска, полученных в результате имитационного моделирования.

Метод Монте-Карло преодолевает перечисленные выше недостатки анализа чувствительности и сценарного анализа, тем самым является более совершенным методом.

В качестве недостатков метода Монте-Карло можно выделить: сложность построения адекватных моделей риск-переменных и сложность трактовки полученных результатов.

1.3. Модели описания неопределенности

При решении практически любых задач исследователь имеет дело с неточными данными и/или с неопределенными величинами.

Хотя слово "неопределенность" широко употребляется как в обычной речи, так и в научной литературе, однозначного определения этого термина не существует, т.к. его расшифровка возможна лишь в контексте конкретной задачи.

В современном экономическом глоссарии приводятся следующие определения неопределенности при стратегическом планировании:

- все события, вероятность которых отлична от нуля и единицы;
- неполнота знаний о будущих событиях;
- возможность события, которое может повлиять на проект, как в лучшую, так и в худшую сторону;
- условие, событие или обстоятельства, для которых невозможно предсказать количественную оценку или последствия;
- источник риска, вытекающий из недостатка информации.

В зависимости от специфики и контекста задачи источниками неопределенности могут выступать самые различные факторы и их сочетания.

Вместе с тем, очевидно, что модель описания неопределенности должны определяться характером и спецификой источников неопределенности.

В табл. 3 приведены источники неточности и неопределенности данных в прикладных задачах и используемые модели их описания.

Таблица 3.

Источники неопределенности данных и используемые модели их описания

№	Тип данных	Источник неточности и неопределенности данных
1.	Измеряемые величины	Вариабельность, случайные и систематические ошибки измерения
2.	Прогнозные данные	Незнание, неопределенность
3.	Архивные данные	Неточность, ошибки округления и дискретизации
4.	Расчетные данные	Методические ошибки, ошибки округления
5.	Экспертные оценки	Незнание, неполнота информации

Для описания приведенных в табл. 3 источников неточности и неопределенности данных могут быть использованы четыре теоретически разработанных модели:

1. Интервальная модель
2. Статистическая модель
3. Математическая модель статистики интервальных данных
4. Вероятностная модель
5. Модель нечетких множеств

Для описания неточности измеряемых величин в рамках традиционного метода, закрепленного до недавнего времени в нормативных документах [4, 6, 34], используют интервальную и статистическую модель.

Интервальная модель. Неточность измерительного прибора задается в виде максимальной абсолютной погрешности Δ или класса точности прибора, связанного с величиной относительной погрешности $\delta(\%)$

При наличии единичного измерения x интервал возможных значений неизвестного истинного значения x_0 представляется в виде

$$x_0 = x \pm \Delta, \text{ или } x_0 = x \cdot (1 \pm 0.01 \cdot \delta). \quad (1.20)$$

Очевидно, что легко перейти от представления (1.20) интервальному представлению результата. В частности, при заданной абсолютной погрешности измерения интервал неопределенности истинного значения задается в виде

$$[x]: x - \Delta \leq x_0 \leq x + \Delta = x_{\min} \leq x_0 \leq x_{\max} \quad (1.21)$$

Границы интервала неопределенности определяются как $x_{\min} = x - \Delta$; $x_{\max} = x + \Delta$.

В случае заданной относительной погрешности имеем интервал для истинного значения в виде

$$[x]: x - \delta|x| \leq x_0 \leq x + \delta|x|. \quad (1.22)$$

Зарождение интервальной математики приходится на 70-80-е годы, когда появились многочисленных работ отечественные и зарубежные публикации по интервальной арифметике и интервальному анализу, которые вызвали большой интерес у специалистов в различных областях. Развитие методов "интервального исчисления" проходило по двум направлениям.

На Западе (прежде всего в Германии) интервальный анализ развивался как средство автоматического учета ошибок округления при проведении

численного решения задач на компьютерах. При этом результат выдается не в виде числа, а в виде интервала. Это направление на Западе получило название *интервальные вычисления* (reliable/validated/scientific computing) [36÷39]. В его рамках решались две основные задачи: проверка точности существующих алгоритмов, анализ их интервальной сходимости и устойчивости и разработка новых алгоритмов для решения типовых задач, обеспечивающих минимальную ошибку интервального результата. Теоретической базой интервальных вычислений является *интервальная арифметика*.

Ученые России развивали *интервальный анализ* или интервальную математику как теоретическую основу для решения практических задач с неопределенностью в исходных данных и параметрах моделей [40÷51]. При этом главная цель состояла не в автоматизации вычислений, а в нахождении области возможных значений результата с учетом структуры данных и функций, заданных в символьном виде. В этих условиях ограничения интервальной арифметики делали невозможным ее формальное использование. Направление интервального анализа активно развивалось (и развивается) в Сибирском отделении АН, в научных центрах и Вузах Москвы, Ленинграда и других городов. Были созданы научные школы, проводились семинары и конференции по данному направлению. В 1992 г. журнал Заводская Лаборатория инициировал дискуссию по применению интервального анализа данных, как альтернативу классическому регрессионному анализу при нарушении его исходных гипотез. Издательство Сибирского отделения АН СССР начало выпускать журнал Вычислительные технологии. В 1992 году в Москве прошла международная конференция ИНТЕРВАЛ-92 [52], на которой отечественные зарубежные ученые обсудили различные подходы к решению задач по интервальным данным.

Статистическая модель. При использовании этой модели в метрологии считается, что погрешности измерений обусловлены случайными вариациями посторонних переменных величин, искажающих истинное значение измеряемой величины. При наличии результатов повторных наблюдений [53÷55] находят оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения случайной величины и на их основе доверительный интервал для истинной величины x_0 . Недостатком статистического подхода является необходимость постулировать функцию плотности распределения случайной величины сложности учета систематических ошибок.

Современный подход к выражению неопределенности измерений отражен в «Руководстве по выражению неопределенности измерения», подготовленным рабочей группой экспертов Международного бюро мер и весов, Международной электротехнической комиссией, Международной организацией по стандартам и Международной организацией законодательной метрологии [56], где сделана попытка установить общие правила оценки и выражения неопределенности измерения, которые могли бы быть применены к широкому спектру измерений. Разработка *Руководства* связана с отсутствием международного единства по вопросу выражения неопределенности измерения. Одной из основных целей документа является предложение простой общепризнанной методики для характеристики качества результата измерения, т.е. для оценки и выражения его *неопределенности*. В отличие от традиционного подхода признается, что даже когда все известные или предполагаемые компоненты погрешности оценены и внесены соответствующие поправки, все еще остается неопределенность относительно истинности указанного результата, т.е. сомнение в том, насколько точно результат измерения представляет значение измеряемой величины. В документе отмечается, что идеальный метод для оценки и выражения неопределенности измерения должен предоставлять возможность указать интервал, в пределах которого, можно предполагать,

находится большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны величине, подлежащей измерению.

Модель статистики интервальных данных. Недостаток традиционной статистической модели при оценке погрешности измерений преодолевается в перспективной области статистических исследований - математической статистике интервальных данных, концепция и методы которой были разработаны А.И. Орловым [57÷59]. В этой модели статистические данные задаются не как числа, а как интервалы, в частности, порожденные наложением ошибок измерения на значения случайных величин [60, 61]. Применительно к задаче оценки погрешности измерений этот подход позволяет не только найти суммарную погрешность измерения, включающий случайные и систематические ошибки, но и на основе важного введенного понятия нотны определить рациональный объем выборки, увеличение сверх которого не увеличивает точность результатов.

Вероятностная модель. Основным объектом исследования является случайная величина x , которая описывается функцией плотности вероятности $f(x)$. Наиболее часто в прикладных задачах используется нормальное (гауссово) распределение случайной величины, имеющее вид колоколообразной кривой [62]. Нормальное распределение определяется двумя параметрами – математическим ожиданием m и дисперсией σ^2 . В ряде случаев используется равномерное распределение, имеющее вид прямоугольника и задаваемое верхней и нижней границами $x_{мин}$ и $x_{макс}$ случайной величины. Площадь под кривой плотности вероятности любой случайной величины равна единице.

При сравнении случайных величин в соответствии с теорией вероятностей и математической статистикой выделяют простые гипотезы, когда случайная величина сравнивается с заданной константой C , и сложные гипотезы, когда две случайные величины сравниваются между собой [63].

Вероятности того, что x больше или меньше заданной константы C , находятся по формулам:

$$P(x < C) = \int_{-\infty}^C f(x) \cdot dx, P(x > C) = \int_C^{\infty} f(x) \cdot dx, \quad (1.23)$$

где x – непрерывная случайная величина с известным распределением $f(x)$;
 C – заданная константа.

Учитывая условие нормировки, для плотности $f(x)$ справедливо выражение $P(x > C) = 1 - P(x < C)$.

В случае проверки сложных гипотез вида $x < y$, $x > y$ необходимо оперировать с двумерной плотностью распределения $f(x, y)$ и использовать двойные интегралы. При этом следует помнить, что сложные гипотезы не сводятся к простым гипотезам вида: $x - y < 0$, $x - y > 0$ с константой $C = 0$.

Необходимо подчеркнуть, что результат сравнения двух случайных величин зависит от того, являются ли случайные величины x и y зависимыми или нет. Однако установление этого факта по экспериментальным данным является нетривиальной задачей, т.к. отсутствие корреляции между переменными еще не означает отсутствия независимости.

Вероятностная модель с самых ранних этапов появления прикладных задач и до последнего времени является доминирующей при решении задач численной оценки технических и экономических рисков. В [64] приводится следующая цитата из манускрипта под названием «Логика или Искусства Размышления», опубликованного в 1662 году в монастыре Порт Ройял «Опасность ущерба должна быть пропорциональна не только силе ущерба, но также вероятности события».

Эту цитату можно считать самой ранней ссылкой на определение риска в терминах вероятности неблагоприятного события и возможного ущерба.

Вероятностный подход применительно к технологическим рискам закреплен в ГОСТ 26392-84, где ядерная безопасность определяется как «свойство ядерного объекта, обуславливающее с определенной вероятностью невозможность ядерной аварии». Стандартным инструментом при расчетах оценок ядерной и радиационной безопасности является вероятностный

анализ безопасности (ВАБ), который базируется на анализе деревьев событий и отказов и статистических методах моделирования.

Учитывая, что случайность является только одним и не всегда главным источником неопределенности в задачах оценки рисков, в последнее десятилетие в зарубежной литературе предложен определять риск не как вероятности, а как возможность неблагоприятного события.

В частности, МАГАТЭ рекомендует определять безопасность как «условия и возможности ядерной установки и обслуживающего персонала предотвратить неконтролируемое развитие ядерной реакции или утечку радиоактивных веществ в окружающую среду и снизить последствия аварий и происшествий», т.е. термин вероятность не употребляется. В контексте описания неопределенности и оценки риска переход от вероятности к возможности является не просто сменой терминов, а сменой общей парадигмы и модели описания неопределенности.

В рамках изменившейся парадигмы под риском инвестиционного проекта понимается возможность возникновения таких условий, которые приведут к негативным последствиям для всех или отдельных участников проекта, включая невыполнение предусмотренных проектом действий, увеличение сроков строительства и отклонение от прогнозируемых проектных результатов и т.п. В [9] рискованность инвестиционного проекта определяется как «отклонение потоков денежных средств для данного проекта от ожидаемого. Чем больше отклонение, тем проект считается более рискованным». Предполагается, что ожидаемые показатели экономической эффективности проекта вычисляются с учетом факторов риска и неопределенности.

Нечеткая модель. Теория нечетких множеств (*Fuzzy Sets*), опубликованная в 70-х годах Л. Заде, Р. Беллманом и Х. Циммерманом [65÷67], основана на понятии нечеткого (размытого) множества S , которое характеризуется функцией принадлежности $\mu_S(x)$, изменяющейся в интервале

[0, 1]. Число $\mu_S(x)$ задает степень принадлежности параметра x нечеткому множеству S .

Подход изначально развивался с целью формализации действий оператора, управляющего объектом в условиях неопределенности с использованием нечетких инструкций [68]. Для этого было введено понятие нечеткой лингвистической переменной, значения которой могут быть выражены в терминах типа: 'низкая', 'умеренная', 'большая', 'очень высокая' и т.п. Для анализа нечетких высказываний разработана нечеткая (размытая) логика [69]. Введено понятие нечеткой функции и разработана концепция построения нечетких регрессионных моделей. Многочисленные приложения метода показали его эффективность при построении автоматических и автоматизированных систем управления объектами в условиях неопределенности (метро в Токио управляется автоматизированной системой, основанной на теории нечетких множеств). Вместе с тем специфическая форма описания неопределенности и субъективный характер вводимой функции принадлежности $\mu_S(x)$ затрудняет его применение в системах принятия решений

1.4. Операции с неопределенными числами при оценке рисков

В связи с новой парадигмой оценки рисков в научный обиход был введен новый термин – «неопределенные числа» (uncertain numbers) [70], которые могут быть описаны вероятностными, интервальными или нечеткими моделями. Предполагается, что при использовании любой модели неопределенные числа имеют ограниченный диапазон.

Для нахождения численной оценки риска с неопределенными числами необходимо производить арифметические и алгебраические операции. Каждая из моделей порождает свою арифметику (правила сложения, вычитания, умножения и деления), а также специфические правила сравнения неопределенных чисел (проверку условий «больше», «меньше»).

Несмотря на это неопределенные числа имеют ряд общих свойств.

1.4.1. Общие свойства неопределенных чисел

Для выделения общих свойств обозначим неопределенное число любого типа, как \underline{a} , \underline{b} , \underline{c} ... \underline{x} и т.п. с чертой снизу. Любое неопределенное число \underline{a} , в отличие от обычного, задает не единственное значение, а множество возможных значений внутри заданного ограниченного интервала $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$. Например, запись $\underline{a} = [1; 3]$ означает, что возможны любые значения неопределенного числа от единицы до трех. В зависимости от принятой модели значениям внутри интервала $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$ могут приписываться разные уровни «возможности» или «достоверности».

Сравнение неопределенного числа \underline{a} с заданной константой C необходимо, например, при сравнении экономического показателя эффективности, заданного в форме неопределенного числа, с его пороговым значением C . При этом под риском понимается ситуация, когда максимизируемый показатель принимает значение меньше заданного порога C . Очевидно, что если показатель найден в виде неопределенного числа \underline{a} , то отношения $\underline{a} < C$ и $\underline{a} > C$ будут выполняться лишь с определенным уровнем достоверности. При этом термин «достоверность» зависит от принятой модели. Для случайного числа под «достоверностью» понимается вероятность события, для нечеткого числа – степень принадлежности числа нечеткому множеству, для интервального числа – «возможность» события. Для любой модели «достоверность» события может принимать значения от 0 до 1.

Проведенный анализ показывает, что можно выделить несколько общих свойств неопределенных чисел, которые не зависят от принятой модели неопределенности.

1. Если дана константа C и интервал $[a_{\min}; a_{\max}]$ неопределенного числа \underline{a} , то при любой модели описания неопределенности с достоверностью единица выполняются соотношения:

$$\underline{a} < C, \text{ если } a_{\max} < C; \underline{a} > C, \text{ если } a_{\min} > C \quad (1.24)$$

Пример. Неопределенное число $\underline{a}=[0.5; 0.6]$ с достоверностью единица меньше константы $C=0.75$ при любой модели неопределенности.

2. При сравнении двух неопределенных чисел \underline{a} и \underline{b} с ограниченными диапазонами $[a_{\min}; a_{\max}]$ и $[b_{\min}; b_{\max}]$ при любой модели описания неопределенности с достоверностью единица выполняются соотношения: $\underline{a} < \underline{b}$, если $a_{\max} < b_{\min}$ и $\underline{a} > \underline{b}$, если $a_{\min} > b_{\max}$. (1.25)

Следует отметить, что свойство 1 соответствует случаю, когда константа C лежит вне интервала \underline{a} , а свойство 2 - случаю, когда интервалы неопределенных чисел \underline{a} и \underline{b} не пересекаются. В остальных случаях отношения «больше» и «меньше» выполняются с уровнем достоверности меньшем единицы.

3. Любое неопределенное число равно только самому себе и по этой причине должно сопровождаться уникальным именем (символом). Если \underline{a} и \underline{b} два неопределенных числа с одинаковой моделью описания и совпадающими диапазонами, то $\underline{a}-\underline{a}=0$, $\underline{a}/\underline{a}=1$, но $\underline{a}-\underline{b}\neq 0$, $\underline{a}/\underline{b}\neq 1$.

Приведенные универсальные правила «накрывают» сравнительно небольшую область. В общем случае каждая из моделей неопределенных чисел порождает свою арифметику и специфические правила сравнения.

1.4.2. Операции со случайными числами

В рамках теории вероятности справедливо утверждение о том, что результат любой арифметической операции со случайными величинами есть также случайная величина, но в общем случае с другим распределением. Если имеются две случайные независимые величины x и y , то для нахождения результата арифметических действий $x+y$, $x-y$, $x \times y$, $x:y$ для каждой из этих операций необходимо найти композицию их функций распределения. В общем случае нахождение плотности вероятности результата, особенно при умножении и делении случайных величин является трудоемкой задачей.

Для операций сложения и вычитания двух независимых нормально распределенных величин $x=N(m_1, \sigma_1^2)$ и $y=N(m_2, \sigma_2^2)$ справедливы следующие формулы:

$$\begin{aligned} x+y &= N(m_1+m_2; \sigma_1^2+\sigma_2^2); \\ x-y &= N(m_1-m_2; \sigma_1^2+\sigma_2^2); \\ Cx &= N(C \cdot m_1; C^2 \cdot \sigma_1^2). \end{aligned} \tag{1.26}$$

Следовательно, результат сложения и вычитания нормально распределенных величин есть также нормально распределенная величина, но с другим математическим ожиданием и дисперсией.

Известно, что при сложении и вычитании двух равномерно распределенных чисел результатом является случайная величина с трапециевидальным распределением. Известно также, что распределение суммы n равномерно распределенных чисел по теореме Ляпунова стремится к нормальному распределению.

На рис. 1.3 приведены результаты арифметических операций над двумя независимыми, равномерно распределенными случайными переменными $x=R(1; 3)$, $y=R(4; 8)$, найденные по правилам нахождения композиции распределений в соответствии с исследуемой арифметической операцией.

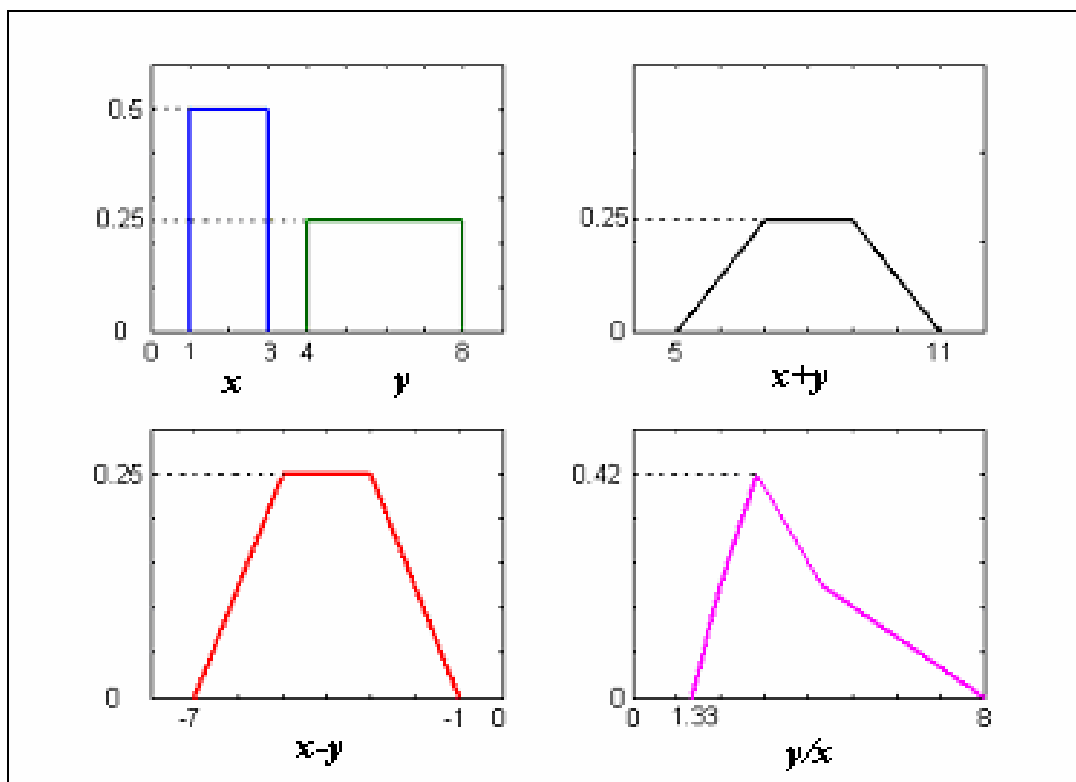


Рис. 1.3. Результаты арифметических действий с равномерно распределенными случайными величинами

В верхнем левом окне рисунка приведены функции распределения двух случайных чисел x и y . В остальных окнах приведены функции распределения результатов, включая сложение, вычитание и деление.

При рассмотрении случайных величин с совпадающими функциями распределения $x=N(m, \sigma^2)$ и $y=N(m, \sigma^2)$ их сумма и разность находятся по формуле (1.26), однако $(x-x)=0$ и $(x/x)=1$.

Сравнение случайных чисел с константой проводится по формуле (1.23).

1.4.3. Операции с интервальными числами

В рамках интервальной модели неточность и/или неопределенность переменной x описывается в виде интервала $[x]=[x_{мин}; x_{макс}]$, задаваемого своими границами $x_{мин}$; $x_{макс}$. Интервал $[x]$ определяет множество возможных значений неизвестного истинного параметра x . В рамках интервального подхода не задается никакой вероятностной или размытой меры на интервале $[x]$, т.е. все значения внутри интервала предполагаются равновозможными.

Как было отмечено выше, в интервальном анализе существует направление «достоверных вычислений» (reliable computation), в рамках которого разработана компьютерная интервальная арифметика, встроенная в интервальные процессоры. При этом предполагается, что вариация данных относительно их среднего значения не превосходит долей процента. Теоретической основой является «интервальная арифметика» Мура-Алефельда» [37], в которой арифметические операции с интервальными числами определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 1) [a]+[b] &= [a_{\min} + b_{\min}; a_{\max} + b_{\max}]; \\
 2) [a]-[b] &= [a_{\min} - b_{\max}; a_{\max} - b_{\min}]; \\
 3) [a]\cdot[b] &= [a_{\min} \cdot b_{\min}; a_{\max} \cdot b_{\max}]; \\
 4) [a]/[b] &= [a_{\min}/b_{\max}; a_{\max}/b_{\min}].
 \end{aligned}
 \tag{1.27}$$

Формулы (1.27) приведены в предположении положительности интервальных чисел, хотя интервальная арифметика разработана как для положительных, так и отрицательных интервальных чисел. В формальной арифметике вычитание не обратное сложению, а умножение не обратное делению, т.е. $[a]-[a] \neq 0$, $[a]/[a] \neq 1$, и в общем случае не выполняется дистрибутивный закон, т.е. $[a]([b]+[c]) \neq [a][b]+[a][c]$.

Другое направление интервального анализа разработано для анализа реальных эмпирических данных, диапазон неопределенности которых может колебаться в широких пределах (от 1 % до 90 %). При вычислении интервальных функций диапазон неопределенности результата не зависит от применяемых алгоритмов расчета и порядка арифметических действий. При этом арифметические операции осуществляются с помощью символической математики. В рамках этого подхода решен многочисленный класс задач анализа данных и оптимизации в условиях неопределенности.

Интервальная арифметика. Для нахождения результата любой арифметической операции с интервалами используется процедура нахождения минимума и максимума функции двух переменных. Обозначим как $[z]=[a]\#[b]$ результат обобщенной арифметической операции, т.е. знак # может обозначать любую арифметическую операцию +; −, ×; : между

интервальными числами $[a]$ и $[b]$. Тогда результат обобщенной арифметической операции определяется по формуле

$$[z]=[a]\#[b]=[z_{\min}=\underset{a\in[a], b\in[b]}{\text{минимум}}(a\#b); z_{\max}=\underset{a\in[a], b\in[b]}{\text{максимум}}(a\#b)] \quad (1.28)$$

В табл. 4 приведены примеры арифметических операций с интервальными числами, результаты которых найдены по формуле (1.28)

Таблица 4.

Результаты интервальных операций

$[a]$	$[b]$	$[a]+[b]$	$[a]-[b]$	$[a]\cdot[b]$	$[b]/[a]$
$[1; 3]$	$[4; 8]$	$[5; 11]$	$[-7; -1]$	$[4; 24]$	$[4/3; 8]$

Полезно рассмотреть также «экзотический» случай» арифметических операций с интервалами, которые имеют одинаковые границы, например $[a]=[1; 3]$ и $[b]=[1; 3]$. По формуле (1.28) для этого случая легко получить результаты, представленные в табл. 5.

Таблица 5.

Результаты интервальных арифметических операций (экзотический случай)

$[a]$	$[b]$	$[a]+[b]$	$[a]-[b]$	$[a]\cdot[b]$	$[b]/[a]$
$[1; 3]$	$[1; 3]$	$[2; 6]$	$[-2; 2]$	$[1; 9]$	$[1/3; 3]$

Рассмотрим также ситуацию, когда необходимо найти разность и частное от деления одинаковых интервальных чисел, т.е. найти $[z]=[a]-[a]$ и $[a]/[a]$.

В этом случае формула (1.28) должна быть записана в виде

$$[z]=[a]\#[b]=[z_{\min}=\underset{a\in[a]}{\text{минимум}}(a\#b); z_{\max}=\underset{a\in[a]}{\text{максимум}}(a\#b)], \quad (1.29)$$

в которой имеется только одна изменяемая переменная. Очевидно, что в соответствии с формулой (1.29) легко получить:

$$[a]-[a]=0, [a]/[a]=1.$$

В этом проявляется принципиальная разница между символьной арифметикой (формулы (1.28) и (1.29) и интервальной арифметикой Мура-Алефельда [37].

Необходимо подчеркнуть, что интервальный процессор не «различает» имен переменных, а оперирует только с граничными значениями двух

интервальных чисел, всегда, воспринимаемых как разные объекты. При этих условиях формальное применение правил (1.29) к операциям вычитания и деления двух интервалов, например, $[1; 3]$ и $[1; 3]$ всегда приводит к следующему результату:

$$[1; 3] - [1; 3] = [-2; 2]; [1; 3] / [1; 3] = [1/3; 3].$$

Очевидно, что эти границы будут получены как в случае операций с одним интервалом, так и при операциях над двумя интервалами с одинаковыми границами. Следовательно, в интервальной арифметике (1.27) Мура-Алефельда

$$[a] - [a] = [a_{\min} - a_{\max}; a_{\max} - a_{\min}] \neq 0, [a] / [a] = [a_{\min} / a_{\max}; a_{\max} / a_{\min}] \neq 1. \quad (1.30)$$

Очевидно, что применение формулы (1.29) приводит к завышенной оценке результирующего интервала неопределенности. Кроме того, по этой причине в общем случае не выполняется дистрибутивный закон, т.е. $[a] \cdot ([b] + [c]) \neq [a] \cdot [b] + [a] \cdot [c]$.

Сравнение интервальных чисел. Для интервальных чисел в полной мере выполняются свойства, приведенные выше в формулах (1.24) и (1.25).

Формулы для сравнения интервальных чисел с константой и между собой предложены в [71].

При сравнении интервала $[a]$ с константой C уровень β достоверности отношений «меньше» и «больше» определяется по следующим формулам:

$$\beta_{a < C} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{C - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}; \beta_{a > C} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} = \frac{a_{\max} - C}{a_{\max} - a_{\min}}; \beta_{a < C} + \beta_{a > C} = 1. \quad (1.31)$$

В формуле (1.31) предполагается, что константа C лежит внутри интервала $[a]$. Геометрическая интерпретация переменных L_1 и L_2 приведена на рис. 1.4.

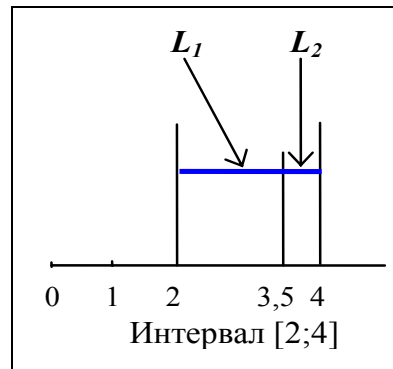


Рис. 1.4. Сравнение интервала с константой

При наличии двух интервальных чисел $[a]$ и $[b]$, пересечение которых не пусто, уровень достоверности отношения $b > a$ определяется по формуле

$$\beta_{b>a} = \frac{S_1}{S_1 + S_2} = \frac{(b_{\text{макс}} - a_{\text{мин}})^2}{2 \cdot (a_{\text{макс}} - a_{\text{мин}}) \cdot (b_{\text{макс}} - b_{\text{мин}})}; \beta_{b<a} + \beta_{b>a} = 1; \beta_{b<a} = 1 - \beta_{b>a} \quad (1.32)$$

Геометрическая интерпретация переменных S_1 и S_2 приведена на рис. 1.5.

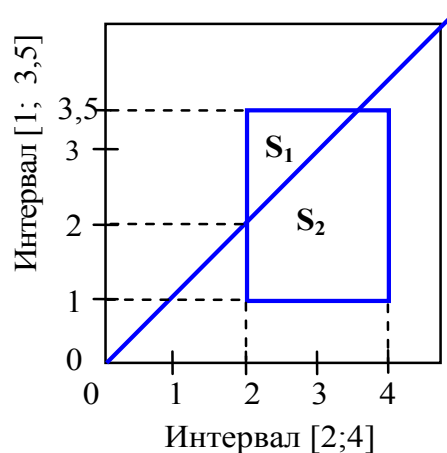


Рис. 1.5. Сравнение интервалов между собой

На рис. 1.4 изображен интервал $[a]=[2; 4]$, который необходимо сравнить с константой $C=3,5$. Через L_1 обозначена длина участка от левой границы интервала до константы $C=3,5$, а через L_2 - длина участка от константы $C=3,5$ до правой границы. Очевидно, что на левом участке интервала L_1 все значения неопределенного числа меньше константы, а на участке L_2 –наоборот. Геометрически уровень достоверности отношения $\beta_{a<c}$ есть отношение интервала L_1 к длине отрезка L_1+L_2 . используя формулу (1.31), легко получить, что:

$[a]=[2; 4]<3,5$ с достоверностью $\beta_{a<c}=(3,5-2)/(4-2)=0,75$;

$[a]=[2; 4]>3,5$ с достоверностью $\beta_{a>c}=1-\beta_{a<c}=0,25$.

На рис. 1.5. рассмотрен случай сравнения интервальных чисел $[a]=[2; 4]$ и $[b]=[1; 3,5]$ между собой. По горизонтальной оси отложен интервал $[a]$, по вертикальной оси - интервал $[b]$. Все возможные пары (a, b) внутри интервалов образуют множество в виде прямоугольника. Наклонная линия, проведенная под 45 градусов, задает множество точек, где выполняется отношение $a=b$. Для всех точек слева от линии (область S_1) выполняется отношение $b>a$, для точек справа от линии (область S_2) справедливо $b<a$. Уровень достоверности отношения $b>a$ определяется как отношение площади S_1 к площади всего прямоугольника (S_1+S_2) , а для отношения $b<a$ как отношение площади S_2 к общей площади [72].

По формуле (1.32) легко найти искомое значение уровня достоверности отношения $b>a$, которое составляет:

$$\beta_{b>a}=(3,5-2)^2 / 2 \cdot (4-2) \cdot (3,5-1)=0,225; \beta_{b<a}=1-\beta_{b>a}=0,775.$$

Следует заметить, что для двух неопределенных чисел, в том числе интервальных, вычисление достоверности отношения « x больше (меньше) y » нельзя свести к более простому случаю « $(x-y)$ больше (меньше) нуля».

Несомненным достоинством изложенной выше интервальной модели является универсальная концепция неопределенности, которая включает не только случайность, но также незнание, неточность и вариабельность переменных.

1.4.4. Операции с нечеткими числами

На рис. 1.6 показаны два нечетких множества с треугольной и равномерной функциями принадлежности.

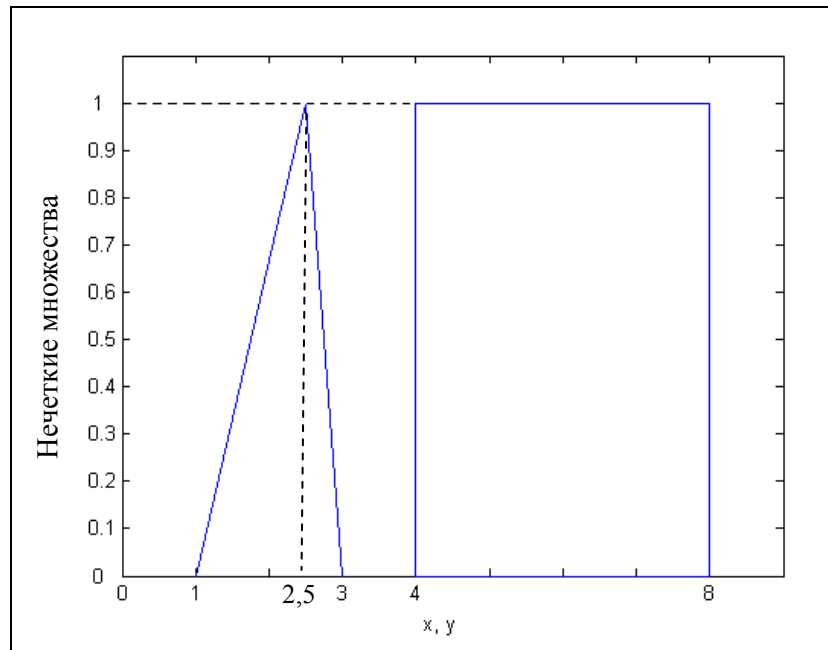


Рис. 1.6. Нечеткие множества с треугольной и равномерной функциями принадлежности

В левой части рисунка показана треугольная функция принадлежности нечеткого числа x , диапазон возможных значений которого составляет $1 \leq x \leq 3$. Функция принадлежности $\mu(x)$ нечеткого треугольного числа равна 1 в точке 2.5 и описывается уравнением:

$$\mu(x) = \begin{cases} 2/3 \cdot (x-1) & \text{при } 1 \leq x \leq 2,5 \\ -2x+6 & \text{при } 2,5 \leq x \leq 3 \end{cases} \quad (1.33)$$

Функция принадлежности нечеткого числа в правой части рис. 1.6 равна единице во всем диапазоне изменения переменной от 4 до 8.

Сравним случайную величину с равномерным распределением и нечеткое множество с равномерным распределением на рис. 1.6. Можно видеть, что обе модели описывают неопределенную переменную, диапазон возможных значений которой составляет $4 \leq x \leq 8$. В обеих моделях на интервале неопределенности переменной задана мера, которая задает равновероятные (для вероятностной модели) и «равновозможные» (для нечеткой модели) значения переменной x внутри диапазона неопределенности. Однако, в отличие от вероятностной модели, функция

принадлежности переменной x нечеткому множеству не удовлетворяет условию нормировки, т.е. площадь под функцией принадлежности не равна 1.

Теория нечетких множеств изначально развивалась для формализации действий оператора, управляющего объектом на основе слабо формализованных инструкций. Базовым понятием теории нечетких нечеткой является «лингвистическая переменная», значения которой могут быть выражены в терминах типа: ‘низкая’, ‘умеренная’, ‘большая’, ‘очень высокая’ и т.п. Для анализа нечетких высказываний разработана нечеткая (размытая) логика. Введено понятие нечеткой функции и разработана концепция построения нечетких регрессионных моделей. Многочисленные приложения метода показали его эффективность при построении автоматических и автоматизированных систем управления объектами в условиях неопределенности (метро в Токио управляется автоматизированной системой, основанной на теории нечетких множеств). Вместе с тем специфическая форма описания неопределенности и субъективный характер вводимой функции принадлежности $\mu_S(x)$ затрудняет его применение в системах принятия решений. Наиболее часто модель используется при описании экспертных данных.

Арифметика нечетких чисел. Наиболее часто для описания нечетких чисел используется треугольная функция принадлежности, имеющая ограниченный диапазон изменения и вершину - в наиболее достоверном значении. Такие треугольные числа записываются в виде тройки, например, $A=[2; 3.5; 4]$, $B=[5; 8; 9]$. Их функции принадлежности показаны на рис. 1.7.

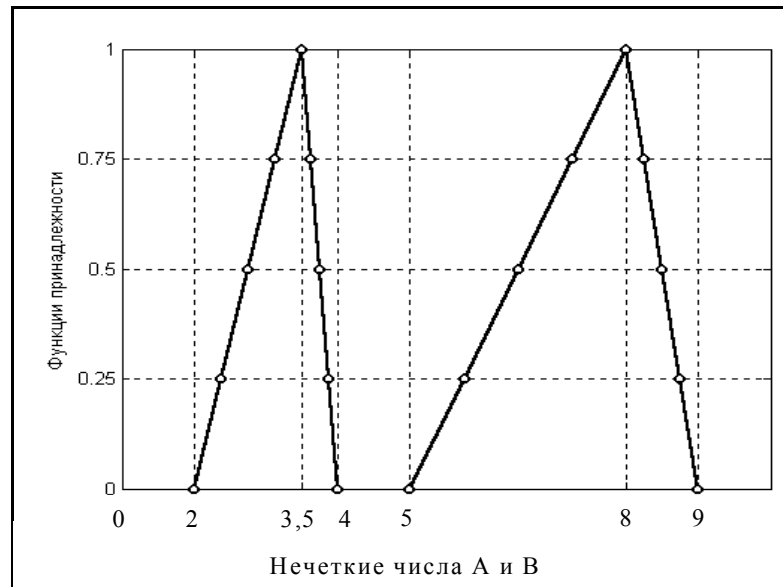


Рис. 1.7. Треугольные нечеткие числа с вершиной в наиболее достоверной точке

Согласно [65, 66] арифметические операции над нечеткими числами осуществляется путем операции «дефаззификации» нечеткого множества, т.е. дискретизации нечеткого числа при помощи выделения конечного числа дискретных уровней функции принадлежности $\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n$, каждый из которых порождает обычный интервал, т.е. $\mu_i \rightarrow [a_{i \text{ мин}}; a_{i \text{ макс}}]$.

На рис. 1.6 дискретизация нечетких чисел A и B произведена на пять уровней, показанных на графиках горизонтальными пунктирными линиями. Значения уровней и соответствующие им интервалы представлены в табл. 6:

Таблица 6.

Результаты арифметических операций с дискретными нечеткими числами A и B

	Дискретные уровни μ_i				
	0	0.25	0.5	0.75	1
A	[2; 4]	[2.37; 3.87]	[2.75; 3.75]	[3.12; 3.62]	3.5
B	[5; 9]	[5.75; 8.75]	[6.5; 8.5]	[7.25; 8.25]	8
A+B	[7; 13]	[8.12; 12.62]	[9.25; 12.25]	[10.37; 11.87]	11.5
A-B	[-7; -1]	[-6.37; -1.87]	[-5.75; -2.75]	[-5.12; -3.62]	-4.5
B/A	[5/4; 9/2]	[1.48; 3.68]	[1.73; 3.09]	[2; 2.64]	2.28
A·B	[10; 36]	[13.65; 33.90]	[17.87; 31.87]	[22.65; 29.90]	28

Результаты арифметических операций для каждого уровня принадлежности μ_i рассчитываются с использованием интервальной арифметики по формулам (1.31).

Тесная связь между интервальными и нечеткими числами особенно наглядно проявляется при анализе арифметических операций над нечеткими числами с равномерной функцией принадлежности.

Рассмотрим два нечетких числа $A=[1; 3]$, $B=[4; 8]$ с равномерной функцией принадлежности $\mu(x)$. Их диапазоны совпадают с диапазонами интервальных чисел, заданных в табл. 3. Учитывая, что функция принадлежности $\mu(x)$ для нечетких чисел равна единице на всем диапазоне, применение операции дискретизации этих нечетких чисел в данном примере излишне, т.к. результат легко получить в результате одношаговой процедуры. При этом результаты любой арифметической операции также будут нечеткими числами с равномерной функцией, равной 1 на всем диапазоне изменения результата (см. рис. 1.8)).

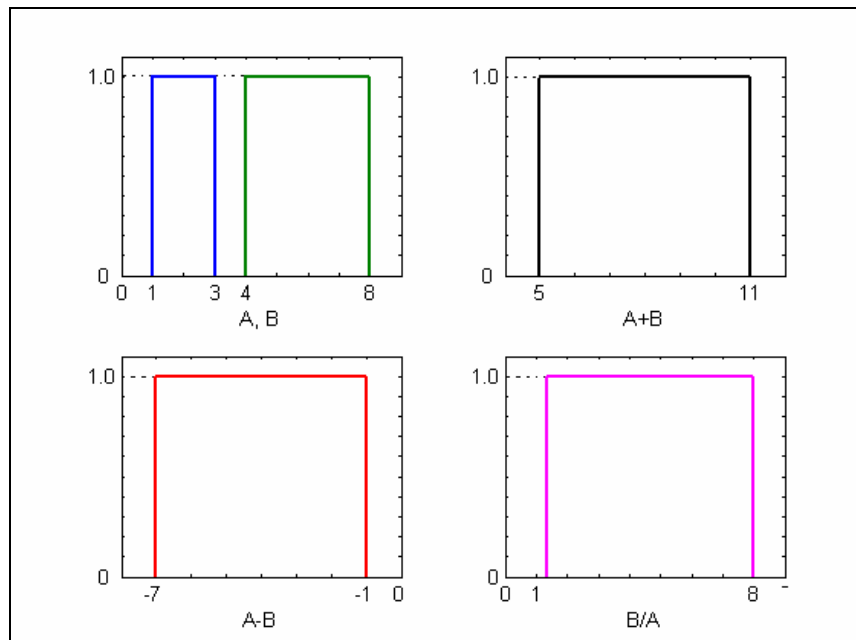


Рис. 1.8. Нечеткие числа с равномерной функцией принадлежности

Проведенное сравнение позволяет выразить общность интервальных чисел и нечетких чисел с равномерной функцией принадлежности в следующем виде:

Если два интервальных числа имеют одинаковые границы неопределенности с двумя нечеткими числами с равномерной функцией принадлежности, равной 1, то результаты арифметических действий над этими числами совпадают.

Приведенное утверждение в контексте проведения арифметических действий можно трактовать тождественность двух моделей неопределенных чисел интервальной и нечеткой с равномерной функцией, т.е.

$$[a]=[a_{\min}; a_{\max}] \Leftrightarrow S = \{a_{\min} \leq x \leq a_{\max}, \mu(x) \equiv 1\} \quad (1.34)$$

Сравнение нечетких чисел. Используя приведенную методологию дискретизации и проводя на каждом уровне принадлежности вычисление достоверности отношения по формулам (1.28) и (1.29), можно сравнить нечеткое число с константой C и два нечетких числа между собой. В результате чего будет построено нечеткое множество [67], в котором каждому значению x соответствует не только определенное значение уровня принадлежности $\mu(x)$, но и определенный уровень достоверности β , рассчитанный по формулам (1.28) или (1.29). Однако, содержательная трактовка «тройки» $\{X_a > X_b, \mu, \beta_{b>a}\}$ вызывает трудности даже для квалифицированных экспертов.

Недостатком нечеткой модели является субъективный характер функции принадлежности, задаваемой экспертом.

Таким образом, операции с нечеткими числами сводятся к конечному числу операций с интервалами, которые образуются при выделении фиксированных уровней функций принадлежности. При увеличении числа уровней разбиения трудоемкость численных операций существенно возрастает. Кроме того, для отображения функции принадлежности результата в аналитическом виде необходимо применение численных методов аппроксимации.

Учитывая этот факт, а также широко применяемую в прикладных задачах практику задания неточных данных в виде интервалов в работе основной внимание уделяется интервальным моделям. Кроме того, в силу

своей универсальности и простоты интервальная модель находит все более широкое применение, как в технике, так и в экономике.

Анализируя приведенные выше модели описания, можно отметить, что вероятностная (статистическая) модель является наиболее употребительной, если источником неопределенности являются погрешности измерения, округления и дискретизации. В тех случаях, когда источником неопределенности являются неполнота и незнание более подходящей является интервальная модель.

Выводы к главе 1

На основе проведенного обзора и анализа литературы по оценке экономической эффективности и рисков инвестиционных проектов в условиях неопределенности были сделаны следующие выводы.

В существующих Методических рекомендациях оценки инвестиционных проектов общего плана, основанных на методике UNIDO, детально описаны показатели экономической эффективности инвестиционных проектов и процедуры их расчета. Однако они не учитывают особенности проектов в энергетике, вытекающие из специфики электроэнергии как рыночного товара.

Для оценки инвестиционных проектов электростанций используются методические рекомендации МАГАТЭ и проектных институтов Росатома. Оба подхода в качестве главного показателя социально-экономической эффективности рекомендуют критерий, связанный с удельными затратами на производство электроэнергии. В предположении постоянства ежегодных затрат и нулевой норме дисконта значений оба подхода приводят к одинаковым результатам.

Во всех рассмотренных методиках используется только одна из возможных моделей неопределенности, а именно, – вероятностная модель. При этом, как правило, игнорируется новая парадигма оценки экономических рисков, основанная на использовании различных моделей описания

неточных и неопределенных данных, включая интервальную и нечеткие модели.

Проведено сравнение интервальной и нечеткой моделей в контексте проведения арифметических операций с нечеткими и интервальными числами. Показано, что операции над нечеткими числами основаны на их дефаззификации и сводятся к последовательности операций над интервальными числами, которые реализуются по простым правилам.

В контексте проведения арифметических действий показана тождественность двух моделей неопределенных чисел - интервальной и нечеткой с равномерной функцией принадлежности.

На основе проведенного анализа в работе была выбрана интервальная модель описания неточных и неопределенных данных.

Глава 2. Разработка метода оценки эффективности инвестиционных проектов электростанций по интервальному данным

В главе приведено описание предлагаемого метода оценки эффективности инвестиционных проектов энергоблоков и электростанций на основе технико-экономических параметров, заданных в интервальной форме.

2.1. Гипотезы сопоставимости инвестиционных проектов электростанций по укрупненным данным

Для обеспечения сопоставимости результатов оценки инвестиционных проектов электростанций с учетом рекомендаций МАГАТЭ, проектных организаций отрасли и международного подхода к оценке сравнительной конкурентоспособности электростанций на разном топливе при разработке метода были сформированы следующие гипотезы и предположения.

1. Оценка инвестиционных проектов энергоблоков или электростанций проводится при расчетном шаге равном одному году на основе укрупненного перечня их технико-экономических параметров (ТЭП), среди которых:

- установленная мощность энергоблока;
- КИУМ энергоблока;
- срок службы энергоблока;
- ставка налога с прибыли;
- тариф на электроэнергию;
- норма дисконта;
- затраты на эксплуатацию энергоблока;
- затраты на топливо;
- капитальные вложения в строительство;
- срок строительства энергоблока;
- длительность жизненного цикла энергоблока.

На расчетном горизонте предполагаются постоянными интенсивности финансовых потоков $\phi(t)$, что означает одинаковые по годам строительства объемы капиталовложений, а также одинаковые ежегодные затраты на топливо и эксплуатацию энергоблока.

2. ТЭП исследуемых инвестиционных проектов разбиваются на две группы:

- Фиксированные параметры, которые определяются достаточно точно по паспортным данным. К ним относятся установленная электрическая мощность энергоблока; длительность жизненного цикла энергоблока; КИУМ; ставка налога с прибыли.
- Неточные или неопределенные параметры, среди которых: тариф на электроэнергию; норма дисконта; срок строительства объекта; затраты на строительство объекта; затраты на эксплуатацию объекта; затраты на топливо, срок строительства.

3. Для обеспечения сопоставимости проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе при их сравнении предполагаются одинаковыми установленная мощность энергоблока, КИУМ, тариф на электроэнергию и норма дисконта.

Неточные или неопределенные ТЭП задаются в интервальной форме $[x]=\{x_{min} \leq x \leq x_{max}\}$.

Границы интервальных значений чаще всего определяются экспертом.

4. Расчет денежных потоков проводится в долларах. Такой подход, общепринятый в международной практике, рекомендован МАГАТЭ и использован в опубликованной «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI века» [73], в ходе реализации которой не исключается возможность закупки зарубежных проектов АЭС. Расчет в единой денежной единице позволяет не только сопоставить инвестиционные проекты электростанций, предлагаемых разными международными корпорациями по их составляющим затрат, включая стоимость строительства электростанций, затраты на топливо и эксплуатацию на проект, но и оценить

себестоимость производства электроэнергии в разных странах. В упомянутой Стратегии стоимость добычи 1 кг урана в существующих месторождениях урановых ресурсов России также приводится в долларах.

Формат укрупненных исходных данных для оценки эффективности инвестиционных проектов электростанций, удовлетворяющий приведенным выше гипотезам предлагаемых фирмами разных стран, приведен в табл. 7.

Таблица 7.

Формат укрупненных данных для оценки эффективности ИП
электростанции

ТЭП инвестиционного проекта энергоблока	Мин	Макс
<i>Фиксированные параметры</i>		
Установленная мощность энергоблока, МВт (электр.)	1000	
КИУМ энергоблока	0,8	
Длительность жизненного цикла энергоблока, лет	50	
Ставка налога с прибыли, %	24	
<i>Интервально заданные параметры</i>		
Тариф на электроэнергию, цент./кВт.ч	2,00	3,50
Норма дисконта, %	5	10
Затраты на эксплуатацию энергоблока, млн.долл. в год	30	50
Затраты на топливо, млн.долл. в год	10	15
Капитальные вложения в строительство, млн. долл. в год	225	275
Срок строительства энергоблока, лет	3	7

Формулируется следующая *основная цель предлагаемого метода*:

на основе фиксированных и интервально заданных исходных данных инвестиционного проекта электростанции рассчитать интервальные значения показателей его экономической эффективности и найти оценку рисков отрицательного результата.

Сложность решения этой задачи в том, что каждый интервальный параметр $[x_j]=[x_{j \min}; x_{j \max}]$ в табл. 7 порождает бесчисленное множество его различных точечных значений x_{ji} на заданном интервале неопределенности, а различные комбинации точечных значений ТЭП внутри заданных интервалов формируют бесконечное множество разных расчетных сценариев. Очевидно, что такая задача не может быть решена с применением существующего

метода сценарного анализа, основанного на расчете показателей эффективности для каждого сценария.

Вместе с тем, решение задачи возможно и существенно упрощается [74] при справедливости следующего утверждения:

- если зависимость показателя является монотонной функцией от ТЭП проекта, варьируемых в заданных диапазонах, то на множестве граничных значений варьируемых ТЭП можно выделить два экстремальных набора ТЭП «пессимистический» $\vec{X}(\text{пессим})$ и «оптимистический» $\vec{X}(\text{оптим})$, которые определяют минимальное $Y_{\text{мин}}$ и максимальное $Y_{\text{макс}}$ -значения показателя.

Чтобы показать, насколько важно выполнение условий монотонности рассмотрим следующий пример.

Пусть все ТЭП проекта АЭС, кроме нормы дисконта, взяты из табл. 7 и фиксированы на их средних значениях. Предположим, что норма дисконта может изменяться в диапазоне $5\% \leq d \leq 25\%$. Тогда, используя формулу (1.1), можно рассчитать значение показателя NPV при разных значениях нормы дисконта и путем вычисления конечных разностей определить характер изменения функции.

Полученный график зависимости показателя NPV от нормы дисконта представлены на рис. 2.1.

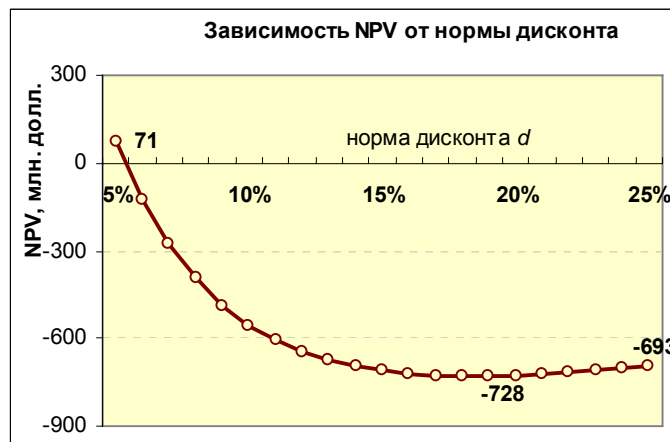


Рис. 2.1. График зависимости NPV от нормы дисконта

На рис. 2.1 маркерами показаны значения показателя NPV при изменении нормы дисконта с шагом 1% в диапазоне $5\% \leq d \leq 25\%$. Минимальное значение NPV в этом диапазоне составляет -728 млн.долларов. Более наглядное представление о наличии экстремума в зависимости NPV от нормы дисконта дает график изменения производной, представленный на рис. 2.2.

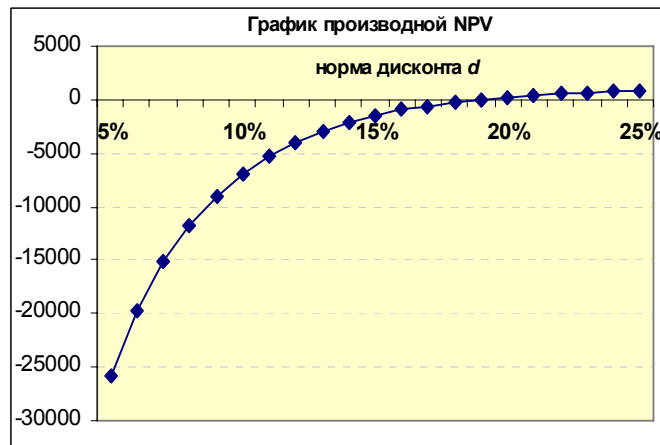


Рис. 2.2. График зависимости производной NPV от нормы дисконта

Производная показателя NPV на рис. 2.3 рассчитывалась как отношение разности значений NPV к разности значений нормы дисконта.

Из рис. 2.2 видно, что производная показателя NPV меняет знак с отрицательного на положительный при $d=19\%$. Это означает, что функция $NPV(d)$ имеет в этой точке экстремум и следовательно не удовлетворяет условию монотонности.

Допустим, что при расчете интервального значения показателя NPV исследователь ошибочно предположил монотонную зависимость показателя NPV от нормы дисконта. Тогда он определяет интервал неопределенности показателя NPV , ориентируясь на граничные значения показателя, полученные при граничных значениях дисконта $d=5\%$ и $d=25\%$.

В этом случае был бы получен следующий интервал неопределенности $-693 \leq NPV \leq 71$ показателя: NPV . Очевидно, что эта интервальная оценка NPV является ошибочной, т.к. реальный интервал неопределенности определяется как $-728 \leq NPV \leq 71$.

Следовательно, при нарушении условий монотонности определение интервальных значений показателей эффективности существенно усложняется, т.к. требует решения задачи на минимум и максимум.

2.2. Проверка монотонности зависимости показателей эффективности от варьируемых ТЭП

Для проверки условий монотонности показателя эффективности от варьируемых ТЭП необходимо найти частные производные показателя эффективности y от варьируемых ТЭП x_i , что возможно лишь при наличии моделей показателей эффективности в виде функций вида $y=f(x_1; x_2; \dots x_n)$.

Расчетные формулы показателей эффективности, приведенные в первой главе, являются дискретными суммами, и не допускают оценку частных производных. В связи с этим ниже для проверки условий монотонности используются формулы, которые позволяют записать зависимость показателей эффективности от варьируемых ...переменных x_i в виде непрерывной функции $y=f(x_1; x_2 \dots x_n)$.

В рамках принятых гипотез о постоянстве ежегодных значений потоков переход от дискретной функции к непрерывной функции можно реализовать двумя способами:

- путем замены сумм определенным интегралом;
- с использованием формулы геометрической прогрессии.

Все дискретные формулы (1.1), (1.2), (1.5) показателей эффективности приведенные в первой главе содержат суммы членов дисконтирования вида:

$$\sum_{t=T_1}^{T_2} (1+d)^{-t} . \quad (2.1)$$

Рассмотрим два способа представления суммы (2.1) непрерывной аналитической функцией.

При замене суммы определенным интегралом легко получить следующее выражение:

$$\sum_{t=T_1}^{T_2} (1+d)^{-t} \cong \int_{T_1}^{T_2} e^{-t \cdot d} dt = (e^{-T_1 \cdot d} - e^{-T_2 \cdot d}) / d. \quad (2.2)$$

Приближение (2.2) является достаточно точным, что иллюстрируется на рис. 2.3.

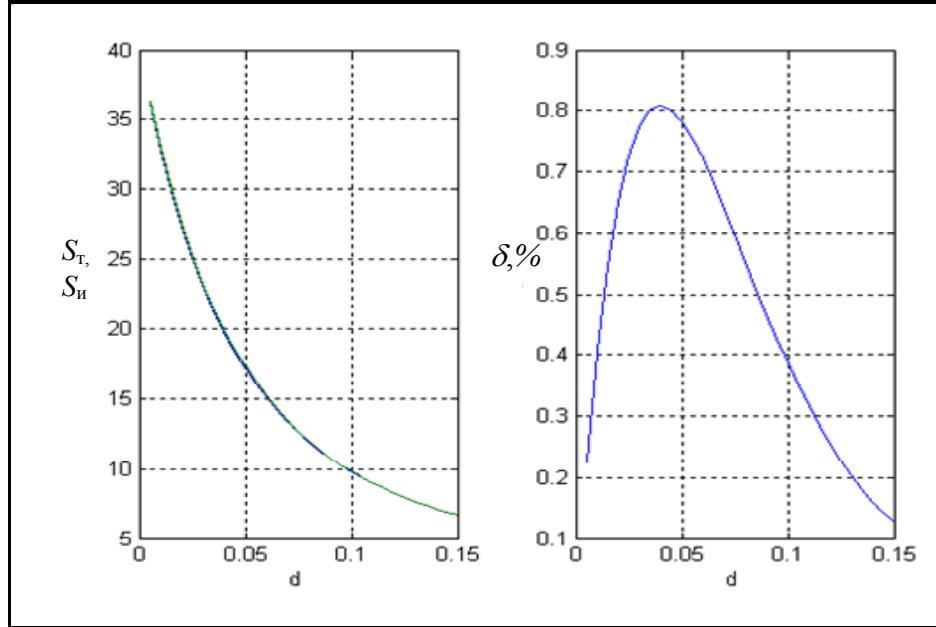


Рис. 2.3. Сравнение точной и приближенной оценок дискретной суммы

В левом окне рис. 2.3 показаны две зависимости от нормы дисконта, построенные по формуле (2.1) для точной формулы суммы S_T и приближенной интегральной формулы S_n (2.2). Т.к. на рис. 3.1 эти кривые практически совпадают, в правом окне показан график относительной ошибки приближения $\delta(\%)$ [75].

Как видно из рис. 2.3, относительная ошибка не превышает 1%. Из этого следует, что приближение суммы интегралом является достаточно точным. Приведенные соображения подтверждают возможность замены суммы на интеграл в формулах расчета для показателей экономической эффективности.

Использование формулы геометрической прогрессии

Формула (2.1) может рассматриваться как сумма членов геометрической прогрессии, первый член которой b_1 равен $(1+d)^{-T_1}$, а

знаменатель q равен $(1+d)^{-1}$. Известно, что любой член геометрической прогрессии может быть найден по следующей формуле:

$$b_n = b_1 \cdot q^{n-1}, \quad (2.3)$$

где b_1 – первый член геометрической прогрессии, q – знаменатель геометрической прогрессии. Сумма n первых членов находится по формуле:

$$S_n = b_1 \cdot (q^n - 1) / (q - 1) \quad (2.4)$$

Применяя формулу (2.4) суммы геометрической прогрессии к сумме (2.1), получаем следующую функцию:

$$\sum_{t=T_1}^{T_2} (1+d)^{-t} = (1+d)^{-T_1} \cdot [1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_2-T_1-1)}], \quad (2.5)$$

Необходимо подчеркнуть, что формула (2.5) обеспечивает точное совпадение численных результатов.

2.3. Определение допустимых границ изменения ТЭП при расчете интервальных показателей

Из приведенного в разделе 2.1 утверждения следует, что при выполнении условия монотонности интервальное значение показателя эффективности $[Y] = [Y_{\min}; Y_{\max}]$ может быть найдено в результате расчета показателя Y для двух экстремальных наборов ТЭП $\vec{X}(\text{нессим})$ и $\vec{X}(\text{оптим})$.

Можно предполагать, что в общем случае, когда имеют место предельно «широкие» диапазоны изменения ТЭП, условия монотонности не будут выполняться. Проиллюстрируем это на примере показателя NPV .

Это означает, что в данном случае согласно сформулированному в разделе 2.1 утверждению нельзя сформировать два экстремальных набора.

Ниже анализ монотонности и определение допустимых границ изменения ТЭП проводится для трех наиболее важных показателей эффективности инвестиционных проектов, а именно: NPV , $ДЗ$ и $УДЗ$. Учитывая, что другие показатели, например, срок окупаемости, внутренняя

норма доходности являются производными от показателя NPV , их монотонность не требует отдельного доказательства.

При анализе монотонности наиболее сложной оказывается дискретная модель показателей эффективности, которая не допускает операцию дифференцирования. В связи с этим при определении условий монотонности эта модель не используется, а применяются приближенная интегральная модель показателя и модель показателя как сумма геометрической прогрессии

2.3.1. Условия монотонности показателя NPV

В предположении постоянства ежегодных финансовых затрат и доходов инвестиционного проекта модель критерия NPV , записывается в виде:

$$NPV = (B \cdot \sum_{t=T_1+1}^{T_2} (1+d)^{-(t-1)} - C_{кан} \cdot \sum_{t=1}^{T_1} (1+d)^{-(t-1)} - C_{общ} \cdot \sum_{t=T_1+1}^{T_2} (1+d)^{-(t-1)}) \quad (2.6)$$

где $C_{кан}$ – ежегодные капитальные вложения в строительство энергоблока в течение срока строительства; T_1 – срок строительства; $C_{общ}$ – ежегодные затраты на топливо $C_{топ}$ и эксплуатацию $C_{эксп}$ энергоблока после завершения строительства до конца срока службы T_2 ; d – норма дисконта; B – ежегодная выручка от продажи электроэнергии, которая определяется по формуле:

$$B = W \cdot \tau = N \cdot 8760 \cdot КИУМ \cdot 10^{-5} \cdot \tau, \quad (2.7)$$

где W – ежегодная выработка электроэнергии; N – установленная мощность энергоблока; $КИУМ$ – коэффициент использования установленной мощности, τ – тариф на электроэнергию.

Для анализа монотонности показателя NPV вместо формулы (2.6) использовалась формула:

$$NPV = (B - C_{общ})(1+d)^{-T_1} \cdot \{1 + d^{-1}(1 - (1+d)^{-(T_2-T_1-1)})\} - C_{кан} \cdot \{1 + d^{-1}(1 - (1+d)^{-(T_1-1)})\}, \quad (2.8)$$

основанная на замене дискретной суммы суммой геометрической прогрессии. Необходимо отметить, что при сделанных допущениях о постоянстве ежегодных значений расходов и доходов формула (2.8)

обеспечивает точное совпадение результатов с формулой (2.6) и позволяет определять частные производные от показателя NPV по варьируемым переменным.

Монотонность зависимости показателя NPV анализируется по каждой из пяти варьируемых переменных, включая B , $C_{кан}$, $C_{общ}$, d и T_1 , в предположении, что остальные переменные постоянны.

1. Частная производная от показателя NPV по ежегодной выручке B от продажи электроэнергии:

$$\partial NPV / \partial B = (1+d)^{-T_1} \cdot \left(1 + d^{-1} \cdot (1 - (1+d)^{-(T_2-T_1-1)})\right) > 0. \quad (2.9)$$

Условие положительности знака частной производной сохраняется при любых положительных значениях остальных переменных

2. Частная производная от показателя NPV по капитальным затратам $C_{кан}$:

$$\partial NPV / \partial C_{кан} = -d^{-1} \cdot (1 - (1+d)^{-(T_1-1)}) - 1 < 0. \quad (2.10)$$

Отрицательный знак частной производной сохраняется при любых положительных значениях остальных переменных.

3. Частная производная от показателя NPV по затратам на топливо и эксплуатацию $C_{общ}$:

$$\partial NPV / \partial C_{общ} = (1+d)^{-T_1} \cdot \left(-d^{-1} \cdot (1 - (1+d)^{-(T_2-T_1-1)}) - 1\right) < 0. \quad (2.11)$$

Отрицательный знак частной производной сохраняется при $T_2 > T_1$ и любых положительных значениях остальных переменных

4. Производная от показателя NPV по сроку строительства T_1 :

$$\partial NPV / \partial T_1 = -\frac{C_{кан} + P \cdot \ln(1+d)}{d \cdot (1+d)^{T_1-1}} < 0. \quad (2.12)$$

Отрицательный знак частной производной сохраняется при любых положительных значениях варьируемых переменных

Анализируя формулы (2.9) ÷ (2.12), можно сделать следующие выводы:

- производные во всех формулах имеют постоянный знак, т.е. показатель NPV монотонно зависит от положительных переменных B , $C_{кан}$, $C_{общ}$ при любых диапазонах их изменения в реальных проектах;

- при возрастании ежегодной выручки B показатель NPV монотонно возрастает;
- при возрастании срока строительства T_1 , капитальных затрат $C_{кан}$; общих затрат на топливо и эксплуатацию $C_{общ}$ показатель NPV монотонно убывает.

5. Производная от показателя NPV по норме дисконта d

Для целей анализа знака производной показателя NPV по норме дисконта в формуле (2.8) полезно сгруппировать переменные и переписать ее в следующем виде:

$$NPV = C_{кан} \cdot \left\{ \lambda \cdot (1+d)^{-T_1} \cdot \left(1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_2-T_1-1)} \right) - \left(1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_1-1)} \right) \right\}, \quad (2.13)$$

где $\lambda = P / C_{кан} = (B - C_{общ}) / C_{кан}$ – отношение ежегодной прибыли P к ежегодным капитальным вложениям $C_{кан}$.

Переменную λ можно трактовать как обобщенный коэффициент экономической эффективности. В силу простоты вычисления он полезен уже на стадии предварительного анализа эффективности проекта. Очевидно, чем больше значение коэффициента λ , тем эффективнее инвестиционный проект.

Коэффициент λ можно также выразить через первичные параметры в виде

$$\lambda = P / C_{кан} = \{ N \cdot 8760 \cdot КИУМ \cdot 10^{-5} \cdot \tau - C_{общ} \} / C_{кан}, \quad (2.14)$$

где N – установленная мощность энергоблока; $КИУМ$ – коэффициент использования установленной мощности, τ – тариф на электроэнергию.

Как показывает анализ различных инвестиционных проектов электростанций, если $\lambda \leq 0,2$ проект неэффективен.

Для определения допустимых пределов изменения переменных λ , T_1 и d найдем производную от функции (2.13) по переменной d .

Частная производная от NPV по норме дисконта определяется как:

$$\partial NPV / \partial d = C_{кан} \cdot \left\{ - \frac{(\lambda + 1) \cdot (T_1 \cdot d + 1)}{(1+d)^{T_1} \cdot d^2} + \frac{\lambda \cdot (T_2 \cdot d + 1)}{(1+d)^{T_2} \cdot d^2} + \frac{1}{d^2} \right\} \quad (2.15)$$

Очевидно, что положительная константа $C_{кан}$ не оказывает влияния на знак производной, поэтому необходимо анализировать только знак множителя в фигурных скобках. Т.к. аналитическое решение не может быть найдено, задача решалась численными методами.

Расчет проводился при изменении нормы дисконта в диапазоне от $1\% \leq d \leq 15\%$ с шагом 1%. Было рассмотрено 9 различных комбинаций переменных T_I и λ .

$$\lambda = 0,2; \text{ срок строительства } T_I = 3, T_I = 5, T_I = 7;$$

$$\lambda = 0,3; \text{ срок строительства } T_I = 3, T_I = 5, T_I = 7;$$

$$\lambda = 0,4; \text{ срок строительства } T_I = 3, T_I = 5, T_I = 7;$$

Выбранные значения перекрывают диапазон этих переменных в реальных проектах энергоблоков.

Результаты анализа знака производной (2.15) при заданных изменениях переменных приведены в табл. 8.

Таблица 8.

Определение знака производной (2.15) при разных комбинациях переменных

d	$\lambda=0,2$			$\lambda=0,3$			$\lambda=0,4$		
	$T_I=3$	$T_I=5$	$T_I=7$	$T_I=3$	$T_I=5$	$T_I=7$	$T_I=3$	$T_I=5$	$T_I=7$
1%	-148,9	-140,9	-128,5	-224,9	-216,2	-202,8	-300,8	-291,4	-277,0
2%	-110,5	-102,8	-91,2	-167,2	-158,9	-146,3	-223,9	-214,9	-201,4
3%	-83,1	-75,8	-64,9	-126,1	-118,1	-106,3	-169,0	-160,4	-147,7
4%	-63,3	-56,3	-46,1	-96,3	-88,7	-77,7	-129,3	-121,1	-109,2
5%	-48,9	-42,1	-32,5	-74,6	-67,3	-56,9	-100,3	-92,5	-81,3
6%	-38,2	-31,7	-22,7	-58,5	-51,5	-41,8	-78,9	-71,4	-60,8
7%	-30,1	-24,0	-15,5	-46,5	-39,8	-30,6	-62,8	-55,6	-45,7
8%	-24,1	-18,2	-10,2	-37,3	-30,9	-22,3	-50,6	-43,7	-34,4
9%	-19,4	-13,7	-6,2	-30,3	-24,2	-16,0	-41,2	-34,6	-25,8
10%	-15,8	-10,4	-3,3	-24,9	-19,0	-11,3	-33,9	-27,6	-19,3
11%	-13,0	-7,8	-1,1	-20,6	-14,9	-7,7	-28,2	-22,1	-14,3
12%	-10,7	-5,7	0,6	-17,2	-11,8	-5,0	-23,7	-17,8	-10,5
13%	-8,9	-4,1	1,8	-14,5	-9,3	-2,8	-20,0	-14,4	-7,5
14%	-7,5	-2,9	2,8	-12,3	-7,3	-1,2	-17,1	-11,7	-5,1
15%	-6,3	-1,8	3,5	-10,5	-5,7	0,1	-14,7	-9,5	-3,3

Как следует из табл. 8, в подавляющем числе случаев производная по норме дисконта не меняет знака. Жирным шрифтом отмечены 2 случая, когда

производная от показателя NPV по норме дисконта меняет знак. Это имеет место, когда $T_I=7, \lambda=0,2$ и когда $T_I=7, \lambda=0,3$.

На рис. 2.4 приведены графики изменения производной NPV для $\lambda=0,2$ при изменении срока строительства.

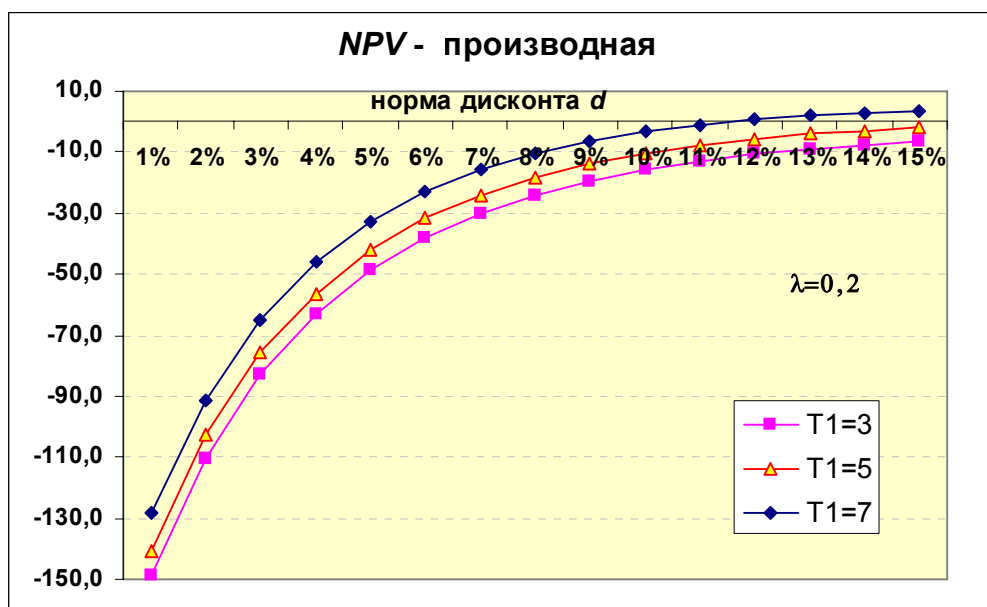


Рис. 2.4. Производная показателя NPV при $\lambda = 0,2$

Из табл. 11 и рис. 2.4 следует, что производная показателя NPV при изменении нормы дисконта $1\% \leq d \leq 15\%$ сохраняет постоянство знака, если $\lambda \geq 0,4$ и $3 \leq T_I \leq 7$, причем показатель NPV тем меньше, чем больше норма дисконта d . При любом значении коэффициента $\lambda \geq 0,4$, частная производная от NPV по норме дисконта имеет отрицательный знак.

Результат проведенного анализа показателя NPV позволяет записать допустимую область Ω_{NPV} изменения интервальных ТЭП в следующем виде:

$$\Omega_{NPV} = \{\lambda \geq 0,4; 1\% \leq d \leq 15\%; 3 \leq T_I \leq 7\}. \quad (2.16)$$

Выполнение условий монотонности в области Ω_{NPV} позволяет находить интервальное значение показателя $[NPV_{мин}; NPV_{макс}]$ всего по двум экстремальным наборам, включая *пессимистический*, при котором значение NPV минимально и *оптимистический*, когда значение NPV максимально.

При назначении границ параметров должно обеспечиваться неравенство $\lambda \geq 0,4$, при котором выполняется условие монотонности.

На первый взгляд, проверка этого условия не представляет трудностей и при заданной области (2.16) легко можно установить допустимые границы ТЭП. Однако это возможно только в случае, когда ТЭП являются независимыми переменными. Вместе с тем, как видно из формулы (2.14), ТЭП связаны определенным соотношением через значение λ . Следовательно, при нахождении допустимых изменений необходимо учитывать как формат укрупненных данных в табл. 6, так и формулу (2.14).

Очевидно, что границы ТЭП в экстремальных наборах при заданном интервальном значении коэффициента $[\lambda]=[\lambda_{мин}; \lambda_{макс}]$ можно определить по следующим формулам:

$$\lambda_{мин} = \{N \cdot 8760 \cdot КИУМ \cdot 10^{-5} \cdot \tau_{мин} - C_{общ(макс)}\} / C_{кап(макс)} \quad (2.17 \text{ а})$$

$$\lambda_{макс} = \{N \cdot 8760 \cdot КИУМ \cdot 10^{-5} \cdot \tau_{макс} - C_{общ(мин)}\} / C_{кап(мин)} \quad (2.17 \text{ б})$$

Описание экстремальных наборов в допустимой области монотонности Ω_{NPV} приведено в табл. 9 с учетом взаимосвязанности ТЭП через коэффициент λ .

Таблица 9.

Экстремальные наборы ТЭП для показателя NPV

Показатель	Границы показателя	Экстрем. наборы ТЭП	τ	$C_{эксн}$	$C_{топ}$	$C_{кап}$	T_1	d
NPV	мин	Пессим.	мин	макс	макс	макс	макс	макс
	макс	Оптим.	макс	мин	мин	мин	мин	мин

2.3.2. Условия монотонности показателя УДЗ

Точная дискретная модель показателя УДЗ с учетом постоянства ежегодных финансовых потоков на расчетном горизонте может быть записана в виде:

$$УДЗ = \left\{ C_{кап} \cdot \sum_{t=0}^{T_1} (1+d)^{-t} + C_{общ} \cdot \sum_{t=T_1}^{T_2} (1+d)^{-t} \right\} / \left\{ W \cdot \sum_{t=T_1}^{T_2} (1+d)^{-t} \right\}. \quad (2.18)$$

где как и ранее, W – ежегодная выработка электроэнергии; $C_{кап}$ – ежегодные капитальные вложения в строительство энергоблока в течение срока

строительства T_1 ; $C_{общ}$ - ежегодные затраты на топливо и эксплуатацию энергоблока после завершения строительства до конца срока службы T_2 .

Анализ знака производной показателя $УДЗ$ проводился путем замены дискретной суммы определенным интегралом. Полученная модель непрерывной функции имеет вид:

$$УДЗ = \frac{1}{W} \cdot \left[C_{кан} \cdot \frac{1 - e^{-T_1 \cdot d}}{e^{-T_1 \cdot d} - e^{-T_2 \cdot d}} + C_{общ} \right]. \quad (2.19)$$

Модель (2.19) позволяет сравнительно просто получить выражения частных производных от $ДЗ$ по соответствующим переменным.

1. Частная производная от показателя $УДЗ$ по капитальным затратам $C_{кан}$

С учетом выражения (2.19) производная от показателя $УДЗ$ записывается в виде:

$$\partial УДЗ / \partial C_{кан} = \frac{1}{W} \cdot \frac{e^{T_1 \cdot d} \cdot (1 - e^{-T_1 \cdot d})}{(1 - e^{-(T_2 - T_1) \cdot d})} > 0 \quad (2.20)$$

Положительность производной вытекает из того факта, что все составляющие формулы (2.20) положительны для любой ставки дисконта d .

Из формулы (2.20) следует, что частная производная $УДЗ$ по капитальным вложениям не включает их значения $C_{кан}$. Это означает, что показатель $УДЗ$ линейно возрастает при увеличении ежегодных капитальных вложений $C_{кан}$.

2. Производная от показателя $УДЗ$ по затратам на топливо и эксплуатацию $C_{общ}$

С использованием формулы (2.19) легко получить выражение для производной:

$$\partial УДЗ / \partial C_{общ} = 1/W > 0. \quad (2.21)$$

Знак частной производной положителен при любых ежегодных затратах $C_{общ}$ (на топливо и эксплуатацию). Следовательно, показатель $УДЗ$ линейно возрастает при их увеличении ежегодных затрат $C_{общ}$.

3. Производная от показателя $УДЗ$ по сроку строительства T_1

Производная от формулы (2.19) по сроку строительства имеет вид:

$$\partial УДЗ / \partial T_1 = \frac{C_{кан.}}{W} \cdot \frac{d \cdot e^{(T_1+T_2)d} \cdot (e^{T_2d} - 1)}{(e^{T_1d} - e^{T_2d})^2} > 0, \quad (2.22)$$

Таким образом, показатель *УДЗ* возрастает как монотонная и нелинейная функция при увеличении срока строительства T_1 .

4. Частная производная от показателя *УДЗ* по норме дисконта d определяется по формуле:

$$\partial УДЗ / \partial d = \frac{C_{кан.}}{W} \cdot \frac{e^{(T_2+T_1)d} \cdot \{T_1 \cdot e^{T_2d} - T_2 \cdot e^{T_1d} + T_2 - T_1\}}{(e^{T_1d} - e^{T_2d})^2}. \quad (2.23)$$

В формуле (2.23) все составляющие, кроме члена в фигурных скобках, положительны и, следовательно, не могут изменить знак производной. В связи с этим для проверки условий монотонности достаточно исследовать постоянство знака производной только для выражения в фигурных скобках в числителе формулы (2.23).

Т.к. оценку знака выражения $\{T_1 \cdot e^{T_2d} - T_2 \cdot e^{T_1d} + T_2 - T_1\}$ нельзя найти аналитическими методами, задача решалась численными методами.

В ходе проведения расчетов, как и в случае *NPV* варьировались три переменные:

- срок строительства $T_1 = 3, T_1 = 5, T_1 = 7$;
- коэффициент $\lambda = 0,2, \lambda = 0,3, \lambda = 0,4$;
- норма дисконта в диапазоне от $1\% \leq d \leq 25\%$ с шагом 1%.

Выбранные значения переменных T_1 и λ перекрывают их диапазон в реальных проектах энергоблоков.

С учетом высокой чувствительности результатов проекта к изменению нормы дисконта для нее сознательно был взят предельно широкий диапазон изменения d , который не может иметь место при оценке реальных ИП. Это было сделано с целью исследовать математические свойства и монотонность функции показателя.

При этом необходимо определить знак неравенства при изменении переменных T_1 и d в диапазонах, соответствующих реальным проектам энергоблоков:

$$T_1 \cdot e^{T_2 \cdot d} - T_2 \cdot e^{T_1 \cdot d} + T_2 - T_1 \geq 0?, \quad 3 \leq T_1 \leq 7 \text{ и } 1\% \leq d \leq 25\%, \quad (2.24)$$

Результат численного решения неравенства представлен в табл. 10.

Таблица 10.

Решение неравенства (2.24) при разных комбинациях переменных

d	$T_1=7$	$T_1=5$	$T_1=3$
1%	0,13	0,14	0,14
2%	0,64	0,67	0,69
3%	1,81	1,86	1,91
4%	4,08	4,18	4,26
5%	8,19	8,34	8,49
6%	15,4	15,6	15,8
7%	27,6	27,9	28,2
8%	48,2	48,7	49,1
9%	82,7	83,3	83,9
10%	140,2	140,9	141,6
11%	235,4	236,4	237,2
12%	393,0	394,2	395,2
13%	653,5	655,0	656,2
14%	1083,7	1085,5	1086,9
15%	1793,8	1795,9	1797,6
16%	2965,2	2967,7	2969,7
17%	4897,4	4900,4	4902,7
18%	8084,0	8087,5	8090,2
19%	13338,9	13342,9	13345,9
20%	22003,6	22008,3	22011,8
21%	36290,6	36295,9	36299,9
22%	59847,0	59853,1	59857,6
23%	98686,2	98693,2	98698,2
24%	162722,6	162730,6	162736,2
25%	268302,3	268311,4	268317,7

Из табл. 10 следует, что знак выражения $T_1 \cdot e^{T_2 \cdot d} - T_2 \cdot e^{T_1 \cdot d} + T_2 - T_1 \geq 0$, и следовательно, знак частной производной $\partial \text{УДЗ} / \partial d$ положителен при любых значениях нормы дисконта $1\% \leq d \leq 25\%$ и сроке строительства $3 \leq T_1 \leq 7$, которые могут иметь место при оценке инвестиционных проектов энергоблоков.

Таким образом, показатель УДЗ монотонно возрастает при увеличении нормы дисконта и срока строительства.

Допустимая область показателя $УДЗ$, в которой выполняется условие монотонности его изменения, определяется как:

$$\Omega_{УДЗ} = \{\text{любые значения } C_{\text{кап}}, C_{\text{топ}}, C_{\text{эксп}}, d; 3 \leq T_1 \leq 7\}. \quad (2.25)$$

При этом переменные могут принимать, внутри диапазонов их изменения в реальных проектах электростанций.

Экстремальные наборы варьируемых переменных для показателя $УДЗ$, найденные с учетом знаков производных по переменным $C_{\text{кап}}, C_{\text{общ}}, T_1$ и d , приведены в табл. 11.

Таблица 11.

Экстремальные наборы ТЭП для показателя $УДЗ$

Показатель	Границы показателя	Экстрем. наборы ТЭП	$C_{\text{эксп}}$	$C_{\text{топ}}$	$C_{\text{кап}}$	T_1	d
$УДЗ$	<u>мин</u>	Оптим.	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>
	<u>макс</u>	Пессим.	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>

2.3.3. Условия монотонности показателя $ДЗ$

В предположении постоянства ежегодных финансовых затрат инвестиционного проекта дискретная модель показателя $ДЗ$ записывается в виде:

$$ДЗ = \sum_{t=1}^{T_1} C_{\text{кап}} \cdot (1+d)^{-(t-1)} + \sum_{t=T_1+1}^{T_2} C_{\text{общ}} \cdot (1+d)^{-(t-1)}, \quad (2.26)$$

В формуле приняты обозначения составляющих затрат, использованные выше.

Проверка условий монотонности показателя $ДЗ$ при изменении переменных ниже проводится путем замены дискретной суммы (2.26) формулой геометрической прогрессии

$$ДЗ = C_{\text{кап}} \cdot \left(1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_1-1)}\right) + C_{\text{общ}} \cdot (1+d)^{-T_1} \cdot \left(1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_2-T_1-1)}\right) \quad (2.27)$$

При этом легко получить выражения частных производных от $ДЗ$ по соответствующим переменным.

1. Частная производная от показателя $ДЗ$ по капитальным затратам $C_{\text{кап}}$

$$\partial DЗ / \partial C_{кан} = 1 + d^{-1} \cdot (1 - (1 + d)^{-(T_1-1)}) > 0. \quad (2.28)$$

При любом значении нормы дисконта больше нуля положительность знака производной $\partial DЗ / \partial C_{кан}$ очевидна, т.к. при любой норме дисконта член $1/(1+d)^{T_1-1}$ меньше единицы.

Положительность производной означает, что при фиксированных норме дисконта d , сроке строительства T_1 и затратах на топливо и эксплуатацию $C_{общ}$ показатель $DЗ$ линейно возрастает при увеличении ежегодных капитальных вложений.

2. Частная производная от показателя $DЗ$ по затратам на топливо и эксплуатацию $C_{общ}$ записывается в виде

$$\partial DЗ / \partial C_{общ} = (1 + d)^{-T_1} \cdot (1 + d^{-1} \cdot (1 - (1 + d)^{-(T_2-T_1-1)})) > 0. \quad (2.29)$$

Легко установить, что частная производная положительна при любых значениях нормы дисконта. Следовательно, показатель $DЗ$ линейно возрастает при увеличении ежегодных общих затрат $C_{общ}$ (на топливо и эксплуатацию).

3. Частная производная от показателя $DЗ$ по сроку строительства T_1

$$\partial DЗ / \partial T_1 = C_{общ} \cdot (\mu - 1) \cdot \ln(1 + d) \cdot d^{-1} \cdot (1 + d)^{-(T_1-1)} \quad (2.30)$$

В формуле (2.30) введен безразмерный коэффициент μ , который определяет отношение капитальных затрат к общим затратам на топливо и эксплуатацию, т.е. $\mu = C_{кан}/C_{общ}$. Очевидно, что коэффициент μ положителен

Анализ частной производной (2.30), которая включает множитель $(\mu-1)$, показывает, что ее знак зависит от знака коэффициента μ . При этом

$$\begin{aligned} &\text{частная производная положительна, если } \mu > 1 \text{ (} C_{кан} > C_{общ} \text{)} \\ &\text{частная производная отрицательная, если } \mu < 1 \text{ (} C_{кан} < C_{общ} \text{)} \\ &\text{частная производная равна нулю, если } \mu = 1 \text{ (} C_{кан} = C_{общ} \text{)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Таким образом, если $\mu > 1$ т.е. $C_{кан} > C_{общ}$, производная положительна, т.е. показатель $DЗ$ возрастает при увеличении срока строительства T_1 . Если же $C_{кан} < C_{общ}$ ($\mu < 1$), производная отрицательна и показатель $DЗ$ убывает при возрастании срока строительства T_1 .

Особым случаем является значение $\mu=1$, когда ежегодные капитальные вложения $C_{\text{кап}}$ равны ежегодным суммарным затратам $C_{\text{общ}}$ на топливо, и эксплуатацию. В этом случае производная равна нулю.

Учитывая, что в реальных проектах электростанций отношение $C_{\text{кап}}/C_{\text{общ}}$ ежегодных капитальных затрат к ежегодным затратам на эксплуатацию и топливо существенно больше единицы, в дальнейшем случаи $\mu=1$ и $\mu<1$ не рассматриваются. При этом показатель ДЗ монотонно возрастает с ростом срока строительства T_1 .

4. Производная от показателя ДЗ по норме дисконта d

Для оценки частной производной по норме дисконта запишем формулу (2.27) в форме более удобной для анализа знака производной:

$$ДЗ = C_{\text{общ}} \cdot \left\{ \mu \cdot \left(1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_1-1)} \right) + (1+d)^{-T_1} \cdot \left(1 + d^{-1} - d^{-1} \cdot (1+d)^{-(T_2-T_1-1)} \right) \right\}, \quad (2.32)$$

Частная производная от выражения (2.32) по норме дисконта d имеет вид достаточно громоздкой формулы:

$$\frac{\partial ДЗ}{\partial d} = C_{\text{общ}} \cdot \frac{(\mu - 1) \cdot (d \cdot T_1 + 1) \cdot (1 + d)^{T_2} + (d \cdot T_2 + 1) \cdot (1 + d)^{T_1} - \mu \cdot (1 + d)^{T_1 + T_2}}{(1 + d)^{T_1 + T_2} \cdot d^2} \quad (2.33)$$

Анализируя формулу (2.33), можно заключить, что знаменатель формулы (2.33) положителен и положительно значение $C_{\text{общ}}$. Следовательно эти составляющие не влияют на знак производной. В связи этим необходимо исследование только числителя формулы, который записывается в следующем виде:

$$U(d, T_1, \mu) = (\mu - 1) \cdot (d \cdot T_1 + 1) \cdot (1 + d)^{T_2} + (1 + d)^{T_1} \cdot (d \cdot T_2 + 1) - \mu \cdot (1 + d)^{T_1 + T_2}, \quad (2.34)$$

Учитывая, что знак функции числителя $U(d, T_1, \mu)$ трудно определить аналитически, задача решалась численными методами. При этом цель анализа состояла в том, чтобы на множестве возможных вариантов выделить хотя бы одну комбинацию значений T_1 и μ , при которой числитель (2.34) имеет нулевое решение.

Для проверки этого факта значения числителя $U(d, T_1, \mu)$ рассчитывались на расчетном горизонте $T_2=50$ лет для различных

комбинаций значений T_1 и μ при изменении нормы дисконта в диапазоне от $1\% \leq d \leq 25\%$ с шагом 1%.

При моделировании было сформировано три комбинации переменных T_1 и μ :

1. $T_1=3; \mu=50$;
2. $T_1=5, \mu=25$
3. $T_1=7, \mu=50$

Для каждого из приведенных комбинаций рассчитывалось значение числителя $U(d, T_1, \mu)$ формулы (2.33) при изменении нормы дисконта от 1% до 25%.

В табл. 12 представлены результаты, полученные для первого варианта $T_1=3; \mu=50$.

Таблица 12.

Знак числителя $U(d, T_1, \mu)$ формулы (2.33) при $T_1=3; \mu=50$.

d	Числитель $U(d, T_1, \mu)$
1%	-0,2
2%	-0,9
3%	-2,6
4%	-6,3
5%	-13,5
6%	-27,1
7%	-52,3
8%	-98,1
9%	-180,4
10%	-326,6
11%	-583,8
12%	-1032,4
13%	-1807,8
14%	-3137,2
15%	-5398,6
16%	-9216,3
17%	-15614,7
18%	-26263,9
19%	-43868,8
20%	-72784,5
21%	-119981,9
22%	-196555,6
23%	-320067,7
24%	-518170,8
25%	-834184,1

Аналогичные расчеты, проведенные для вариантов №2 и №3, также подтвердили отрицательность знака числителя формулы (2.33).

Таким образом, можно заключить, что при любых значениях варьируемых переменных при расчете показателя ДЗ, знак частной производной ДЗ по норме дисконта отрицателен, т.е. показатель ДЗ монотонно убывает с увеличением нормы дисконта.

Полученные результаты позволяют сформировать следующую допустимую область $\Omega_{ДЗ}$, в которой сохраняется условие монотонности показателя ДЗ:

$$\Omega_{ДЗ} = \{\text{любые значения } C_{\text{кан}}, C_{\text{тон}}, C_{\text{экс}}, d; 3 \leq T_1 \leq 7\} \quad (2.35)$$

Приведенные свойства и заданные допустимые значения варьируемых параметров (2.35) позволяют для показателя ДЗ задать два экстремальных набора для вычисления интервального показателя ДЗ, а именно *пессимистический*, при котором значение ДЗ минимально и *оптимистический* – когда значение ДЗ максимально.

Экстремальные (пессимистический и оптимистический) наборы варьируемых переменных для показателя ДЗ, найденные с учетом знаков производных по варьируемым приведены в табл. 13.

Таблица 13.

Экстремальные наборы варьируемых ТЭП и границы показателя ДЗ

Показатель	Границы показателя	Экстрем. наборы ТЭП	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{тон}}$	$C_{\text{кан}}$	T_1	d
ДЗ	<u>мин</u>	Оптим.	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>макс</i>
	макс	Пессим.	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>мин</i>

Необходимо подчеркнуть, что границы срока строительства в оптимистическом и пессимистическом наборах зависят от значения μ .

В сводной табл. 14 приведены экстремальные (пессимистические и оптимистические) наборы варьируемых ТЭП для показателей NPV, ДЗ и УДЗ.

Экстремальные наборы варьируемых ТЭП для показателей NPV , $ДЗ$ и $УДЗ$

Показатель	Границы показатель	Экстрем. наборы ТЭП	τ	$C_{\text{эксн}}$	$C_{\text{топ}}$	$C_{\text{кан}}$	T_1	d
NPV	мин	Пессим.	<i>мин</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>
	<u>макс</u>	Оптим.	<i>макс</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>
$УДЗ$	<u>мин</u>	Оптим.	–	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>
	макс	Пессим.	–	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>
$ДЗ$	<u>мин</u>	Оптим.	–	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>мин</i>	<i>макс</i>
	макс	Пессим.	–	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>макс</i>	<i>мин</i>

При указании границ показателей эффективности учитывалось, что NPV является максимизируемым, а $УДЗ$ и $ДЗ$ минимизируемыми показателями эффективности.

Из табл. 14 легко установить, что показатель NPV минимален, т.е. реализуется наихудший набор граничных значений ТЭП, если значение тарифа минимально, а все составляющие ежегодных затрат и норма дисконта максимальны.

Для минимизируемого показателя $УДЗ$ имеет место обратная ситуация. Показатель дисконтированных затрат $ДЗ$ не зависит от значения тарифа и тем больше, чем больше составляющие всех ежегодных затрат и чем меньше норма дисконта.

Учитывая, что такие показатели проекта как DPP (срок окупаемости) и IRR (внутренняя норма доходности) являются производными от показателя NPV их допустимые области совпадают с областью соответствующего первичного показателя.

Необходимо подчеркнуть, что граничные значения всех ТЭП должны лежать внутри допустимых областей, в которых выполняется условие монотонности соответствующих показателей эффективности.

2.4. Метод оценки рисков инвестиционных проектов электростанций

Экономические риски инвестиционного проекта связаны с неопределенностью внешних условий развития и неточностью ТЭП, что в свою очередь приводит к неточности и неопределенности рассчитанных показателей [76, 77].

В общем случае, как показано в первой главе, под риском $0 \leq R \leq 1$ инвестиционного проекта для выбранного показателя эффективности понимается вероятность (при вероятностной модели) или возможность возникновения отрицательного результата, когда максимизируемый показатель меньше (минимизируемый показатель больше) заданного экспертом допустимого порога C .

На основе интервального подхода, описанного в главе 1, разработан алгоритм оценки экономических рисков инвестиционного проекта при заданных пороговых значениях: на основе интервальных значений показателей и с помощью их многофакторных моделей.

В соответствии с новой парадигмой, описанной в первой главе, под риском понимается возможность того, что неточно определенный максимизируемый показатель y – меньше (минимизируемый показатель – больше) порога, который может быть задан в виде точечного C или интервального значения $[C]$.

При оценке риска по интервальным показателям различаются два случая:

- показатель задан в интервальной форме $[y]=[y_{min}; y_{max}]$; порог задан точечным значением C ;
- в интервальной форме заданы как показатель $[y]$, так и его пороговое значение $[C]=[C_{min}; C_{max}]$.

В первом случае при оценке риска необходимо сравнивать интервал с константой, а во втором – сравнивать два интервала.

Разработанный подход основан на формулах (1.31) и (1.32), которые позволяют рассчитать уровень β достоверности выполнения отношений «меньше» и «больше» на множестве интервальных чисел.

С учетом специфики задач оценки экономических рисков в разработанном подходе под риском R понимается уровень достоверности того, что интервальный показатель эффективности $[y]=[y_{min}; y_{max}]$ больше (максимизируемый показатель меньше) значения точечного порога C или его интервального значения $[C]$.

С учетом сказанного, формулы для расчета экономического риска инвестиционного проекта могут быть записаны в следующем виде.

Формулы оценки риска для максимизируемого показателя

Для максимизируемого интервального показателя $[y]=[y_{min}; y_{max}]$ при заданном точечном пороге C риск отрицательного результата вычисляется как:

$$\begin{aligned} R_{y < C} &= 0 \text{ при } y_{min} > C; \\ R_{y < C} &= (C - y_{min}) / (y_{max} - y_{min}) ; \text{ при } y_{min} \leq C \leq y_{max}; \\ R_{y < C} &= 1 \text{ при } y_{max} < C. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Можно показать, что численная оценка риска, найденная по формуле (2.36) совпадает с вероятностью отрицательного результата [78, 79], если предположить, что показатель y является равномерно распределенной случайной величиной в интервале $[y_{min}; y_{max}]$ с плотностью вероятности (рис. 2.5):

$$f(x) = \begin{cases} 1 / (y_{max} - y_{min}) & \text{при } y \in [y_{min}; y_{max}] \\ 0 & \text{при } y \notin [y_{min}; y_{max}] \end{cases} \quad (2.37)$$

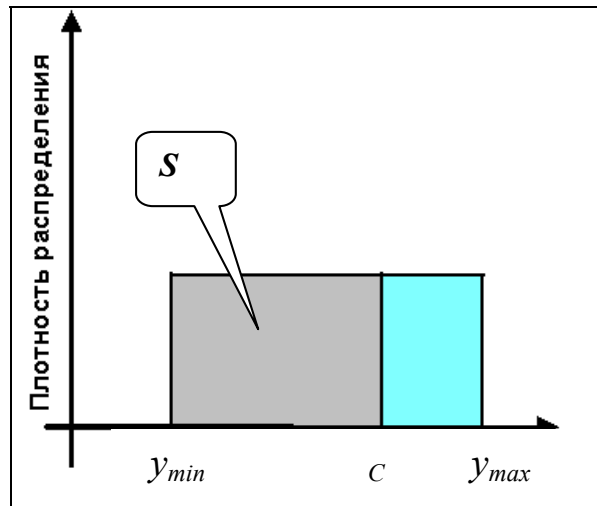


Рис. 2.5. Оценка риска при равномерном распределении показателя

Риск, т.е. вероятность того, что случайная величина y будет меньше допустимого порога C , определяется как площадь прямоугольника S . Так, например, вероятность (т.е. риск) того, что показатель экономической эффективности y будет меньше или больше допустимого порога C рассчитывается соответственно по формуле:

$$R_{y < C} = S = (C - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}). \quad (2.38)$$

Так как формулы 2.36 и 2.38 совпадают, то можно констатировать, что имеет место совпадение оценок риска при интервальной переменной и случайной равномерно распределенной величиной, если они имеют одинаковые диапазоны изменения.

Для максимизируемого интервального показателя $[y] = [y_{\min}; y_{\max}]$ и интервального порога $[C] = [C_{\min}; C_{\max}]$ в предположении, что $\Delta C < \Delta y$, риск отрицательного результата вычисляется как:

$$R_{y < C} = 0 \text{ при } y_{\min} > C_{\max};$$

$$R_{y < C} = [(C_{\min} - y_{\min}) + 0,5 \cdot (C_{\max} - C_{\min})] / (y_{\max} - y_{\min}); \text{ при } y_{\min} \leq C \leq y_{\max}; \quad (2.39)$$

$$R_{y < C} = 1 \text{ при } y_{\max} < C_{\min}.$$

Формулы оценки риска для минимизируемого показателя

Если исследуется минимизируемый показатель, формулы (2.36), (2.39) принимают следующий вид.

Интервальный показатель $[y] = [y_{\min}; y_{\max}]$; точечный порог C

$$\begin{aligned}
 R_{y>C} &= 0 \text{ при } y_{max} < C; \\
 R_{y>C} &= (y_{max} - C) / (y_{max} - y_{min}); \text{ при } y_{min} \leq C \leq y_{max}; \\
 R_{y>C} &= 1 \text{ при } y_{min} > C.
 \end{aligned}
 \tag{2.40}$$

Интервальный показатель $[y]=[y_{min}; y_{max}]$ и интервальный порог $[C]=[C_{min}; C_{max}]$

$$\begin{aligned}
 R_{y>C} &= 0 \text{ при; } y_{max} < C_{min}; \\
 R_{y>C} &= [(y_{max} - C_{min}) - 0,5 \cdot (C_{max} - C_{min})] / (y_{max} - y_{min}); \text{ при } y_{min} \leq C \leq y_{max}; \\
 R_{y>C} &= 1 \text{ при } y_{min} > C_{max}.
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

Проиллюстрируем технику оценки риска на примере показателя срока окупаемости проекта (*DPP*) энергоблока ВВЭР-1000 по реальным интервальным ТЭП. Проведенный расчет показал, что в выбранных диапазонах изменения ТЭП интервальное значение срока окупаемости составило [14; 58] лет. Отрицательным результатом проекта считается ситуация, при которой срок окупаемости проекта (*DPP*) превышает интервальный порог [15; 20] лет. Применяя формулу (2.41) при $[y]=[14; 58]$ и $[C]=[15; 20]$ получаем значение риска $R=0,92$. Такое значение является неприемлемым риском.

Расчет показателей экономической эффективности и рисков проектов во многом упрощается, если известны многофакторные модели показателей экономической эффективности.

2.5. Построение многофакторных моделей показателей эффективности по данным вычислительного эксперимента

Рассмотренные во второй главе модели показателей, основанные на использовании формулы суммы геометрической прогрессии и замене суммы интегралом, позволили решить важную задачу определения допустимой области изменения ТЭП, в которой оценка эффективности проекта может быть сделана на основе всего двух экстремальных наборов ТЭП. Однако, эти нелинейные модели, несмотря на все их достоинства, являются достаточно

сложными для анализа эффективности проектов при одновременном изменении нескольких переменных. Очевидно, что в этом случае наиболее предпочтительными являются линейные или полиномиальные многофакторные модели.

В главе предлагается новый подход к построению приближенных линейных и полиномиальных моделей, описывающих зависимость показателей эффективности от неточных ТЭП в допустимой области их изменения, где выполняется условие монотонности.

Алгоритм оптимального вычислительного эксперимента для построения многофакторных моделей показателей

Предлагаемый подход к построению многофакторных моделей разработан на основе теории оптимального эксперимента, методе наименьших квадратов и регрессионном анализе [80÷83].

Теория оптимального эксперимента [80, 81] разработана в период с 1960-1985 Дж.Боксом, В.В.Налимовым, В.Г.Горским, В.В.Федоровым и др. для построения моделей объектов и систем по экспериментальным данным со случайными ошибками измерений.

Основным объектом исследования в этой теории является оптимальная матрица планирования эксперимента X_3 , зависящая как от структуры искомой модели, так и статистических свойств ошибок измерения в эксперименте.

Показано, что для линейных моделей оптимальным планом является двухуровневый, симметричный план полного факторного эксперимента (ПФЭ). В случае m -переменных матрица X_3 ПФЭ содержит m столбцов и $N=2^m$, т.е. имеет размерность $(2^m \times m)$. Строки матрицы X_3 в теории эксперимента называются «опытами». Матрица ПФЭ ортогональна, т.е. $X_3^T X_3 = N \cdot I$, где I - единичная $(m \times m)$ матрица.

В матрице ПФЭ все переменные варьируются всего на двух уровнях, которые соответствуют минимальному и максимальному значениям переменных.

Обычно матрицу ПФЭ записывают через нормированные значения переменных, когда -1 означает минимальное значение, а $+1$ максимальное значение переменной x_i . Для двух переменных x_1 и x_2 матрица ПФЭ имеет следующий вид:

$$X_{\mathcal{E}} = \begin{matrix} & x_1 & x_2 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} . \quad (2.42)$$

Переход от абсолютных значений x_i к их нормированным значениям осуществляется по формуле:

$$x_{i(n)} = (x - x_{\text{сред}}) / \Delta_x, \quad (2.43)$$

где $x_{\text{сред}} = 0,5 \cdot (x_{\text{max}} + x_{\text{min}})$ означает среднее значение переменной x , а $\Delta_x = 0,5 \cdot (x_{i(\text{max})} - x_{i(\text{min})})$ – ее полуразмах от среднего значения. В соответствии с формулой (2.43) значению $x_{i(\text{max})}$ соответствует нормированное значение 1 , а значению $x_{i(\text{min})}$ – -1 .

В теории оптимального эксперимента, связанного с планированием и обработкой статистических данных, доказано, что если эксперимент проведен в области Γ в соответствии, МНК-оценки коэффициентов модели b_i , полученных после реализации оптимального плана, имеют минимальные погрешности по сравнению с любым другим, неоптимальным экспериментом.

В ряде случаев, когда вид модели точно неизвестен и необходимо проверить отклонение построенной модели от линейности, в матрицу ПФЭ добавляют «лишнюю» строку со средними, «базовыми» значениями переменных, которые в нормированном виде принимают нулевые значения, т.е. $x_{(\text{сред})\text{норм}} = 0$.

Если заранее известно, что зависимость описывается линейной моделью, то вместо ПФЭ можно использовать матрицу дробного факторного эксперимента (ДФЭ). При этом дополнительные столбцы образуются как

произведение исходных столбцов. Например, если линейная модель включает три переменных, матрица ДФЭ имеет вид:

$$X_{ДФЭ} = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} . \quad (2.44)$$

Для полиномиальных моделей используются трехуровневые планы второго порядка, описанные в литературе [81].

Алгоритм построения многофакторных полиномиальных моделей включает следующие этапы:

1. Выбор вида модели. Как правило, в допустимой области Ω изменения ТЭП достаточно высокую точность приближения обеспечивают квадратичные полиномиальные модели вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_i + \sum_{i,j} b_k \cdot x_j \cdot x_i + \sum_{l=1}^m b_l \cdot x_l^2, \quad \vec{X} \in \Omega, \quad (2.45)$$

где y – оцениваемый результат, x_i ($i = 1 \dots m$) – варьируемые ТЭП, \vec{X} – вектор варьируемые ТЭП x_i ; Ω - допустимая область изменения ТЭП, в которых выполняется условие монотонности многофакторных функций, описывающих зависимость показателей от выбранных ТЭП; b_i, b_k, b_l – коэффициенты модели.

Во многих случаях достаточную точность приближения обеспечивают линейные модели.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_i . \quad (2.46)$$

2. Определение области планирования Ω . Применительно к рассматриваемой задаче оценки эффективности инвестиционных проектов энергоблоков область планирования для варьируемых ТЭП задается в виде прямоугольной гиперпризмы $\Gamma = \{x_{i(\min)} \leq x_i \leq x_{i(\max)}, i = 1 \dots m\}$ в пространстве R^m , вписанной в допустимую область Ω , в которой выполняются условия монотонности.

3. Выбор оптимального плана вычислительного эксперимента

Матрица плана вычислительного эксперимента $X_{\mathcal{E}}$ в заданной области планирования $\Gamma = \{x_{i(\min)} \leq x_i \leq x_{i(\max)}, i = 1 \dots m\}$ формируется в соответствии с теорией оптимального эксперимента [81].

4. Проведение вычислительного эксперимента. Эта процедура включает компьютерный расчет показателя эффективности y для каждой комбинации ТЭП (т.е. переменных x_i), которые определяются строками матрицы $X_{\mathcal{E}}$ (ПФЭ,ДФЭ или план второго порядка). Результатом расчета показателей эффективности в N «опытах» вычислительного эксперимента является вектор Y размерностью $(N \times 1)$.

5. Оценка коэффициентов многофакторной модели. Расчет проводится с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Для линейной модели расчет проводится по формуле:

$$\hat{B} = (F^T \cdot F)^{-1} \cdot (F^T \cdot Y), \quad (2.47)$$

где $\hat{B} = (b_0; b_1; \dots; b_m)^T$ - вектор столбец оценок коэффициентов b_i ; $Y^T = (y_1, \dots, y_N)$ - вектор-столбец рассчитанных значений показателя экономической эффективности в N «опытах» вычислительного эксперимента;

$F = [1, X]$ - $[N \times (m+1)]$ матрица, включающая вектор-столбец, составленный из единиц, и матрицу $X_{\mathcal{E}}$ полного факторного эксперимента.

В случае полиномиальной модели (2.45) матрица F включает также дополнительные базисные функции, образованные произведениями и квадратами переменных.

При нахождении оценок коэффициентов b_i и предварительной оценки точности модели могут быть использованы типовые пакеты регрессионного анализа, в частности, пакет, реализованный в среде Excel Microsoft Office.

6. Оценка точности многофакторной модели. В регрессионном анализе [83] для оценки точности модели обычно используется коэффициент детерминации R^2 , который находится по формуле:

$$R^2 = 1 - S^2/S_y^2, \quad (2.48)$$

где $S^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - m - 1)$ – стандартная ошибка предсказания S (СКО), y_i – рассчитанные точные значения показателя, \hat{y}_i – предсказанные по модели значения показателя y ; N – число «опытов»; m – число переменных в модели; S_y^2 – оценка дисперсии значений y_i относительно их среднего значения. В рамках статистического подхода построенная модель тем точнее, чем ближе ее коэффициент детерминации к единице. Модель обычно считается неадекватной для описания статистических данных, если $R < 0.86$.

С учетом специфики вычислительного эксперимента, который исключает наличие случайной составляющей, приведенные выше статистические показатели точности модели полезны лишь на стадии предварительной оценки точности модели и проверки значимости коэффициентов.

Однако наиболее объективными показателями точности модели, полученной по данным вычислительного эксперимента, являются максимальная абсолютная Δ_{\max} и относительная δ_{\max} ошибки предсказания, которые находятся по формулам:

$$\Delta_{\max} = \max |y_i - \hat{y}_i|, \quad \delta_{\max} = \max |(y_i - \hat{y}_i) / y_i|, \quad i=1 \dots N. \quad (2.49)$$

7. «Управляемое» изменение точности многофакторной модели. В рамках предлагаемого метода возможно два подхода к «управляемому» изменению точности многофакторной модели:

1. повышение точности модели в заданной точке;
2. обеспечение требуемой точности модели на всем диапазоне путем сужения диапазонов изменения переменных.

1) **Повышение точности модели в заданной точке** реализуется в соответствии со следующим алгоритмом:

- По результатам анализа вектора Y определяется строка плана x_w (вектор), в которой результат y_w имеет максимальную абсолютную или относительную ошибку предсказания.

- Без проведения дополнительных расчетов несколько одинаковых строк $[x_w, y_w]$ добавляется к матрице $[X_0; Y]$.
- Реализуются этапы 5 и 6 с вновь сформированной матрицей. При этом ошибка прогноза в выбранной точке уменьшится, но произойдет увеличение ошибок в других точках плана. Этот эффект будет тем значительнее, чем больше одинаковых строк добавляется к матрице $[X_0; Y]$. При выборе необходимого числа добавленных строк необходима экспертная оценка результата, т.к. известно, что при наличии в матрице X_0 большого числа одинаковых строк информационная матрица Фишера $(F^T \cdot F)$ в формуле (2.47) может стать плохо обусловленной, что резко увеличивает влияние ошибок округления на результат.

2) Обеспечение требуемой точности модели. В этом случае исследователь априори задает требуемую точность модели в форме порогового значения абсолютной ошибки $\Delta_{\text{пор}}$ и необходимо определить новые диапазоны изменения переменных $x_{i(\min)} \leq x_i \leq x_{i(\max)}$, при которых выполняется условие $\Delta_{\text{max}} \leq \Delta_{\text{пор}}$. Задача актуальна во многих экономических и технических приложениях.

При наличии линейной модели задача решается с помощью интервальных операций. Поясним методику решения на простом примере. Пусть получена линейная модель с m переменными:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_i \cdot x_i + \dots + b_m \cdot x_m. \quad (2.50)$$

Обозначим средние значения переменных и результата в вычислительном эксперименте соответственно как \bar{x}_i, \bar{y} . Тогда задачу можно сформулировать в следующем виде: определить такие допустимые отклонения Δ_i переменных от средних значений, при которых $\Delta_y = \Delta_{\text{пор}}$. Задача может быть записана в виде линейного уравнения с m неизвестными Δ_i :

$$\Delta_{\text{пор}} = |b_1| \cdot \Delta_1 + |b_2| \cdot \Delta_2 + \dots + |b_m| \cdot \Delta_m. \quad (2.51)$$

Т.к. линейное уравнение (2.51) имеет бесчисленное множество решений, всегда можно подобрать необходимый набор допустимых отклонений Δ_i .

Тестовый пример сравнения результатов при оптимальном планировании и планировании по методу Монте-Карло

Ниже предлагаемый подход иллюстрируется на численном примере и проводится его сравнение с существующим подходом организации вычислительного эксперимента с использованием метода Монте-Карло [84].

В качестве тестовой рассмотрим сравнительно простую задачу решения системы линейных уравнений $X \cdot Y = B$. Хотя эта задача не имеет прямого отношения к оценке показателей эффективности, на ее примере можно достаточно просто оценить как эффект нелинейности, так и провести сравнение оптимального планирования и планирования по методу Монте-Карло.

В качестве тестового примера была выбрана линейная система уравнений с двумя неизвестными y_1 и y_2 . Система с частью известных исходных данных имеет вид:

$$X \cdot Y = B \Rightarrow \begin{vmatrix} x_1 & 0,4 \\ 0,2 & x_2 \end{vmatrix} \cdot Y = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 & 0,4 \\ 0,2 & x_2 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \end{vmatrix} \quad (2.52)$$

Предполагается, что элементы вектора B заданы точно, а элементы x_1 и x_2 матрицы X могут варьироваться. Задача состоит в том, чтобы найти зависимость y_2 от элементов x_1 и x_2 .

Точное решение y_2 системы (2.52), найденное путем обращения матрицы X , имеет вид:

$$y_2 = \frac{2 \cdot x_1 - 0,2}{x_1 \cdot x_2 - 0,08} \quad (2.53)$$

Предположим, что зависимость (2.53) неизвестна исследователю, однако при любом фиксированном наборе элементов матриц X и B он может найти численное значение y_2 с использованием программ обращения матриц (например, в Microsoft Excel).

В этом случае зависимость решения y_2 от элементов x_1 и x_2 необходимо найти по результатам вычислительного эксперимента, который порождает множество значений y_{2i} , соответствующих паре $\{x_{1i}; x_{2i}\}$, $i=1 \dots N$.

В тестовом примере были выбраны следующие диапазоны изменения переменных: $0,3 \leq x_1 \leq 0,5$, $0,5 \leq x_2 \leq 0,7$.

Многофакторная модель зависимости решения y_2 от двух выбранных переменных искалась в форме полного полинома второго порядка:

$$y_2 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2, \quad (2.54)$$

Задача решалась при двух планах вычислительного эксперимента, включая:

- оптимальный трехуровневый симметричный план (9 точек);
- план, сгенерированный методом Монте-Карло (100 точек).

Точки обоих планов в области планирования показаны на рис. 2.6.

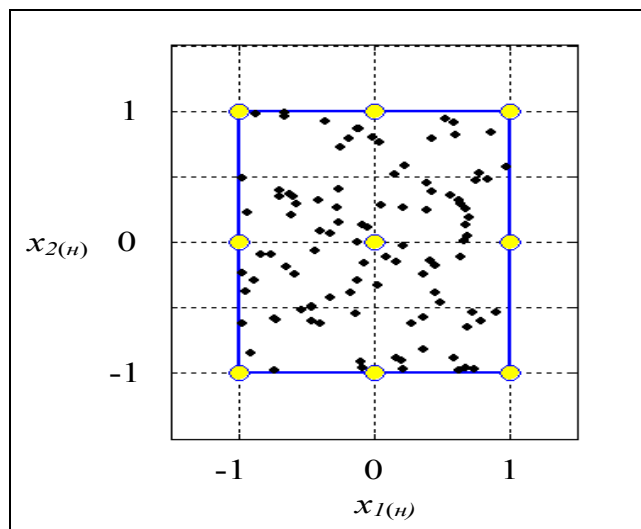


Рис.2.6. Точки планов эксперимента.

На рис. 2.6 сплошными линиями выделена область планирования (квадрат) в плоскости нормированных переменных $x_{1(n)}$; $x_{2(n)}$; круглыми маркерами отмечены 9 точек оптимального плана; 100 точек плана, сгенерированных методом Монте-Карло, имеют вид черных ромбов. При генерации случайных точек предполагалось, что переменные x_1 и x_2 являются независимыми и имеют равномерное распределение в заданных диапазонах – $-1 \leq x_{1(n)} \leq 1$, $-1 \leq x_{2(n)} \leq 1$.

В каждой точке $\{x_{1i}, x_{2i}\}$, приведенных планов были рассчитаны значения y_{2i} .

Результаты расчетов по оптимальному плану представлены в табл. 15.

Таблица 15.

Точки оптимального плана и значения y_2

№	Переменные	Номера и координаты точек оптимального плана								
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
1	$x_{1(n)}$	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
2	$x_{2(n)}$	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
3	x_1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
4	x_2	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7
5	y_2	5,71	4,00	3,08	5,00	3,75	3,00	4,71	3,64	2,96

В первой и второй строках табл. 15 приведены нормированные значения варьируемых переменных $x_{1(n)}$, $x_{2(n)}$; в точках оптимального, плана, а в третьей и четвертой строках - абсолютные значения этих переменных.

В пятой строке приведены точные значения решения y_2 , найденные по формуле (2.53).

Модели зависимости y_2 от переменных x_1 и x_2 , рассчитанные с помощью метода наименьших квадратов по точкам оптимального плана и плана Монте-Карло, имеют вид:

$$y_{2(\text{опт.план})} = 28,18 - 23,85 \cdot x_1 - 53,32 \cdot x_2 + 22,36 \cdot x_1 \cdot x_2 + 9,94 \cdot x_1^2 + 28,12 \cdot x_2^2 \quad (2.55)$$

$$y_{2(\text{М-К план})} = 25,87 - 19,97 \cdot x_1 - 49,16 \cdot x_2 + 19,46 \cdot x_1 \cdot x_2 + 7,92 \cdot x_1^2 + 26,16 \cdot x_2^2 \quad (2.56)$$

Точность моделей оценивалась, как путем расчета максимальной абсолютной Δ_{\max} и относительной δ_{\max} ошибок предсказания по формуле (2.49), так и с помощью статистических показателей.

На рис. 2.7 представлены значения относительных ошибок δ_i предсказания моделей (2.55) и (2.56) в 9-ти точках оптимального плана, координаты которых представлены в табл. 14.

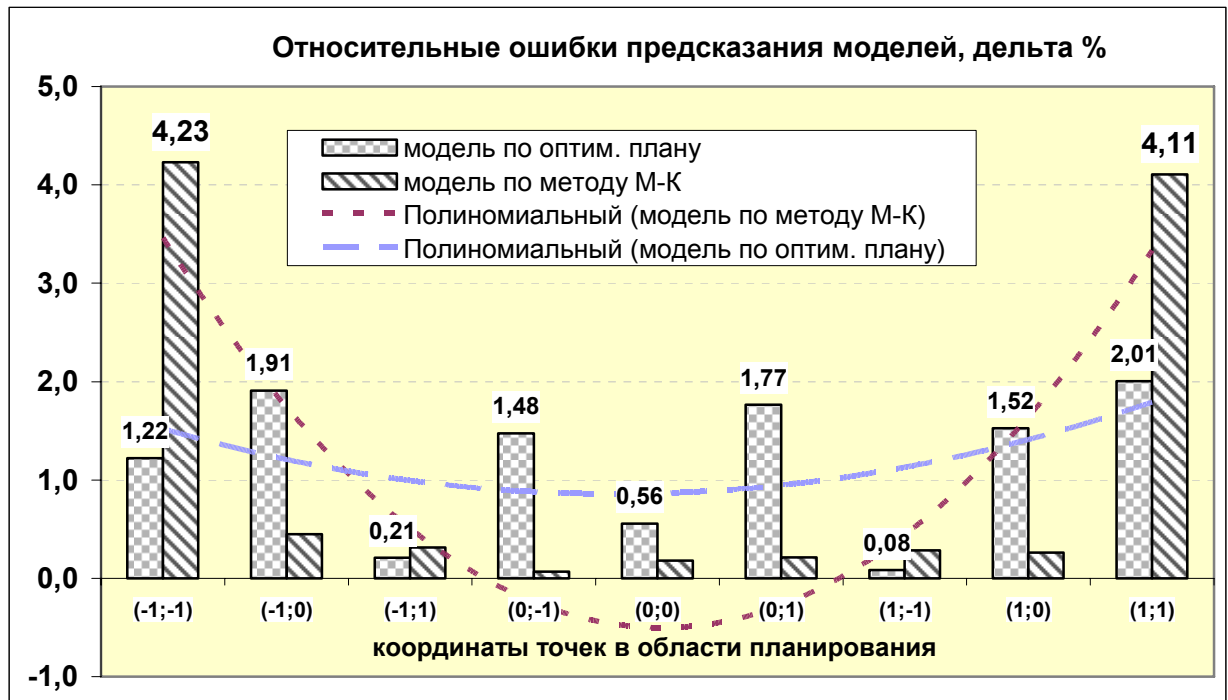


Рис. 2.7. Относительные ошибки предсказания моделей по точкам оптимального плана и плана Монте-Карло

На рис. 2.7 по оси абсцисс показаны координаты точек, в которых рассчитывались относительные ошибки δ_i предсказания моделей в %. Значения ошибок показаны в виде столбцов, имеющих различную штриховку в зависимости от используемой модели. Пунктирными линиями показаны аппроксимирующие кривые значений ошибок, найденные с использованием опции «добавить линию тренда» в Microsoft Excel.

Из рисунка следует, что точность предсказания по модели (2.56) выше, чем у модели (2.55) в окрестности центральной точки $x_{1(n)}=0$; $x_{2(n)}=0$ области планирования. Однако относительная ошибка предсказания по модели (2.56) резко возрастает в угловых точках области планирования.

В сводной табл. 16 для обеих моделей приведены значения максимальных ошибок предсказания Δ_{\max} и δ_{\max} , рассчитанных по формуле (2.49), а также значение коэффициента детерминации.

Сравнение показателей точности моделей

Показатели точности	Модель по оптимальному плану (9 точек)	Модель по плану Монте-Карло (100 точек)	Предпочтение
Δ_{\max}	0,076	0,242	+
$\delta_{\max. \%}$	1,9	4,2	+
R	0,998	0,999	-

В последнем столбце табл. 16 приводится кодировка предпочтения модели по точности: + означает, что модель лучше, – что модель хуже по соответствующему показателю точности.

Сравнение результатов обработки данных двух вычислительных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

1. Хотя зависимость (2.53) решения y_2 от переменных является существенно нелинейной, ее приближение полиномиальной моделью второго порядка является достаточно точным. (Максимальные относительные ошибки составили: $\delta_{\max}=1,9\%$ при оптимальном плане, $\delta_{\max}=4,2\%$ при плане Монте-Карло).

2. Число точек плана Монте-Карло более чем в 10 раз превышает число точек оптимального плана. Однако максимальные ошибки предсказания по модели Монте-Карло более чем в 3 раза превышают ошибки по модели оптимального плана. Это свидетельство неэффективности плана Монте-Карло и нецелесообразности его использования при построении многофакторных моделей.

3. Коэффициент множественной корреляции R , обычно применяемый для статистических моделей, не отражает реальную точность модели, построенной по данным вычислительного эксперимента при отсутствии случайных ошибок. В данном примере он составил: для модели Монте-Карло $R=0,999$; для модели оптимального плана $R=0,998$, т.е. модель Монте-Карло имеет преимущество по этому показателю. При ориентации только на значение R , нужно было бы предпочесть модель Монте-Карло, а не

модель оптимального плана, что с учетом результатов сравнения в табл. 15 является ошибочным выбором. Имеется простое объяснение этого «феномена». Как видно из рис. 2.6, точки плана Монте-Карло сосредоточены в основном вокруг центральной точки области планирования. При этом существенно увеличивается вес центральных точек, что равносильно сужению области планирования по сравнению с оптимальным планом. Если бы при генерации случайных чисел было выбрано не равномерное, а нормальное распределение негативный эффект стал бы еще более существенным.

Повышение точности модели (2.55) в наихудшей точке.

В табл. 17 приведены значения абсолютных ошибок предсказания по модели (2.55) в 9-ти точках оптимального плана.

Таблица 17.

Значения абсолютных ошибок предсказания по модели (2.55)

№	Переменные	Номера и координаты точек оптимального плана								
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
1	$x_{1(n)}$	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
2	$x_{2(n)}$	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
3	x_1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
4	x_2	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7
5	Δ	0,070	0,076	0,006	0,074	0,021	0,053	0,004	0,055	0,059

Нетрудно видеть, что в точке №2 с координатами [0,3; 0,6] имеет место максимальная ошибка предсказания ($\Delta=0,076$).

Ниже приведено решение задачи повышения точности модели (2.55) в этой «наихудшей» точке плана с наибольшей абсолютной ошибкой прогноза.

Для повышения точности модели в матрице исходных данных для расчетов по методу наименьших квадратов строка в точке №2 была продублирована 3 раза. При этом матрица значений переменных x_1 и x_2 и вектор значений Y имеют следующий вид:

$$X_{\mathcal{D}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -1 & -1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 5.71 \\ 4.00 \\ 4.00 \\ 4.00 \\ 4.00 \\ 3.08 \\ 5.00 \\ 3.75 \\ 3.00 \\ 4.71 \\ 3.64 \\ 2.96 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Нетрудно заметить, что в матрице $X_{\mathcal{D}}$ и векторе Y имеются четыре строки с одинаковыми значениями. С использованием матрицы $X_{\mathcal{D}}$ и вектора Y были заново пересчитаны мнк-оценки коэффициентов модели, и абсолютные ошибки в точках исходного факторного эксперимента.

В табл. 18 представлены коэффициенты модели (2.55) без дублирования опытов и коэффициенты модели, полученные после дублирования.

Таблица 18.

Значения коэффициентов модели (2.55)

Переменные		x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	x_1^2	x_2^2
Коэффициенты	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Модель без дублирования	28,18	-23,85	-53,32	22,36	9,94	28,12
Модель с дублированием	28,91	-22,56	-56,76	22,36	8,51	30,98

Нетрудно заметить, что дублирование опытов привело к незначительному изменению коэффициентов. Более того, коэффициент b_3 в обеих моделях совпадает.

На рис. 2.8 показаны значения абсолютных ошибок в точках плана для моделей без дублирования и с дублированием опыта.

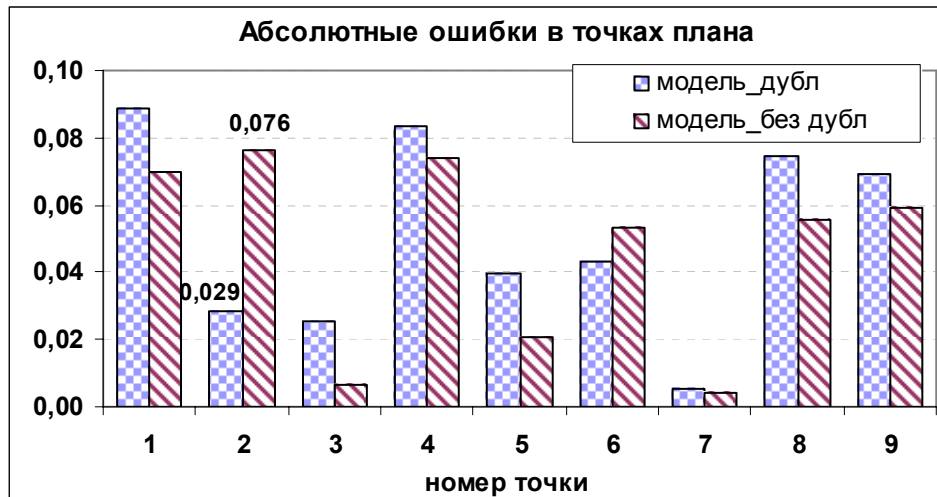


Рис. 2.8. Абсолютные ошибки прогноза по планам без дублирования и с дублированием точки №2.

Значения ошибок на рис. 2.8 показаны в виде столбцов, имеющих различную штриховку в зависимости от используемой модели. Как видно, трехкратное дублирование в точке №2 позволило уменьшить значение ошибки в этой точке с 0,076 до 0,029, т.е. более чем в 2 раза. (Относительная ошибка при этом уменьшилась с 1,9% до 0,7%). Вместе с тем, как и ожидалось, произошло некоторое увеличение ошибок в других точках.

2.6. Оценка чувствительности и рисков инвестиционного проекта с использованием многофакторных моделей

Очевидно, что наличие моделей показателей позволяет решать широкий круг задач, связанных с оценкой экономической эффективности проекта в условиях неопределенности значений выбранных переменных задачи. При решении задач целесообразно использование моделей с нормированными переменными, т.к. это упрощает как вычисления, так и трактовку результатов.

Ниже рассматривается ряд наиболее распространенных задач. Рассмотрим некоторые из них.

Прогноз значения показателя. Задача прогноз легко решается при наличии точных или приближенных многофакторных моделей $y=f(x_1...x_m)$,

описывающих зависимости показателей эффективности от выбранных переменных. Этим моделям для разных показателей эффективности представлены в разделе 2.3. Однако особенно просто прогноз осуществляется с помощью линейных или полиномиальных моделей, с известной погрешностью, рассмотренных в разделе 2.5.

В частности, пусть получена линейная многофакторная модель показателя для нормированных значений переменных $x_{i(n)}$

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_{i(n)}, \quad (2.58)$$

с известной ошибкой аппроксимации Δ . Пусть эксперт задал вектор числовых значений переменных $x_{i(n)}$ ($i=1\dots m$) внутри заданных диапазонов $[-1; 1]$. Тогда предсказанное значение показателя \hat{y} (в натуральных единицах) находится прямой постановкой значений переменных $x_{i(n)}$ в линейную модель (2.58). Интервал возможных значений показателя с учетом известной ошибки аппроксимации определяется по формуле

$$[y] = [\hat{y} - \Delta \leq y \leq \hat{y} + \Delta]. \quad (2.59)$$

Проиллюстрируем технику прогнозирования показателя срок окупаемости проекта (*DPP*) в задаче оценки эффективности инвестиционного проекта энергоблока ВВЭР-1000. При вычислении показателя варьировалось 5 ТЭП проекта, включая:

- тариф (цент/кВтч) – $x_1 = [2,5; 3,0]$;
- цена ядерного топлива, (долл. за кг. U) – $x_2 = [600; 1400]$;
- удельная стоимость строительства, (долл./кВт) – $x_3 = [1000; 1500]$;
- затраты на эксплуатацию, (млн. долл. в год) – $x_4 = [30; 50]$;
- норма дисконта, (%) – $x_5 = [5; 10]$.

Диапазоны изменения ТЭП проекта энергоблока соответствуют разбросу их значений в различных литературных источниках.

В качестве матрицы вычислительного эксперимента была выбрана матрица ПФЭ, содержащего $2^5=32$ точки с добавлением строки средних значений переменных.

В каждой точке плана были рассчитаны значения срока окупаемости проекта и найдены МНК-оценки коэффициентов модели. Результирующая модель с нормированными переменными имеет вид:

$$DPP = 36 - 9,75 \cdot x_{1(n)} + 1,17 \cdot x_{2(n)} + 4,00 \cdot x_{3(n)} + 1,33 \cdot x_{4(n)} + 5,75 \cdot x_{5(n)}, \quad (2.60)$$

где $x_{i(n)} = (x_i - x_{i(сред)}) / \Delta x_i$.

Максимальная абсолютная ошибка прогноза составила $\Delta_{\max} = 1,0$, т.е. ошибка прогноза срока окупаемости на всем диапазоне изменения ТЭП не превышает одного года. Учитывая, что срок окупаемости проектов ВВЭР составляет 15-20 лет, ошибка прогноза ± 1 год представляется достаточно маленькой.

Модель (2.60) позволяет легко прогнозировать значение срока окупаемости при любых значениях ТЭП внутри заданных интервалов ТЭП.

В частности, при средних значениях переменных, когда $x_{in} = 0 \forall i$, прогнозный срок окупаемости с учетом абсолютной ошибки прогноза равен первому коэффициенту модели (2.60), а именно:

$$DPP = b_0 = 36 \text{ лет} \pm 1.$$

Если все переменные принимают максимальные значения, т.е. $x_{in} = 1 \forall i$, срок окупаемости составляет $DPP = 39 \text{ лет} \pm 1$.

Анализ чувствительности.

Решение задачи анализа чувствительности при использовании моделей, описанных в разделе 2.2, связано с необходимостью вычислений их производных при разных значениях выбранной переменной. Как было показано выше, эти модели являются достаточно сложными нелинейными моделями. В связи с этим с учетом достаточно «узкой» допустимой области изменения переменных Ω задачу целесообразно решать с использованием линейных моделей с нормированными значениями переменных

$$y = b_0 + b_1 x_{1(n)} + b_2 x_{2(n)} + \dots + b_m x_{m(n)} \quad (2.61)$$

Учитывая, что нормированные переменные в модели (2.61) меняются в интервале от -1 до 1 и при среднем значении равны 0 , справедливы следующие свойства, полезные при анализе чувствительности:

- наиболее сильное влияние на показатель оказывает переменная x_j с наибольшим по абсолютной величине коэффициентом $|b_j| > |b_i|$ для любого i .
- Для линейной модели производная от y по нормированной переменной x_j равна значению коэффициента b_j . т.е.

$$\frac{dy}{dx_{i(n)}} = b_i. \quad (2.62a)$$

Знак и величина коэффициента b_i дают полную информацию о влиянии переменной x_j на показатель. Если $b_j > 0$, увеличение переменной $x_{j(n)}$ приводит к увеличению показателя, при $b_j < 0$ имеет место обратная ситуация.

- Записывая формулу (2.62a) через приращения, легко получить

$$\Delta y \cong b_i \cdot \Delta x_{i(n)}. \quad (2.62б)$$

Формула (2.62б) позволяет рассчитать изменение показателя y при изменении нормированной переменной $x_{i(n)}$ на любую заданную величину в пределах от -1 до $+1$ при условии, что остальные переменные зафиксированы на средних значениях, когда $x_{j(n)} = 0 \quad \forall j \neq i$.

Для иллюстрации описанного подхода проведем анализ чувствительности для модели (2.60) с нормированными переменными. Опираясь на приведенные выше свойства, легко получить, что наиболее сильное влияние на срок окупаемости проекта оказывает значение тарифа (переменная x_1).

Уменьшение тарифа с 2.75 цент/кВтч до 2.0 цент/кВтч, что соответствует изменению x_{1n} от 0 до -1 , срок окупаемости увеличивается с 36 до 46 лет. Наименьшее влияние на срок окупаемости оказывают переменные x_{2n} (цена ядерного топлива) и x_{4n} (затраты на эксплуатацию) с наименьшими

коэффициентами в модели (2.60). Изменение этих переменных с базового до максимального значения увеличивает срок окупаемости не более чем на 2 года.

Оценка рисков на основе приближенных линейных моделей

Пусть имеется аналитическая функция вида:

$$y = b_0 + b_1 x_{1(n)} + b_2 x_{2(n)} + \dots + b_m x_{m(n)}. \quad (2.63)$$

описывающая зависимость показателя эффективности y от m нормированных переменных ТЭП проекта $x_{i(n)}$, задан точечный или интервальный допустимый порог для показателя y . Необходимо найти оценку риска отрицательного результата. Очевидно, что для решения задачи необходимо найти интервальное значение показателя.

При наличии модели (2.63) с нормированными переменными $x_j = [-1; 1]$, границы показателя $[y] = [y_{min}; y_{max}]$ находятся по элементарным формулам:

$$y_{min} = b_0 - |b_1| - |b_2| - \dots - |b_m|, \quad (2.64a)$$

$$y_{max} = b_0 + |b_1| + |b_2| + \dots + |b_m|. \quad (2.64б)$$

После определения интервального показателя $[y] = [y_{min}; y_{max}]$ по формулам (2.64a) и (2.64б) расчет оценки риска проводится по формулам раздела 2.4.

Рассмотрим оценку риска по моделям на примере показателя NPV энергоблока ВВЭР-1000. По представленным выше интервальным данным была построена следующая модель с нормированными переменными:

$$NPV = -39,77 + 424,35 x_{1(n)} - 65,66 x_{2(n)} - 225,18 x_{3(n)} - 75,60 x_{4(n)} + 354,31 x_{5(n)}. \quad (2.65)$$

Минимальное и максимальное значения NPV , найденные по формулам (2.64) составили $NPV_{min} = -1184,8$ млн.долл.; $NPV_{max} = 1105,3$ млн.долл.

Известно, что отрицательный результат проекта по показателю NPV имеет место, если $NPV < 0$, т.е. допустимый (точечный) порог $C = 0$. Тогда с использованием формулы (2.36) получаем риск отрицательного результата проекта $R_{NPV < C} = 0,52$. В соответствии с международной градацией уровней риска (см. раздел 1.2) такое значение считается высоким.

Допустим, что порог задан в интервальном виде $[C]=[0; 100]$. Тогда риск отрицательного результата $R_{NPV < C} = 0,54$. Увеличение значения риска по сравнению с точечным значением порога вполне естественно, т.к. интервальный порог, включающий и положительное значение NPV , задает более «жесткое» условие.

Выводы к главе 2

С использованием аналитических формул найдены уравнения производных показателей эффективности по варьируемым ТЭП инвестиционного проекта энергоблока.

Проведен анализ монотонности функций изменения основных показателей эффективности, включая NPV , $ДЗ$ и $УДЗ$ и для каждого из перечисленных показателей определены допустимые области Ω изменения ТЭП инвестиционного проекта энергоблока, в которых знак соответствующих производных не меняется.

Допустимые области имеют вид следующих множеств:

$$\Omega_{NPV} = \{\lambda \geq 0.4; 1\% \leq d \leq 15\%; 3 \leq T_1 \leq 7\},$$

$$\Omega_{УДЗ} = \{\text{любые значения } C_{\text{кап}}, C_{\text{топ}}, C_{\text{эксп}}, d; 3 \leq T_1 \leq 7\},$$

$$\Omega_{ДЗ} = \{\text{любые значения } C_{\text{кап}}, C_{\text{топ}}, C_{\text{эксп}}, d; 3 \leq T_1 \leq 7\}.$$

Показано, что для показателей $ДЗ$ и $УДЗ$ монотонность сохраняется при широких интервалах неопределенности ТЭП инвестиционного проекта. Для показателя NPV условия монотонности выполняются в сравнительно узкой области изменения параметра λ (отношение ежегодной прибыли к ежегодным капитальным вложениям) и нормы дисконта d .

Найденные допустимые области позволили для всех показателей сформировать два экстремальных набора (оптимистический и пессимистический), которые обеспечивают расчет интервальных показателей эффективности.

При изменении ТЭП в найденных допустимых границах интервальные значения показателей эффективности могут быть определены по результатам двух экстремальных наборов.

С использованием теории оптимального эксперимента и метода наименьших квадратов разработан алгоритм построения многофакторных моделей показателей эффективности инвестиционных проектов по данным вычислительного эксперимента. Учитывая монотонность изменения показателей от ТЭП, многофакторные модели определяются в классе линейных или полиномиальных функций.

С использованием имитационного моделирования на тестовом примере показано преимущество оптимального планирования вычислительного эксперимента по сравнению с методом генерации случайных наборов переменных методом Монте-Карло, как в части экономии числа экспериментов, так и по точности получаемых моделей. Приближенные многофакторные модели существенно упрощают анализ чувствительности показателей к изменению ТЭП, решение задач прогнозирования показателей эффективности при неточно заданных ТЭП проекта.

Разработаны два алгоритма оценки экономических рисков инвестиционных проектов: по интервальным значениям показателей и на основе приближенных многофакторных моделей. Алгоритмы оценивать риск, как при точечном, так и при интервальном значении допустимого порога, определяющего отрицательный результат по проекту.

Глава 3. Оценка эффективности инвестиционного проекта АЭС с реакторной установкой ВВЭР – 1000 и его сравнение с проектами ТЭС на газе и угле

В данной главе приведены результаты численной оценки экономической эффективности реальных проектов АЭС и ТЭС, полученные с помощью разработанных инструментальных средств.

Пакет включает три программы:

1. «Интервал-Инвест»
2. «Энерго-Инвест»
3. «Модели ПФЭ».

Программа «Интервал-Инвест» позволяет на основе интервально заданных ТЭП рассчитать интервальные показатели экономической эффективности энергоблоков АЭС при разных схемах финансирования, включая собственные и кредитные средства.

Программа «Энерго-Инвест» предназначена для сравнения экономической эффективности генерирующих мощностей разного типа, включая АЭС и ТЭС на органическом топливе. Программа позволяет наряду с известными показателями эффективности UNIDO оценить эффект замещения одного топлива другим при выборе одного из двух альтернативных проектов.

Программа «Модели ПФЭ» по данным полного факторного вычислительного эксперимента с помощью метода наименьших квадратов позволяет рассчитать коэффициенты многофакторных моделей показателей экономической эффективности инвестиционного проекта.

Во всех приведенных выше программах реализуется общая концепция моделирования [85], основанная на динамическом обмене данными между универсальным математическим пакетом Матлаб (версия 5.2 и выше) и

известным приложением Microsoft Excel в соответствии со схемой, приведенной на рис.3.1.



Рис.3.1. Схема моделирования и расчетов

Динамическая связь между программами Матлаб и Excel позволяет объединить мощные вычислительные ресурсы Матлаб и простоту, удобство и развитые графические средства программы Microsoft Excel, хорошо известной обычным пользователям. При этом пользователь работает в привычной среде Excel и от него не требуется знание пакета Матлаб.

Для установки динамической связи между программами Матлаб и Excel в пакет Матлаб включена программа Excel Link, которая позволяет объединить мощные вычислительные ресурсы Матлаб и простоту, удобство и развитые графические средства программы Microsoft Excel, хорошо известной обычным пользователям. Excel Link обеспечивает синхронизацию и обмен данными между двумя вычислительными средами. При этом пользователь работает в привычной для себя среде Excel и от него не требуется знание пакета Матлаб.

При наличии на компьютере установленного пакета Матлаб для установки Excel Link необходимо:

- 1) запустить Microsoft Excel;
- 2) в окне "сервис" выбрать опцию "надстройки" и нажать "обзор";
- 3) в появившемся окне найти и выбрать файл EXLLINK.XLA в директории C:\MATLAB\EXLINK (или указать Ваш путь) и нажать ОК;

- 4) вернуться в окно "настройки" и убедившись в появлении Excel Link для связи с Матлаб, нажать ОК. После этого связь Microsoft Excel и Матлаб будет устанавливаться автоматически при каждом запуске Microsoft Excel;
- 5) убедиться, что на панели управления появилась икона MATLAB, а в рабочем окне Excel появились три кнопки с надписями: putmatrix (послать матрицу в Матлаб), getmatrix (получить матрицу из Матлаб) и evalstring (оценить выражение в строке).
- 6) совместная программа Матлаб и Microsoft Excel готова к работе.

3.1. Описание разработанного пакета программ

Ниже приводится описание программ, входящих в разработанный пакет.

3.1.1. Описание программы «Интервал-Инвест» для оценки эффективности инвестиционного проекта АЭС по интервальным данным

Для оценки эффективности инвестиционных проектов АЭС была разработана программа «Интервал-Инвест», в которой реализована концепция, основанная на интервальной модели описания неопределенности и рисков.

Ввод данных пользователь осуществляет в среде Microsoft Excel. Исходные данные разбиты на три блока:

1. Внешние параметры условий реализации: тариф на электроэнергию, КИУМ, норма дисконта, ставка налога с прибыли.
2. Условия внешнего кредитования: доля в общих капиталовложениях (нулевая при финансировании из собственных средств), срок возврата кредита, процентная ставка кредита.
3. Технико-экономические параметры АЭС: установленная электрическая мощность, срок строительства, срок службы, капитальные вложения в строительство, ежегодные затраты на эксплуатацию и ремонт, ежегодные затраты на топливо.

Формат ввода исходных данных на пользовательской книге Microsoft Excel изображен на рис. 3.2.

Входные данные проекта		Вести файл "scenario"			
Выделить и ввести файл data	Минимум	Максимум	Пессим.	Базовый	Оптим.
Интервальные значения параметров (мин.- макс.)					
Внешние параметры условий реализации					
Тариф на электроэнергию с шин АЭС (цент./Квт.ч)	2,50	3,00	2,5	2,75	3
Цена ядерного топлива (долл. за кг. U)	600	1400	1400	1000	600
КИУМ	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Норма дисконта (%)	5	10	10	7,5	5
Момент приведения (год) - (общий для вариантов)	1	1	OK	1	1
Ставка налога с прибыли(%)	23	23	OK	23	23
Амортизация: учитывается -1; нет - 0 (общее условие)	0	0	OK	0	0
Внешнее кредитование: есть - 1, нет-0 (общее условие)	0	0	OK	0	0
Доля в общих капиталовложениях (%)	0	0	OK	0	0
Срок возврата кредита (лет)	0	0	OK	0	0
Процентная ставка кредита (%)	0	0	OK	0	0
ТЭП АЭС			OK	0	0
Устан.электр. мощность (МВт)-одинаковая	1068	1068	OK	1068	1068
Срок строительства Тс (лет)	5	7		7	6
Удельная стоимость строительства (долл./КВт)	1000	1500		1500	1250
Срок службы (лет) - одинаковый	40	40	OK	40	40
Постоянные расходы на экспл., ремонт. (млн.долл. в год)	30,00	50,00		50	40
Глубина выгорания топлива (МВт(т)сут./кг. U)	43,00	43,00		43	43
К.П.Д. установки	0,334	0,334		0,334	0,334
Расход эл. энергии на соб. нужды (% от ген. мощ.)	0	0		0	0
Капитальные вложения по годам (по вертикали) в %.	20,0	14,3	в млн.дол.	229	0
	20,0	14,3		229	223
	20,0	14,3		229	223
				229	214

Рис. 3.2. Формат ввода исходных данных и отображения экстремальных наборов в программе «Интервал-Инвест»

На данном листе книги пользователь в столбцах G и H пользователь вводит минимальные и максимальные значения технико-экономических параметров. Для фиксированных параметров минимальное и максимальное значения совпадают.

Кроме того, для оценки экономического риска, пользователь должен задать пороговое значение C_j показателей эффективности, а именно: верхнее предельное значение для тарифа безубыточности и нижние предельные значения для IRR и $ИДДЗ$ (для NPV по умолчанию оно принимается равными нулю).

После выделения введенных данных они экспортируются в MATLAB нажатием кнопки «putmatrix» в левом верхнем углу панели.

После расчетов всех показателей в пакете MATLAB результаты импортируются в книгу нажатием кнопки «getmatrix». Первым результатом расчетов является файл «scenario» (показан в столбцах J, K, L синим цветом), в котором записаны параметры пессимистического, базового и оптимистического наборов ТЭП (значения базового набора рассчитываются как среднее значений в пессимистическом и оптимистическом наборах).

Необходимо отметить, что на рис. 3.2 представлены наборы для расчета всех показателей эффективности, кроме *ДЗ*

Согласно исследованиям, представленным в главе 2, при формировании наборов ТЭП для показателя *ДЗ*, в пессимистическом наборе необходимо установить минимальную норму дисконта, а в оптимистическом – максимальную. Для всех остальных показателей, как показано на рис. 3.2 имеет место обратная ситуация. Этот факт был учтен при разработке программы.

Программа с помощью средств Excel позволяет отображать финансовые потоки в графическом виде. На рис. 3.3–3.4 приведены примеры графиков финансовых потоков, которые автоматически перестраиваются в Microsoft Excel при изменении исходных данных.

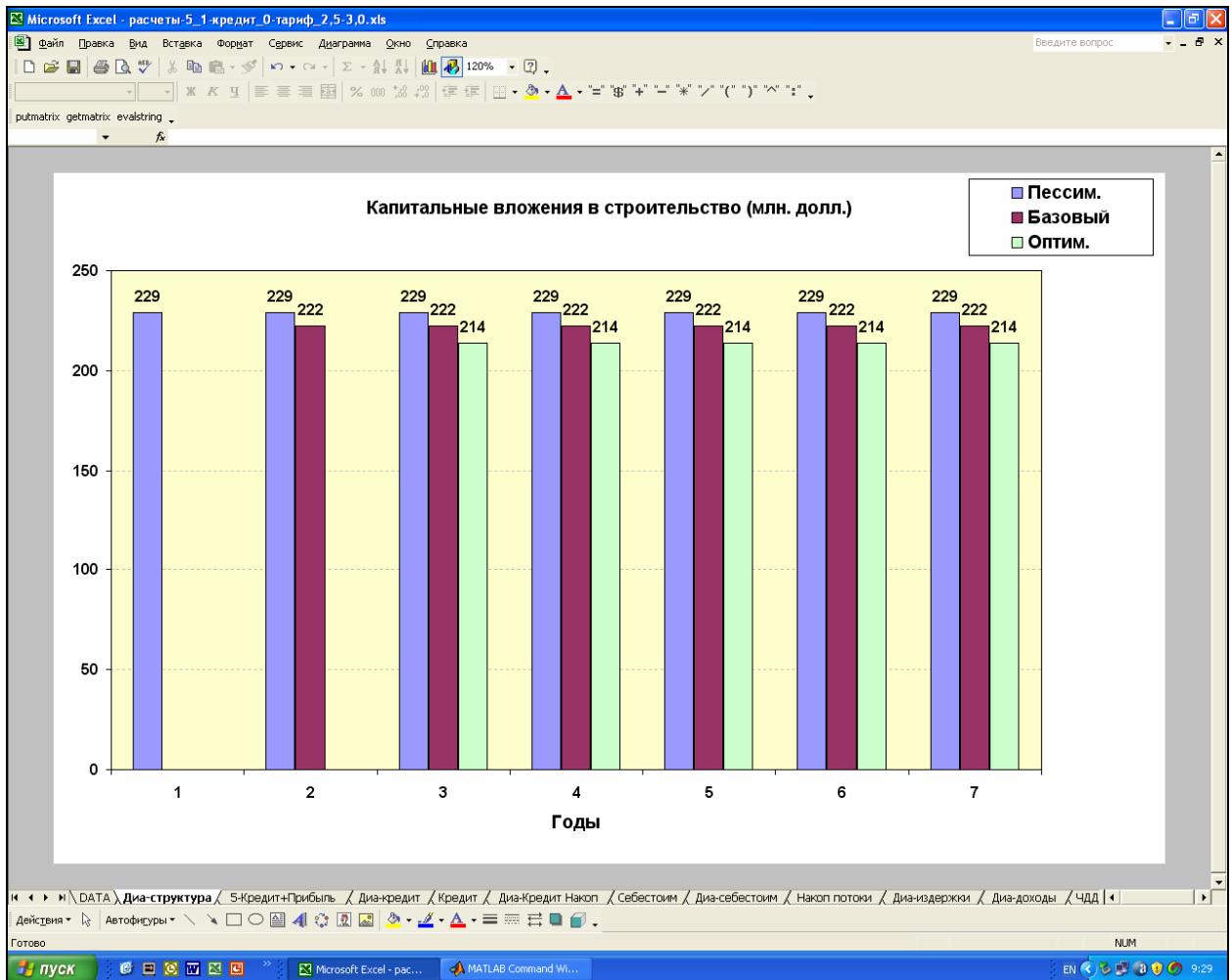


Рис. 3.3. Капитальные вложения в строительство

На рис. 3.3 в форме диаграмм изображены ежегодные капитальные вложения в строительство для трех наборов ТЭП – пессимистического, базового и оптимистического. В пессимистическом наборе срок строительства АЭС составляет 7 лет; ежегодные капитальные вложения – 229 млн.долл. В оптимистическом наборе срок строительства АЭС равен 5 лет; а ежегодные капитальные вложения – 214 млн.долл. Значения в базовом наборе есть полусумма соответствующих значений оптимистического и пессимистического набора ТЭП (срок строительства АЭС - 6 лет; ежегодные капитальные вложения – 222 млн.долл.).

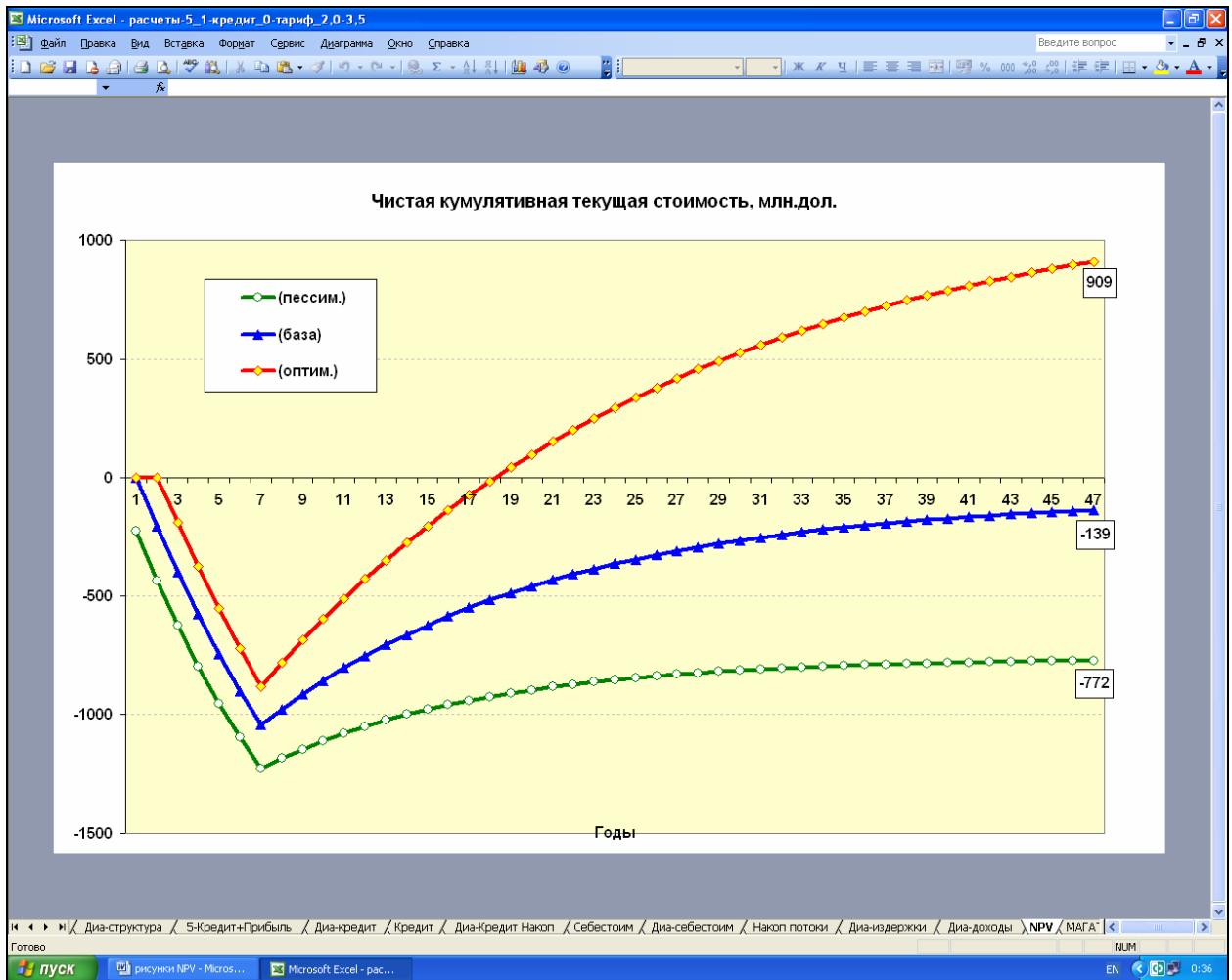


Рис. 3.4. Чистая кумулятивная текущая стоимость

На рис. 3.4 приведена «трубка» финансовых потоков по проекту (накопленным итогом) для трех заданных наборов (см. рис. 3.2)

На конце расчетного горизонта показаны значения показателя NPV для каждого набора, которые равны соответственно: -772 млн. долл. для пессимистического набора, -139 млн. долл., для базового набора и 909 млн. долл. для оптимистического. Учитывая, что выбранный диапазон изменения исходных данных удовлетворяет условию монотонности, интервальное значения показателя NPV записывается в виде $[-772; 909]$ млн. долл. при любой комбинации варьируемых переменных в заданных интервалах.

Пример отображения результатов оценки интервальных показателей экономической эффективности и рисков, рассчитанных в соответствии изложенным методом, приведен на рис. 3.5.

putmatrix getmatrix evalstring															
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
9	Вставить данные по критериям эффективности из пакета Матлаб. Для этого														
10	встать в ячейку I14, кликнуть на кнопке getmatrix и ввести имя файла kriterii														
11															
12	Критерии														
13	Показатели эффективности и доходности				Пессим.	Базовый	Оптимис.	Среднее	Пороги	Риск	Ущерб				
14	Чистая текущая стоимость NPV (млн.долл.)				-772	-139	909	68	0,00	0,46	-386,0				
15	Внутренняя норма доходности IRR (%)				3,0	6,0	10,0	6,50	20,00	1,00	0,0				
16	УДЗ МАГАТЭ (цент/кВт.ч.)				4,04	2,53	1,49	2,77	2,00	0,80	0,0				
17	Срок окупаемости недисконтированный (лет)				27	20	15								
18	Срок окупаемости дисконтированный DPP (лет)				0	0	19								
19	Недисконтированные затраты (млн.долл.)				4818	3804	2789								
20	Дисконтированные затраты ДЗ (млн.долл.)				1669	1548	1432								

Рис. 3.5. Интервальные показатели эффективности и значения рисков в программе «Интервал-Инвест»

На рисунке синим цветом выделен список показателей эффективности, желтым цветом отмечен блок интервальных значений показателей при различных наборах, заданные пользователем предельно-допустимые пороги по выбранным показателям, а также рассчитанные значения рисков для соответствующих показателей и ущерб.

3.1.2. Описание программы «Модели ПФЭ» для построения приближенных многофакторных моделей показателей эффективности

Для построения приближенных многофакторных моделей показателей эффективности разработана программа «Модели ПФЭ», которая является модификацией программы «Интервал-Инвест». На стадии подготовки исходных данных пользователем задаются диапазоны изменения m переменных ТЭП и $[N \times m]$ матрица $X_{\text{Э}}$ оптимального плана. (В зависимости от структуры выбранной модели используются матрицы ДФЭ, ПФЭ или матрица трехуровневого симметричного плана).

После этого пользователем реализуется следующая процедура:

1. В подготовленной книге пользователя Microsoft Excel записываются диапазоны изменения переменных ТЭП в эксперименте (матрица Q) и $[N \times m]$ матрица $X_{Э(норм)}$ с нормированными значениями переменных.
2. Матрицы Q и $X_{Э}$ экспортируются из книги пользователя Microsoft Excel в файл данных Матлаб, где имеется программа «Модели ПФЭ».
3. Программа «Модели ПФЭ» реализует следующие операции:
 - по введенным матрицам Q и $X_{Э(норм)}$ формирует $[N \times k]$ матрицу оптимального плана $X_{Э(абс)}$ с абсолютными значениями переменных;
 - для каждой строки матрицы $X_{Э(абс)}$ ($i=1 \dots N$) рассчитывает N значений j -го показателя эффективности ($j=1 \dots k$) для всех комбинаций ТЭП в матрицы $X_{Э(абс)}$. В результате формируется $[N \times k]$ матрица V значений показателей в точках плана эксперимента.
4. Матрица V экспортируется из Матлаба в книгу пользователя Microsoft Excel.
5. С использованием стандартных средств Microsoft Excel (*Пакет анализа* \rightarrow *Регрессия*) по заданным матрицам $X_{Э(норм)}$ и V вычисляются значения мнк-оценок многофакторных моделей для всех выбранных показателей.

На рис. 3.6 приведен пример представления исходных данных для построения линейной модели и результатов расчетов показателей эффективности Microsoft Excel.

Исходная матрица ПФЭ

	N	x1(H)	x2(H)	x3(H)	x4(H)	x5(H)
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1	-1
10	1	-1	-1	1	-1	-1
11	-1	1	1	1	-1	-1
12	1	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	1	1	1	1
19	-1	1	-1	-1	-1	1
20	1	1	1	-1	-1	1
21	-1	-1	-1	1	-1	1
22	1	-1	-1	-1	-1	1
23	-1	1	-1	-1	-1	1
24	1	1	1	-1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	-1	1
26	1	-1	-1	1	-1	1
27	-1	1	-1	1	-1	1
28	1	1	1	-1	-1	1
29	-1	-1	-1	1	-1	1
30	1	-1	-1	-1	1	1
31	-1	1	-1	-1	1	1
32	1	1	1	-1	1	1
33	0	0	0	0	0	0

Матрица V значений критериев (экспорт из Матлаб)

	NPV	УДЗ	DPP	ИДДЗ	IRR
1	164	1,51	34	1,3	6
2	1336	1,51	16	2,3	11,6
3	-17	1,74	не окуп	1,1	4,8
4	1154	1,74	17	2,0	10,8
5	-310	1,98	не окуп	1,0	3,5
6	861	1,98	22	1,8	8,2
7	-491	2,21	не окуп	0,9	2,6
8	680	2,21	25	1,6	7,6
9	-44	1,78	не окуп	1,1	4,7
10	1127	1,78	17	2,0	10,7
11	-226	2,01	не окуп	1,0	3,4
12	946	2,01	18	1,7	9,9
13	-519	2,25	не окуп	0,9	2,4
14	653	2,25	25	1,6	7,5
15	-700	2,48	не окуп	0,8	1,3
16	471	2,48	28	1,4	6,8
17	-353	2,45	не окуп	0,8	6
18	173	2,45	24	1,4	11,6
19	-434	2,68	не окуп	0,7	4,8
20	92	2,68	29	1,3	10,8
21	-779	3,38	не окуп	0,6	3,5
22	-253	3,38	не окуп	1,0	8,2
23	-861	3,62	не окуп	0,6	2,6
24	-335	3,62	не окуп	1,0	7,6
25	-447	2,71	не окуп	0,7	4,7
26	79	2,71	30	1,3	10,7
27	-528	2,95	не окуп	0,7	3,4
28	-2	2,95	не окуп	1,2	9,9
29	-873	3,65	не окуп	0,5	2,4
30	-347	3,65	не окуп	1,0	7,5
31	-955	3,88	не окуп	0,5	1,3
32	-429	3,88	не окуп	0,9	6,8
33	-145	2,53	не окуп	1,1	6,5

Рис. 3.6. Исходные данные для построения многофакторных моделей в программе «Модели ПФЭ»

Как видно из левого блока данных на рис. 3.6, в примере варьировалось 5 переменных параметров, включая тариф на электроэнергию, цену ядерного топлива, удельную стоимость строительства, затраты на эксплуатацию и норму дисконта. При этом матрица ПФЭ содержит 32 комбинации нормированных значений этих параметров и одну дополнительную точку, соответствующую их средним значениям (строка с нулевыми координатами).

В правом блоке данных на рис. 3.6 приведена матрица V значений 5-ти показателей эффективности, включая NPV , IRR , $УДЗ$ и срок окупаемости DPP , которая экспортируется из программы «Модели ПФЭ» (Матлаб).

Заключительным этапом процедуры расчетов является нахождение мнк-оценок коэффициентов линейных моделей соответствующих

показателей эффективности. Задача решается с использованием с использованием *Пакета анализа* Microsoft Excel (опция «Регрессия») на основе формулы (2.47). Формат представления результатов регрессионного анализа для показателя *УДЗ* приведен на рис. 3.7.

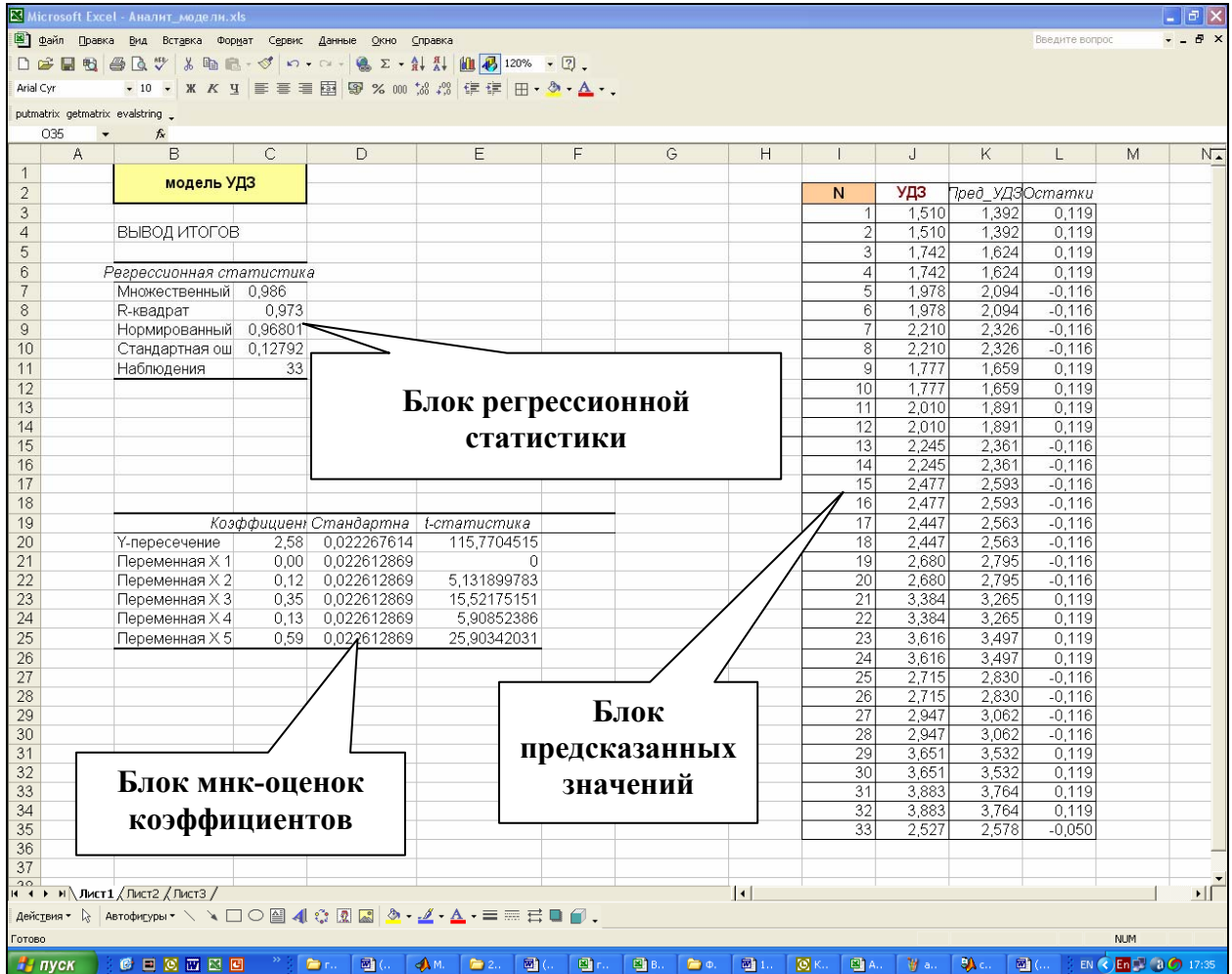


Рис. 3.7. Пример регрессионного анализа для показателя *УДЗ*

После запуска пакета «регрессия» Excel автоматически выводит в книгу всю информацию по выбранной регрессионной модели в виде трех блоков:

1. Мнк-оценки коэффициентов модели, их стандартные ошибки и значения критериев Стьюдента
2. Регрессионная статистика, включая коэффициент детерминации.
3. Предсказанные значения показателя в точках плана и ошибки предсказания (так называемые «остатки»).

3.1.3. Описание программы «Энерго-Инвест» для оценки сравнительной эффективности проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе

Программа «Энерго-Инвест» обеспечивает одновременное сравнение двух альтернативных проектов АЭС и ТЭС на основе укрупненных точечных технико-экономических показателей проектов электростанций.

Анализ проектов проводится в соответствии с методикой UNIDO по оценке экономической эффективности инвестиционных проектов. Кроме того, в программе дополнительно учитывается экономический эффект от замещения одного вида топлива другим при выборе одного из альтернативных проектов.

При этом для корректного сравнения проектов принимаются одинаковыми следующие значения ТЭП проектов: установленная мощность, КИУМ, тариф на электроэнергию, момент начала эксплуатации, норма дисконтирования, момент приведения разновременных затрат и размеры налогов.

Программа предназначена для экспресс-анализа и сравнительной оценки проектов энергоблоков на основе укрупненного перечня их точечных технико-экономических параметров (ТЭП), приведенного на рис. 3.8.

ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт управления, экономики и информации Росатома"

Энерго-Инвест- (Energy_Invest)

Сравнительный анализ эффективности двух альтернативных проектов в электроэнергетике

Базовые входные данные для расчетов	Проект 1	Проект 2
Условные имена сравниваемых проектов	АЭС	ТЭС на газе
Срок строительства T_{1c} (лет)	6	5 OK
Срок эксплуатации $T_{1э}$ (лет)	40	40 OK
Общий расчетный период, равный $T_{1c}+T_{1э}$ (лет)	46	46 OK
Установленная электр. мощность (МВт)	1000	1000 OK
Выработка электроэнергии с шин (ГВт.час/год)	7000	7000
Удельная стоимость строительства (долл./КВт)	1100	700
Тариф на отпускаемую электроэнергию (цент./Квт.ч)	2,5	2,5
Общий коэффициент дисконтирования (%)	10	10 OK
Момент приведения (2 варианта): а) 1 или б) T_{1c}	1	1 OK
Покупка энергии: есть -вести 1 1, нет- ввести 0 0.	0	0
Вложения в банк: есть -вести % на вклад, нет- ввести 0	0	0
Затраты на топливо (миллион долл./год)	15,0	72
Затраты на эксплуатацию (милл.долл./год)	42	50
Налог с прибыли (%)	23	23
Капитальные вложения по годам в % (по вертикали)	16,67	20,00 OK
Число вводимых элементов в столбцах G и H равно	16,67	20,00 OK
Число лет строительства соответствующего проекта	16,67	20,00

Рис. 3.8. Ввод исходных данных в программе «Энерго-Инвест»

Результаты расчетов в программе «Энерго-Инвест» представляются в виде таблицы, которая включает различные показатели эффективности. Помимо известных показателей экономической эффективности UNIDO, таких как NPV , IRR , DZ и показателя МАГАТЭ – $УДЗ$, программа позволяет рассчитать дополнительные показатели, оценивающие экономический эффект от замещения одного вида топлива другим. Среди них $ЧВ(З)$ – чистая выручка от продажи замещенного топлива и $ДВ(З)$ – дисконтированная выручка от продажи замещенного топлива.

Расчет дополнительных показателей основывался на следующем подходе. Для определенности предположим, что сравниваются проекты АЭС и ТЭС на газе. Тогда, выбор проекта АЭС означает, что не используется масса газа, необходимая для выработки соответствующей энергии. В предположении неограниченного рынка покупателей газ может быть продан по соответствующей цене. Если же выбирается проект ТЭС на газе, можно

продать ядерное топливо, неиспользованное для выработки электрической энергии.

Для нахождения чистой (недисконтированной) выручки от замещения топлива используются следующие формулы.

При выборе проекта АЭС выручка от продажи замещенного газа рассчитывается по формуле:

$$ЧВ(З) \text{ от продажи газа (млн.долл.)} = C_{газ}(\text{млн.долл./год}) \cdot T_{экспл}(ТЭС), \quad (3.1)$$

где $C_{газ}$ – ежегодные затраты на топливо в проекте ТЭС на газе,

$T_{экспл}$ (ТЭС) – срок эксплуатации ТЭС.

Аналогично рассчитывается выручка, когда выбран проект ТЭС на газе и замещается ядерное топливо (ЯТ):

$$ЧВ(З) \text{ от продажи ЯТ (млн.долл.)} = C_{ят}(\text{млн.долл./год}) \cdot T_{экспл}(АЭС), \quad (3.2)$$

где $C_{ят}$ – ежегодные затраты на топливо в проекте АЭС,

$T_{экспл}$ (АЭС) - срок эксплуатации ТЭС.

Дисконтированная выручка от замещения топлива $ДВ(З)$ находится аналогично показателю $ЧВЗ$ с учетом операции дисконтирования.

Дисконтированная выручка от замещения топлива $ДВ(З)$ при постоянстве ежегодных затрат на топливо находится по формуле

$$ДВ(З) = C_{газ} \cdot (1 + d)^{-T_1} \cdot \left(1 + d^{-1} \cdot (1 + d)^{-(T_2 - T_1 - 1)} \right) \quad (3.3)$$

Пример представления результатов расчета показателей эффективности инвестиционных проектов электростанций на ядерном и органическом топливе, представлены на рис. 3.9.

Показатели эффективности и доходности	АЭС	ТЭС на газе	Сравнение
Чистая текущая стоимость-NPV (млн.долл.)	540	587	-1
Индекс доходности дисконтированных затрат-ИДДЗ	3,6	2,4	1
Внутренняя норма доходности-IRR (%)	7,8	9,3	-1
Дисконтированный срок окупаемости - DPP (лет)	24	20	-1
Дисконтированные затраты-ДЗ (млн.долл.)	1 962	2 009	1
Удельные дисконтированные затраты-УДЗ (цент/кВт.ч.)	1,63	1,67	1
Чистая выручка от замещения топлива-ЧВ(З) (млн.долл.)	1 200	532	1
Дисконтированная выручка от замещения топлива-ДВ(З), (млн.долл.)	541	240	1

Примечание:
 1 - проект АЭС лучше проекта ТЭС по соответствующему критерию;
 -1 - проект АЭС хуже проекта ТЭС по соответствующему критерию;
 0 - проекты АЭС и ТЭС имеют одинаковые значения соответствующего критерия.

Рис. 3.9. Расчет показателей эффективности инвестиционных проектов энергоблоков в программе «Энерго-Инвест»

При сравнении результатов и выборе проекта используется следующий КОД:

- 1 – проект АЭС лучше проекта ТЭС по соответствующему показателю;
- 1 – проект АЭС хуже проекта ТЭС по соответствующему показателю;
- 0 – проекты АЭС и ТЭС имеют одинаковые значения соответствующего показателя.

3.2. Оценка экономической эффективности и рисков инвестиционного проекта АЭС с реакторной установкой ВВЭР - 1000

С использованием программы «Интервал-Инвест» была проведена оценка экономической эффективности инвестиционного проекта АЭС с блоком ВВЭР-1000. Исходные данные по показателям проекта были взяты из референтных отечественных и зарубежных источников [86].

Рассмотрено 2 схемы финансирования инвестиционного проекта:

- финансирование из собственных средств;
- финансирование с привлечением внешних кредитов.

Оценка экономической эффективности инвестиционного проекта АЭС при финансировании из собственных средств

Матрица исходных данных инвестиционного проекта энергоблока для рассматриваемой схемы финансирования представлена в табл. 19.

Таблица 19.

Исходные данные инвестиционного проекта АЭС с блоком ВВЭР 1000

		Интервальные значения параметров	Минимум	Максимум
I	1	Тариф на электроэнергию с шин АЭС (цент./Квт.ч)	2,50	3,50
	2	Цена ядерного топлива (долл. за кг. U)	600	1400
	3	КИУМ	0,8	0,8
	4	Норма дисконта (%)	5	10
	5	Ставка налога с прибыли(%)	24	24
II	6	Доля в общих капиталовложениях (%)	0	0
	7	Срок возврата кредита (лет)	0	0
	8	Процентная ставка кредита (%)	0	0
III	9	Устан.электр. мощность (МВт)	1068	1068
	10	Срок строительства Тс (лет)	6	6
	11	Удельная стоимость строительства (долл./КВт)	1000	1500
	12	Пост. расходы на экспл., ремонт (млн.долл. в год)	30,00	50,00
	13	Глубина выгорания топлива (МВт(т)сут./кг.У)	43,00	43,00
	14	К.П.Д. установки	0,334	0,334
	15	Кап.вложения постоянные по годам в %.	16,7	16,7
IV	16	NPV (млн. долл.)	0,0	
	17	УДЗ (цент/кВт.ч)	2,0	
	18	IRR в % (рекомендуется не менее чем 20%)	20,0	

В табл. 19 данные, задаваемые пользователем в книге Microsoft Excel, разбиты на четыре блока, включая:

- I-ый блок (строки 1÷5) – внешние условия (тариф, КИУМ, норма дисконта, ставка налога с прибыли);
- II-ой блок (строки 6÷8) – схема финансирования (собственные средства и/или кредиты);
- III-ий блок (строки 9÷15) – ТЭП энергоблока.
- IV-ый блок (строки 16÷18) – пороговые значения C_j показателей эффективности для оценки риска (для показателей DPP и DZ пороги не задавались).

При заданной удельной стоимости строительства ежегодные капитальные вложения рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{кап}} = 10^{-5} \cdot N \cdot S_{\text{уд}} \cdot g_t, \quad (3.4)$$

где g – доля капитальных вложений по годам, %; $S_{\text{уд}}$ – удельная стоимость строительства, долл./кВт; N – установленная электрическая мощность (МВт).

Расходы на топливо [87] находятся по формуле:

$$C_{\text{топ}} = (10^{-6} \cdot 365 \cdot N \cdot p_{\text{ям}} \cdot \text{КИУМ}) / (\eta \cdot \rho), \quad (3.5)$$

где η – глубина выгорания топлива, МВт(т)сут./кг.У, ρ – К.П.Д. установки, $p_{\text{ям}}$ – цена ядерного топлива, долл. за кг.У. $C_{\text{общ}} = C_{\text{топ}} + C_{\text{экспл}}$

Все интервальные ТЭП табл. 18 лежат в допустимой области их изменения, в которой выполняется условие монотонности изменения показателей.

После выделения данных табл. 18 они экспортируются в пакет MATLAB для проведения расчетов. При заданных интервальных значениях ТЭП были рассчитаны три возможных схемы финансирования инвестиционного проекта.

На рис. 3.10 представлены инвестиционные вложения в проект АЭС, а на рис. 3.11 кривые накопленных дисконтированных доходов для пессимистического, базового и оптимистического наборов ТЭП.

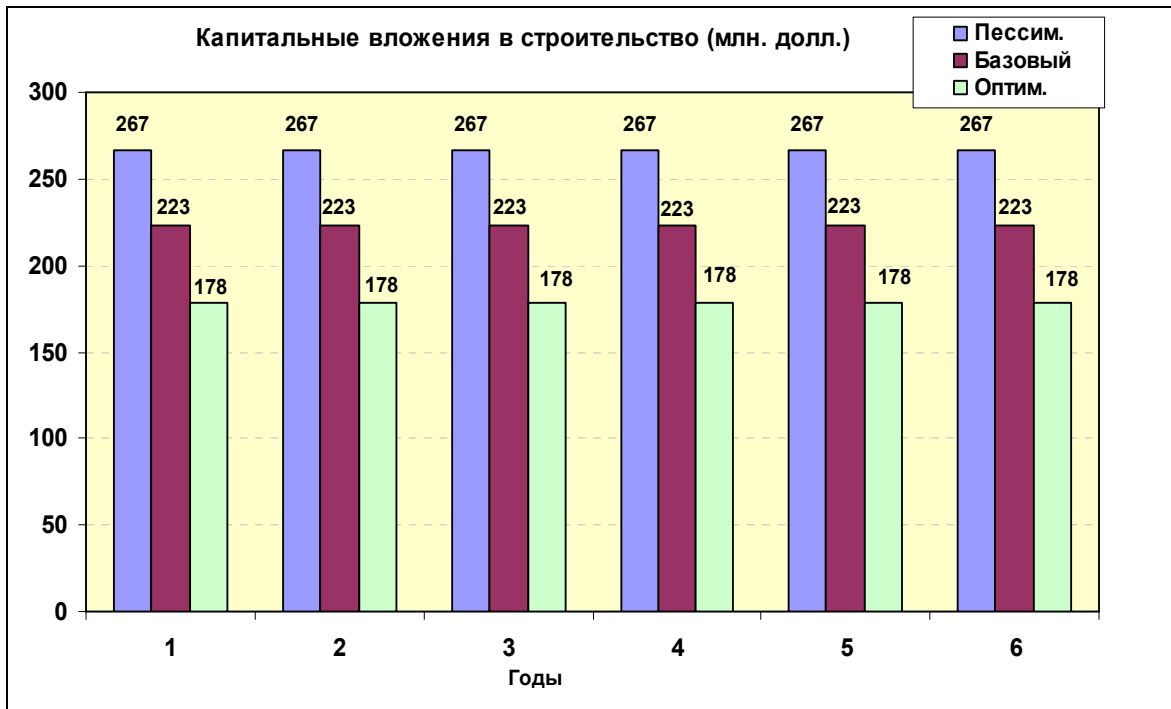


Рис. 3.10. Капитальные вложения в строительство проекта АЭС с блоком ВВЭР-1000

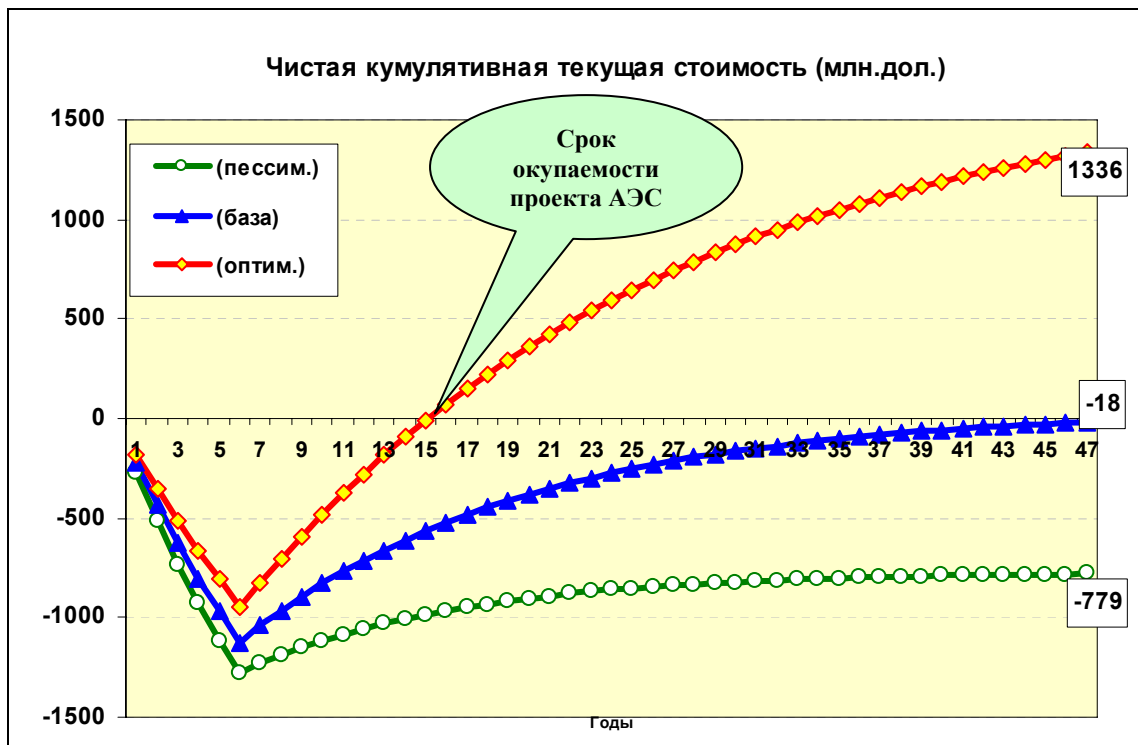


Рис. 3.11. Чистая кумулятивная текущая стоимость проекта АЭС с блоком ВВЭР-1000

По графикам на рис. 3.11 по конечным точкам на графиках легко определить интервальные значения показателя $[NPV]=[-779; 1336]$ млн. долл. Нетрудно видеть, что при пессимистическом и базовом вариантах (наборах) проект не окупается, т.к. кривые не пересекают нулевую ось. При оптимистическом варианте срок окупаемости проекта равен 16-ти годам.

Полученные по исходным данным (табл. 19) интервальные значения показателей экономической эффективности и риски проекта приведены в табл. 20.

Таблица 20.

Интервальные показатели эффективности и значения рисков проекта АЭС
ВВЭР-1000 при финансировании из собственных средств

Показатели	Пессим.	Базовый	Оптимис.	Пороги	Риск
NPV , млн. долл.	-779	-18	1336	0,00	0,37
IRR , %	3,5	7,0	11,5	20,00	1,00
$УДЗ$, цент/кВт.ч.	3,88	2,53	1,51	2,00	0,79
DPP , лет*	не окупается		16		
$ДЗ$, млн. долл.	2512	1666	1115		

*Примечание. Для показателей DPP и $ДЗ$ пороги не задавались и значения рисков не рассчитывались.

По результатам оценки эффективности проекта АЭС с блоком ВВЭР – 1000 можно сделать следующие выводы:

1. При пессимистическом и базовом вариантах проект имеет отрицательные результаты по всем показателям.
2. При оптимистическом варианте проект эффективен по показателям NPV , $УДЗ$, DPP .
3. При заданных интервалах неопределенности параметров анализируемый проект энергоблока имеет критический (недопустимый) уровень риска отрицательного результата по показателям $УДЗ$ и IRR (0,79 и 1 соответственно). Для показателя NPV имеет место средний уровень риска (0,37).

Предложенный интервальный подход может быть использован для оценки экономической эффективности не только проектов АЭС, но и других инвестиционных проектов в условиях неточности ТЭП и неопределенности параметров проекта.

Оценка экономической эффективности проекта АЭС с блоком ВВЭР - 1000 при финансировании с привлечением внешних кредитов

С помощью программы «Интервал-Инвест» было исследовано влияние схемы финансирования на результаты проекта. Было рассмотрено три схемы финансирования проекта:

1. Из собственных средств без привлечения внешних инвесторов (нулевая доля внешнего кредита).
2. Привлечение заемного капитала (доля в общих капиталовложениях 50%, срок возврата кредита 15÷20 лет, процентная ставка 7÷10%).
3. Финансирование по кредитной схеме (доля в общих капиталовложениях 100%, срок возврата кредита 15÷20 лет, процентная ставка 7÷10%).

В качестве исходных данных принималась данные, представленные в табл. 18, за исключением пункта «Внешнее кредитование», который изменялся в зависимости от схемы финансирования проекта.

Интервальные показатели экономической эффективности, а также рассчитанные значения рисков при первой схеме финансирования (из собственных средств) были представлены в табл. 20. Расчеты по двум другим вариантам приведены в табл. 21.

Влияние схемы финансирования проекта АЭС на показатели и риски

1	2	3	4	5	7	8
Схема финансирования	Показатели	Пессим.	Базовый	Оптимис.	Пороги	Риск
Кредит 50%	<i>NPV</i> , млн. долл.	-1282	-393	1078	0,00	0,54
	<i>IRR</i> , %	0,5	5,0	10,0	20,00	1,00
	<i>УДЗ</i> , цент/кВт.ч.	4,44	2,88	1,69	2,00	0,89
	<i>DPP</i> , лет	не окупается		19		
	<i>ДЗ</i> , млн. долл.	2886	1898	1233		
Кредит 100%	<i>NPV</i> , млн. долл.	-1708	-942	517	0,00	0,77
	<i>IRR</i> , %	0,0	2,5	7,0	20,00	1,00
	<i>УДЗ</i> , цент/кВт.ч.	4,89	3,23	1,91	2,00	0,97
	<i>DPP</i> , лет	не окупается		29		
	<i>ДЗ</i> , млн. долл.	3191	2130	1377		

Из анализа табл. 20 и табл. 21 следует, что при одних и тех же условиях переход от схемы финансирования из собственных средств к кредитной схеме вызывает ухудшение экономической эффективности проекта АЭС по всем показателям. Кроме того, имеет место существенное увеличение риска по всем показателям.

Графики изменения риска при изменении схемы финансирования приведены на рис. 3.12.

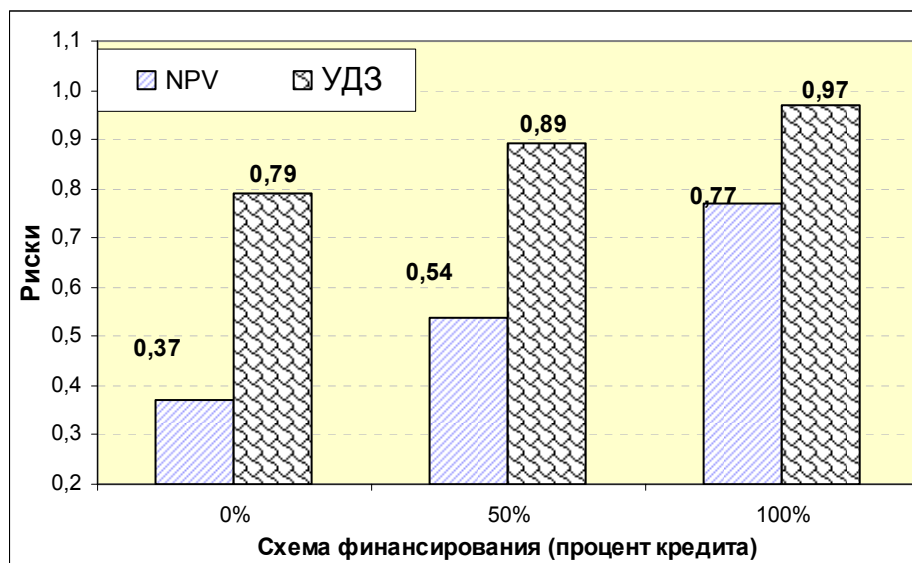


Рис. 3.12. Влияние схемы финансирования на риски

На рис. 3.12 различной штриховкой отмечены значения риска для трех показателей эффективности, соответствующие трем схемам финансирования: из собственных средств, с кредитом 50% и 100%.

Проведенные расчеты и рис. 3.12 позволяют констатировать, что привлечение внешних инвесторов даже на сравнительно «мягких» условиях, приводит к ухудшению экономической эффективности проектов АЭС по показателям *NPV* и *УДЗ*. Следовательно, реализация кредитной схемы практически неизбежно приводит к увеличению тарифов на отпускаемую энергию и, в конечном счете, ложится на плечи потребителей.

Построение приближенных многофакторных моделей показателей эффективности по данным вычислительного эксперимента

Для уточнения диапазона изменения ТЭП, при которых инвестиционный проект будет экономически эффективен, было решено в соответствии с описанной в главе 3 методологией построить приближенные линейные модели показателей. При этом все фиксированные ТЭП, а именно установленная электрическая мощность, срок строительства, КПД установки; глубина выгорания топлива, срок службы, КИУМ, ставка налога с прибыли были выбраны из табл. 18.

В качестве варьируемых переменных x_i были выбраны 5 главных показателей проекта АЭС в соответствующих диапазонах: тариф на электроэнергию $[x_1]=[2,0; 3,5]$; цена ядерного топлива $[x_2]=[600; 1400]$; удельная стоимость строительства $x_3=[1000; 1500]$; ежегодные затраты на эксплуатацию $x_4=[30; 50]$; норма дисконта $x_5=[5; 10]$.

Для целей дальнейшего анализа переменные были пронумерованы. Диапазоны изменения переменных соответствуют разбросу значений соответствующих ТЭП проекта АЭС в различных литературных источниках.

На основе исходных данных был проведен полный факторный эксперимент, который включал 32 опыта, с добавлением комбинации со средними значениями переменных.

Расчет показателей эффективности проводился с использованием программы «Модели ПФЭ». По полученным данным рассчитывались мнк-оценки коэффициентов многофакторных моделей. Были получены следующие многофакторные модели:

$$NPV = -39,77 + 424,35 \cdot x_{1(n)} - 65,66 \cdot x_{2(n)} - 225,18 \cdot x_{3(n)} - 75,60 \cdot x_{4(n)} + 354,31 \cdot x_{5(n)}. \quad (3.6)$$

($\delta_{\max} = 11\%$)

$$IRR = 6,37 + 2,78 \cdot x_{1(n)} - 0,46 \cdot x_{2(n)} - 1,38 \cdot x_{3(n)} - 0,53 \cdot x_{4(n)} \quad (3.7)$$

($\delta_{\max} = 4,55\%$);

$$УДЗ = 2,58 + 0,12 \cdot x_{2(n)} + 0,35 \cdot x_{3(n)} + 0,13 \cdot x_{4(n)} + 0,59 \cdot x_{5(n)}. \quad (3.8)$$

($\delta_{\max} = 2,30\%$);

$$DPP = 36 - 9,75 \cdot x_{1(n)} + 1,17 \cdot x_{2(n)} + 4,00 \cdot x_{3(n)} + 1,33 \cdot x_{4(n)} + 5,75 \cdot x_{5(n)}, \quad (3.9)$$

($\delta_{\max} = 4,17\%$),

Относительная ошибка модели NPV составляет 11%, т.е. линейная модель этого показателя является недостаточно точной для решения задачи прогноза. При необходимости получить более точную модель NPV необходимо для его описания использовать полином второго порядка.

Многофакторные линейные модели остальных показателей являются достаточно точными, так как их максимальные относительные ошибки δ_{\max} не превышают 5%.

Как и следовало ожидать, в соответствии с точными расчетными формулами показатель IRR не зависит от нормы дисконта $x_{5(n)}$, а показатель $УДЗ$ – от тарифа $x_{1(n)}$.

Наибольшее влияние на показатель NPV и срок окупаемости оказывает тариф на электроэнергию x_1 и норма дисконта x_5 . Показатель IRR наиболее чувствителен к изменению тарифа на электроэнергию, а показатель $УДЗ$ к изменению нормы дисконта.

Наиболее точное описание обеспечивает линейная модель показателя $УДЗ$; ее коэффициент множественной корреляции, найденный в результате регрессионного анализа, составляет 0,99. Показатель $УДЗ$, рекомендуемый МАГАТЭ, отражает не только коммерческую, но и общественную

эффективность инвестиционного проекта. В связи с этим с использованием модели $УДЗ$ была решена задача определения таких диапазонов изменения варьируемых ТЭП, при которых значение риска отрицательного результата по показателю $УДЗ$ не превышает заданного уровня, равного 0,2 (минимальный риск по международной градации рисков).

Минимальное значение показателя равно 1,51 и достигается при минимальных значениях переменных. Прогнозное минимальное значение показателя, которое можно найти подстановкой в модель минимальных нормированных значений переменных, равных -1 , составляет $УДЗ_{min} \cong 1,4$. Подставляя это значение в соответствующую формулу для оценки риска в разделе 2.4, получаем следующее уравнение с одним неизвестным:

$$R_{УДЗ>C} = (УДЗ_{max} - C) / (УДЗ_{max} - УДЗ_{min}) = (УДЗ_{max} - 2,0) / (УДЗ_{max} - 1,4) = 0,2 \quad (3.10)$$

Решив уравнение (4.10) получим, что $УДЗ_{max} = 2,15$.

При этом после несложных преобразований получаем следующее уравнение:

$$УДЗ_{max} = 2,58 + 0,12 x_{2н} + 0,35 x_{3н} + 0,13 x_{4н} + 0,59 x_{5н} = 2,15 \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) имеет множество решений. Если зафиксировать удельную стоимость строительства на среднем значении 1250 долл./КВт ($x_{3(н)} = 0$), а норму дисконта на их нижнем уровне 5% ($x_{5н} = -1$), можно найти такие верхние границы $x_{2н}$ и $x_{4н}$, которые обеспечивают максимально широкий диапазон изменения этих переменных. Это достигается, если принять $x_{2(н)} = x_{4(н)} = 0,64$.

В результате были получены следующие нормированные диапазоны: $[x_{2(н)}] = [-1; 0,64]$; $x_{3(н)} = 0$; $[x_{4(н)}] = [-1; 0,64]$, $x_{5(н)} = -1$. Диапазоны в абсолютных значениях составляют:

цена ядерного топлива $[x_2] = [600; 1256]$ долл. за кг. U ; ежегодные затраты на эксплуатацию $[x_4] = [30; 46,4]$ млн. долл. в год.

Это решение обеспечивает максимально широкие диапазоны по цене ядерного топлива и затратам на эксплуатацию.

Проведенные вариантные расчеты инвестиционного проекта АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000 были использованы при обосновании ФЦП «Развитие атомного энергопромышленного комплекса».

3.3. Оценка сравнительной эффективности проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе

В этом разделе на основании исходных данных – жизненного цикла инвестиционных проектов АЭС, ТЭС на газе и угле – рассчитывается сравнительная эффективность этих проектов в среде программы «Энерго-Инвест».

Расходы на топливо и эксплуатацию предполагались одинаковыми по годам. Расчеты проводились в долларах. Экологические и социально-политические эффекты в расчетах не учитывались, однако при сравнении альтернативных проектов оценивался эффект от замещения одного вида топлива другим.

Сравнение проектов проводилось без учета региональных и системных эффектов по укрупненным технико-экономическим показателям генерирующих мощностей разного типа. Укрупненные технико-экономические показатели проектов электростанций на ядерном и органическом топливе, принятые для расчетов, приведены в табл. 22.

Таблица 22.

Исходные данные для сравнения проектов АЭС и ТЭС

№	Сравниваемые проекты	АЭС	ТЭС на газе	ТЭС на угле
1	Срок строительства (лет)	6	5	6
2	Срок службы (лет)	40	40	40
3	Установленная электр. мощность (МВт)	1000	1000	1000
4	Отпуск электроэнергии с шин (ГВт.час/год)	7000	7000	7000
5	Удельная стоимость строительства (долл./кВт)	1100	700	850
6	Тариф на электрическую энергию (цент./кВт.ч)	3,5	3,5	3,5
7	Норма дисконтирования (%)	10	10	10
8	Расходы на топливо (млн. долл./год)	15	72	71,55
9	Расходы на эксплуатацию (млн. долл./год)	42	50	52
10	Момент приведения разновременных затрат (лет)	1	1	1

При расчетах предполагалось равномерное распределение капиталовложений по годам строительства. Налог с прибыли задавался равным 23%.

Ниже приводится структуру и продолжительность финансовых потоков для проектов АЭС, ТЭС на газе и угле, которая выглядит следующим образом (рис. 3.13):

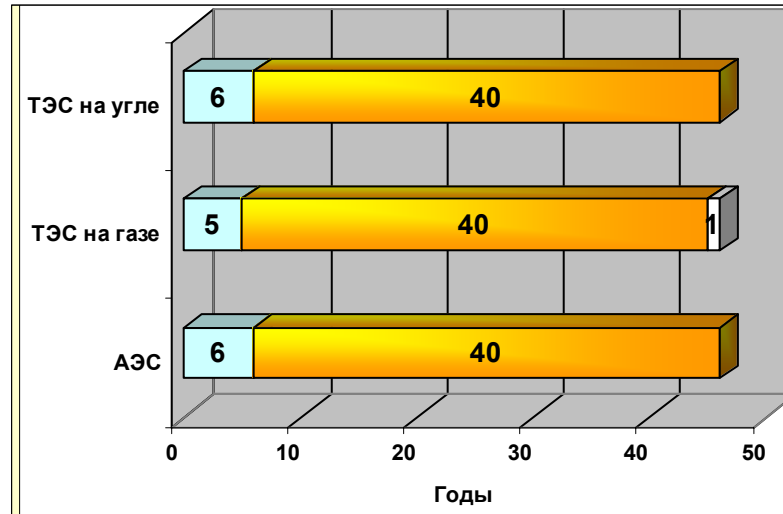


Рис. 3.13. Сравнительная структура проектов АЭС, ТЭС на газе и угле

Для проекта АЭС и ТЭС на угле диаграмма отображает периоды строительства и эксплуатации, равные 6 лет и 40 лет соответственно; для проекта ТЭС на газе – 5 и 40 лет соответственно.

Так как момент приведения разновременных затрат равен первому году строительства, в этих условиях проект ТЭС на газе имеет «белый» участок в конце расчетного периода. На этот участок, равный одному году, необходимо определить финансовые потоки.

В настоящее время при расчетах обычно принимается, что финансовые потоки на таких участках равны нулю. Однако для внешнего инвестора, проводя расчеты сравнительной эффективности, для покрытия заданного спроса на энергию после окончания срока службы необходимо или строительство новой ТЭС или покупка энергии на внешнем рынке. Таким образом, от инвестора (в т.ч. государства) требуются дополнительные вложения.

Для упрощения вычислений в работе на «белом» участке был принят нулевой финансовый поток.

Результаты расчетов главных показателей эффективности инвестиционных проектов электростанций на ядерном топливе, газе и угле, проведенных по методике UNIDO, представлены в табл. 23.

Таблица 23.

Показатели эффективности инвестиционных проектов энергоблоков

Показатели	КОД ЯТ- Уголь	ТЭС на угле	АЭС	ТЭС на газе	КОД ЯТ-Газ
<i>NPV</i> (млн.долл.)	1	-178	1	71	-1
<i>IRR</i> (%)	1	9	10	11	-1
<i>ДЗ</i> (млн.долл.)	1	2301	1972	2048	1
<i>УДЗ</i> (цент/кВт.ч.)	1	3,36	2,88	3,29	1
<i>ЧВЗ</i> , чистая выручка от замещения топлива (млн.долл.)	1	600	2880 (газ)	600	1
<i>ДВЗ</i> , дисконтированная выручка от замещения топлива (млн.долл.)	1	161	775 (газ)	161	1

Из сравнительного анализа показателей табл. 23, полученных при ТЭП энерготехнологий, заданных в табл. 22, можно сделать следующие выводы:

- проект АЭС лучше проекта ТЭС на угле по всем показателям, как с учетом, так и без учета эффекта замещения;
- проект ТЭС на газе лучше проекта АЭС по показателям *NPV* и *IRR*;
- проект АЭС устойчиво лучше проектов ТЭС на газе по показателям *УДЗ*, *ДЗ*, *ЧВ(З)* и *ДВ(З)*.

Оценка чувствительности результатов сравнения инвестиционных проектов АЭС и ТЭС на газе к норме дисконта

Приведенные выше результаты сравнения проектов были получены при фиксированной норме дисконта $d=10\%$. Вместе с тем, анализ показывает, что результаты сравнения могут существенно измениться при изменении нормы дисконта. Для количественной оценки этого влияния был проведен

анализ чувствительности проектов АЭС и ТЭС на газе при разных нормах дисконта.

Для расчетов ТЭП проектов были разбиты на 2 блока – неизменяемые и варьируемые ТЭП. Неизменяемые при расчета ТЭП приведены в табл. 24

Таблица 24.

Исходные данные для сравнения проектов АЭС и ТЭС на газе

Условные имена сравниваемых проектов	АЭС	ТЭС на газе
Срок строительства (лет)	6	5
Срок службы (лет)	40	40
Установленная электр. мощность (МВт)	1000	1000
Годовой отпуск электроэнергии с шин (ГВт.час/год)	7000	7000
Удельная стоимость строительства (долл./КВт)	1500	700
Затраты на эксплуатацию (милл.долл./год)	42	50
Налог с прибыли (%)	23	23

К изменяемым ТЭП относились цены на газ, ядерное топливо и тариф на электроэнергию. Были рассмотрены три сценария, сформированные из комбинаций этих ТЭП по фактическим данным на 2005 год и прогнозным данным для 2010 и 2015 года:

Сценарий I (2005). Pгаз=40 \$/тыс. м³; Pят=700 \$/кгU; тариф=2,5 цент/кВт.ч

Сценарий II (2010). Pгаз=65 \$/тыс.м³; Pят=800 \$/кгU; тариф=3,4 цент/кВт.ч

Сценарий III (2015). Pгаз=95 \$/тыс. м³; Pят=1000 \$/кгU; тариф=4,0 цент/кВт.ч.

Каждый из вариантов оценивался по двум показателям экономической эффективности - ДЗ и УДЗ при разных нормах дисконта.

Результаты расчетов показателей экономической эффективности проектов при различных сценариях развития приведены в табл. 25 и 26.

Таблица 25.

Сравнение проектов по показателю ДЗ, млн. долл.

	Сценарий I (2005)			Сценарий II (2010)			Сценарий III (2015)		
	5%	10%	12%	5%	10%	12%	5%	10%	12%
Норма дисконта	5%	10%	12%	5%	10%	12%	5%	10%	12%
АЭС	2105	1547	1420	2135	1560	1430	2194	1587	1451
ТЭС на газе	2294	1368	1180	2888	1649	1401	3601	1968	1665

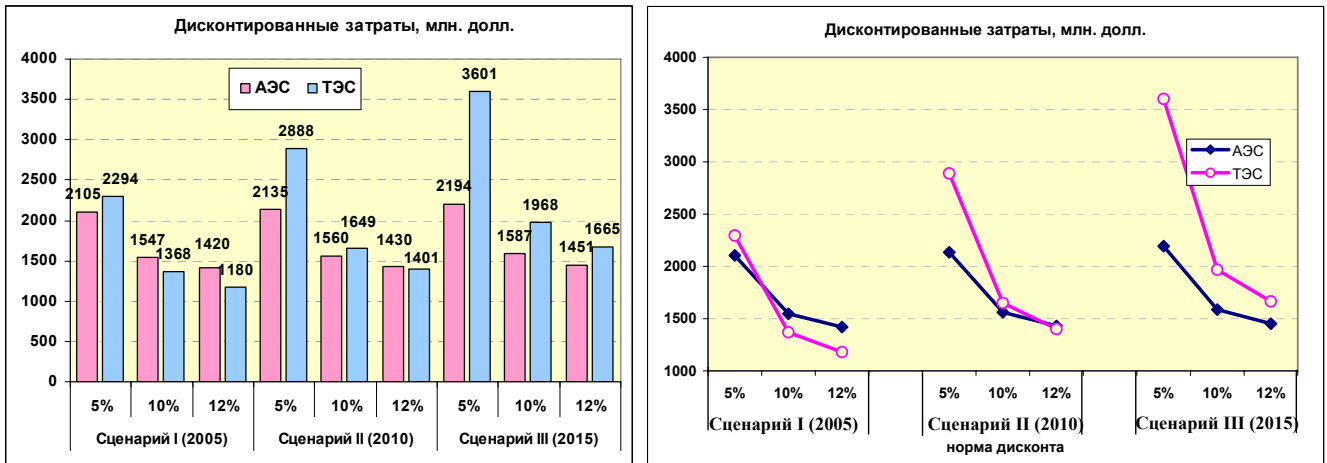


Рис. 3.14. Сравнение АЭС и ТЭС на газе по показателю DZ

В столбцах табл. 25 жирным шрифтом отмечены значения показателя DZ для предпочтительного проекта. На рис. 3.14 значения показателей для АЭС и ТЭС на газе представленные в виде диаграммы и в форме графиков для каждого сценария. Графическая форма представления позволяет визуально определить граничное значение дисконта, при превышении которого проект АЭС проигрывает проекту ТЭС на газе. Для сценария I – пороговое значения составляет около 7%; для сценария II – 11%. Для сценария III проект АЭС лучше проекта ТЭС на газе при любом дисконте меньше 12%.

Таблица 26.

Сравнение проектов по показателю UDZ , цент/кВт.ч

Норма дисконта	Сценарий I (2005)			Сценарий II (2010)			Сценарий III (2015)		
	5%	10%	12%	5%	10%	12%	5%	10%	12%
АЭС	2,24	3,64	4,34	2,27	3,67	4,37	2,33	3,73	4,43
ТЭС на газе	2,44	3,22	3,60	3,07	3,88	4,28	3,83	4,67	5,09

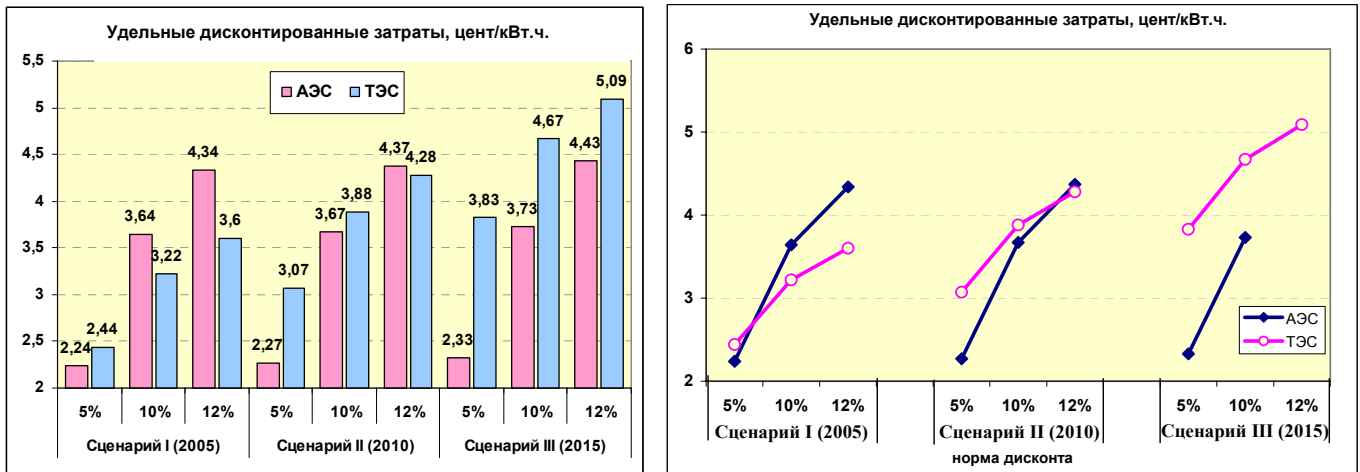


Рис. 3.15. Сравнение АЭС и ТЭС на газе по показателю $УДЗ$

В столбцах табл. 26 жирным шрифтом отмечены значения показателю $УДЗ$ для предпочтительного проекта. Например, во втором столбце табл. 25 при норме дисконта $d=5\%$ проект АЭС лучше проекта ТЭС на газе, т.к. АЭС значение $УДЗ=2,24$, а для ТЭС $УДЗ=2,44$.

Интересно отметить, что граничные значения дисконта, при превышении которого проект АЭС проигрывает проекту ТЭС на газе совпадают с полученными выше для показателя $ДЗ$.

Можно констатировать, что для любого показателя эффективности ($ДЗ$ и $УДЗ$) при увеличении нормы дисконта результаты сравнения проектов при сценариях I и II меняются в пользу проекта ТЭС на газе. В настоящее время отсутствует согласованная общественная норма дисконта, которая ранее устанавливалась Правительством.

Выводы к главе 3

В главе приведены описание разработанного пакета программ, предназначенного для оценки экономической эффективности инвестиционных проектов АЭС и ТЭС, и результаты оценки экономической эффективности инвестиционных проектов АЭС и ТЭС.

Разработанный пакет включает три программы: «Интервал-Инвест», «Модели ПФЭ» и «Энерго-Инвест».

В приведенных программах реализуется общая концепция моделирования, основанная на динамическом обмене данными между универсальным математическим пакетом Матлаб и известным приложением Microsoft Excel. Это позволяет объединить мощные вычислительные ресурсы Матлаб и простоту, удобство и развитые графические средства программы Microsoft Excel, хорошо известной обычным пользователям.

Все программы прошли успешную апробацию на реальных данных проектов электростанций с указанием диапазона возможных значений ТЭП проекта.

Проведенные расчеты проекта АЭС с блоком ВВЭР – 1000 при интервально заданных ТЭП показали, что проект эффективен только при оптимистическом наборе с минимальной удельной стоимостью строительства и минимальными составляющими затрат.

Для уточнения диапазона изменения ТЭП, при которых инвестиционный проект АЭС будет экономически эффективен, были построены приближенные линейные модели показателей.

При сравнении инвестиционных проектов АЭС и ТЭС на органическом топливе с фиксированными значениями ТЭП были сделаны следующие выводы:

- проект АЭС лучше проекта ТЭС на угле по всем показателям, как с учетом, так и без учета эффекта замещения;
- проект ТЭС на газе лучше проекта АЭС по показателям NPV и IRR ;

- проект АЭС устойчиво лучше проектов ТЭС на газе по показателям $УДЗ$, $ДЗ$, а также по показателям $ЧВ(З)$ и $ДВ(З)$, оценивающим экономический эффект от замещения одного вида топлива другим.

Сравнение проектов АЭС и ТЭС при разных сценариях и вариантах ТЭП энерготехнологий показало высокую чувствительность результатов сравнительной оценки проектов к норме дисконта.

Выводы по работе

В процессе решения задач, поставленных в диссертации, получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Выполнен анализ известных подходов к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов АЭС и ТЭС в условиях неопределенности и проведено сравнение трех моделей их описания: вероятностной, нечеткой и интервальной. По результатам анализа в качестве основной модели описания неопределенных данных выбрана интервальная модель, как наиболее универсальная и наименее ограничительная.

2. С использованием интервальных моделей разработан подход к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов по интервальному данным и метод оценки рисков с интервально-заданными показателями. В математических терминах описана допустимая область применения метода.

3. Разработан алгоритм реализации оптимального вычислительного эксперимента, позволяющий находить многофакторные модели зависимости показателей экономической эффективности проектов в заданном классе полиномиальных функций. Показано преимущество оптимального планирования по сравнению с методом Монте-Карло при построении многофакторных моделей.

4. Разработан пакет программ для оценки инвестиционных проектов энергетики по интервальному данным, позволяющий рассчитывать интервальные значения показателей и оценки рисков проекта; обрабатывать данные оптимального вычислительного эксперимента и находить многофакторные модели показателей эффективности и проводить оценку эффективности одновременно двух альтернативных проектов АЭС и ТЭС.

5. Проведена оценка эффективности проекта АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000 и его сравнительная оценка с проектами ТЭС на газе и угле.

Список литературных источников

1. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов (теория и практика). – М.: Дело, 2001.–832 с.
2. Смоляк С.А. О правилах сравнения вариантов хозяйственных мероприятий в условиях неопределенности // Исследования по стохастической теории управления и математической экономике. – 1980. – С.154-163
3. Петраков Н.Я., Роталь В.И. Фактор неопределенности и управление экономическими системами. – М.: Наука, 1985. – 191 с.
4. Арсланова З.Л., Лившиц В.Н. Оценка инвестиционных проектов в разных системах хозяйствования // Инвестиции в России. – 1995. – №1. – С.21-38.
5. Арсланова З.Л., Лившиц В.Н. Оценка инвестиционных проектов в разных системах хозяйствования // Инвестиции в России. – 1995. – №2. – С.15-27.
6. Косов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.
7. Материалы с сайта <http://www.unido.ru>.
8. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants/ IAEA, Series No 396. – Vienna, 2000. – 224 p.
9. Белая книга ядерной энергетики / Е.О. Адамов, Л.А. Большов, И.Х. Ганев и др. – М.: ГУП НИКИЭТ, 2001.– 270 с.
10. Перспективы АЭС с реакторами ВВЭР / В.А. Сидоренко, В.В. Вознесенский, А.Б. Малышев и др. // Бюллетень по атомной энергии. – 2003. – №1. – С.40-46.
11. Королькова Н.Н. Сравнительный анализ вывода из эксплуатации АЭС в странах мира // Бюллетень по атомной энергии. – 2002.–№9. – С.68-71.

12. Гордеев Б.К. Исследования в области экономики ядерного топливного цикла // Бюллетень по атомной энергии. – 2002. – №6. – С.21-24.
13. Архангельская А.И., Фианцев В.С. Реформирование рынка электрической энергии и мощности. Новые условия работы атомных электростанций // Экономика атомной отрасли: Сборник статей и научно-технических материалов по экономике и кадровой политике. – 2006. – С. 5-18.
14. Гагаринский А.Ю., Кузнецов В.В. Четвертое поколение ядерных источников энергии // Бюллетень по атомной энергии. –2003. – №3. – С.38-43.
15. Первозванский А.А., Первозванская Т.Н. Финансовый рынок: расчет и риск. - М.: Инфра-М, 1994, – 256 с.
16. Четыркин Е.М. Методы финансовых и коммерческих расчетов. - М.: Дело Лтд, 1995. – 437 с.
17. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов. - М.: Финансы и статистика, 1998. – 144 с.
18. Браилов В.П., Волкова Е.А. Методический подход к прогнозированию развития атомных электростанций на перспективу, используемый в ИНЭИ РАН // Экономика атомной отрасли. – 2001. – С. 20-40.
19. Браилов В.П. О критерии сравнения вариантов развития различных по производственному эффекту систем // Экономика и математические методы. – 1975.– Вып.5.– С. 14-23.
20. Браилов В.П. Инструкция по определению экономической эффективности капитальных вложений в развитие энергетического хозяйства. – М.: Энергия, 1973. – 52 с.
21. Дьяков А.Ф., Платонов В.В. Единая электроэнергетическая система России в период рыночных преобразований. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 152 с.

22. Дьяков А.Ф. Электроэнергетика России на рубеже XXI века и перспективы ее развития // Известия РАН. – Энергетика. – 2000. – № 5. – С. 69-83.
23. Волков Э.П., Баринов В.А., Маневич А.С. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики России. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 432 С.
24. Бизнес-справочник, – М.: Госкомстат РФ, 2000. – 126 с.
25. Чемоданов В.И., Бобылева Н.В., Соколов Н.Ю. Перспективы развития Единой энергетической системы // Электро. – 2002. – № 1 – С.2-9.
26. Браилов В.П., Волкова Е.А., Веселов Ф.В. Экономические аспекты, развития АЭС в России // Вестник ФЭК России. – 2001. – № 1012. – С.73-84.
27. Орлов А.И. Теория принятия решений. - М.: Экзамен, 2004. - 596 с.
28. Грачева М.В. Риск-анализ инвестиционного проекта. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – С. 351.
29. Лапуста М.Г., Шаршукова Л.Г. Риски в предпринимательской деятельности. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 111 с.
30. Орлов А.И. Устойчивость в социально-экономических моделях. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
31. Экономика предприятия: Учебник для вузов / И.Э. Берзинь, С.А. Пикунова, Н.Н. Савченко, С. Г. Фалько; Под ред. С.Г. Фалько. – М.: Дрофа, 2003. – 368 с.
32. Самуэльсон П. Экономика. - М.: НПО "АЛГОН", 1992. – Т.2. – 416 с.
33. Алякринский А.Н. Анализ и оценка отличий в применяемых в России и за рубежом методических подходах к оценке эффективности инвестиционных проектов, в частности, проектов атомных станций // Экономика атомной отрасли. – 2001. – С.93-102.
34. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования, Утверждены Госстроем России, Минфином РФ, Госкомпромом России, 1994. – 80 с.

- 35.Соболев И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1972. – 144 с.
- 36.Алефельд Г.Ш., Херцберг Ю. Введения в интервальные вычисления.- М.: Мир, 1987. – 370 с.
- 37.Moore R. E. Interval Analysis. Englewood cliffs. – N.Y.: Prentice-Hall.– 1966. – 390 p.
- 38.Алефельд Г., Херцберг Ю. Введения в интервальные вычисления.- М.: Мир, 1987. – 370 с.
- 39.Huynonen E. Constraint reasoning based on interval Arithmetic: the tolerance propagation approach, Artificial Intelligence, 1992. – v.58.– 248 p.
- 40.Нариньяни А.С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний // Изв. АН СССР. – Техническая Кибернетика – 1986.– №5.– С. 46-65.
- 41.Шарый С.П. Интервальные алгебраические задачи и их численное решение: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Новосибирск, 2000. – 322 с.
- 42.Шокин Ю.И. Интервальный анализ.–Новосибирск: Наука, 1981.–281 С.
- 43.Шарый С.П. Алгебраический подход во «внешней задаче» для интервальных линейных систем. // Вычислительные технологии.– 1998. – Т.3, №2. – С. 67-114.
- 44.Шарый С.П. Внешнее оценивание обобщенных множеств решений интервальных линейных систем. // Вычислительные технологии.–1999. – Т.4, №4, – С. 82-110.
- 45.Воцинин А.П., Бочков А.Ф., Сотиров Г.Р. Интервальный анализ данных как альтернатива регрессионному анализу // Заводская лаборатория. – 1990.–№ 7. – С 77-81.
- 46.Воцинин А.П., Скибицкий Н.В. Обработка неточных данных как неопределенных чисел // Вестник МЭИ. – 2005. –№3. – С. 95-107.
- 47.Воцинин А.П., Скибицкий Н.В. Интервальный метод калибровки. //Датчики и системы. – 2000. – №9 – С.52-60.

48. Вошинин А.П., Скибицкий Н.В. Идентификация моделей шумов в реальных измерениях и градуировочном эксперименте // Вестник МЭИ. – 2005. – №4. – С. 97-102.
49. Вошинин А.П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы. // Заводская лаборатория. – 2002. – №1. – С. 95-98.
50. Вошинин А.П. // Заводская лаборатория. – 2000. – Т.66, № 3. – С.51-65.
51. Вошинин А.П., Сотиров Г.Р. Оптимизация в условиях неопределенности. – М.: МЭИ, 1989. – 224 с.
52. Сборник трудов Международной конференции по интервальным и стохастическим методам в науке и технике (ИНТЕРВАЛ-92). - М.: МЭИ, 1992. – Т1. – 216 с.
53. Орлов А.И. Статистические методы оценивания и проверки целевой функции. - М.: МЭИ, 1987. – 109 с.
54. Алимов Ю.И. Альтернатива методу математической статистики – М.: Знание, 1980.– 346 с.
55. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к понятию приближенного решения. – М.: Мир, 1976.– 165 с.
56. Руководство по выражению неопределенности измерения. /Перевод с английского под редакцией В.А. Слаева. - СПб.: ВНИИМ. – им. Д.И. Менделеева, 1999. – 126 с.
57. Орлов А.И. Эконометрика. – М.: Экзамен, 2002. – 576 с.
58. Орлов А.И. Статистические методы оценивания и проверки гипотез. // Межвузовский сборник научных трудов. - Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1990. – С.89-99.
59. Орлов А.И. Статистические методы оценивания и проверки гипотез. // Межвузовский сборник научных трудов. - Пермь: Пермский государственный университет, 1993. – С.149-158.

- 60.Алешин Д.Н. Экономическое обоснование эффективности инвестиционных проектов предприятий на основе применения эконометрического метода интервальной оценки: Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук.–Москва, 2001. – 146 с.
- 61.Гуськова Е.А. Разработка организационно-экономических методов повышения эффективности деятельности промышленного предприятия на основе эконометрического подхода: Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. –Москва, 2004. – 124 с.
- 62.Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высшая школа, 1998. –575 с.
- 63.Тутубалин В.Н. Границы применимости (Вероятностно-статистические методы и их возможности). - М.: Знание, 1977. – 48 с.
- 64.Society and Nuclear Energy Towards a Better Understanding. Nuclear Energy Agency (OECD).– 2002. – 215 p.
- 65.Zadeh, L.A. Fuzzy sets. - Information and Control, 1965. – №8.– P. 338-353.
- 66.Zadeh L.A., Whalen B.H. On optimal control and linear programming. – IRE Trans. Automatic control, Ac-7, 1962. – P. 45-46.
- 67.Zimmerman, H.-J. Fuzzy sets Theory and its Applications. - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991. – 256 p.
- 68.Обработка нечеткой информации в системах принятия решений/А.Н.Борисов, А.В.Алексеев, Г.В.Меркурьев и др. - М.: Радио и связь, 1989. – 308 с.
- 69.Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 224 с.
- 70.Ferson Scott. Risk Assessment with Uncertain Numbers. – Lewis Publishers, 2002. – 214 p.

71. Voschinin A., Dyvak N., Simoff S. Interval methods: theory and application in design of experiments, data analysis and fitting // Chapter in the book «Design of experiment and data analysis: new trends and results». – Antal: Publ. House Antal, 1993. – P. 167-170.
72. Voschinin A., Skibitski N. Interval model of multisensor system // Proceeding of the Second International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Computing Systems: Technology and Applications. – Lviv, 2003. – P. 253-255.
73. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Иллюстрация основных положений. – М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2001. – 64 с.
74. Бронз П.В. Определение допустимых границ изменения ТЭП инвестиционных проектов при расчетах интервальных критериев эффективности // Научная сессия МИФИ-2007: Сборник научных трудов – Экономика и управление. – Москва, 2007. – Т.13. – С. 30-31.
75. Бронз П.В., Вощинин А.П. Построение аналитических моделей критериев эффективности инвестиционных проектов энергоблоков по данным вычислительного эксперимента // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП: Труды международной научной конференции CONTROL-2005. – Москва, 2005. – С. 155-165.
76. Бронз П.В., Вощинин А.П. Интервальный подход к оценке экономических рисков проектов энергетики и его сравнение со сценарным анализом // Научная сессия МИФИ-2006: Сборник научных трудов – Экономика и управление. – Москва, 2006. – Т.13. – С. 17-18.
77. Бронз П.В., Вощинин А.П., Тюрин А.В. Оценка экономических рисков инвестиционных проектов и программ энергетики на основе интервальных моделей // Экономика атомной отрасли: Сборник статей и научно-технических материалов по экономике и кадровой политике. – 2006. – С. 72-92.

- 78.Бронз П.В., Вошинин А.П., Тюрин А.В. Интервально-вероятностная модель оценки рисков при моделировании развития атомной энергетики // Планирование развития энергетики: методология, программное обеспечение, приложения: Тезисы доклада второй международной конференции Energy_Strat'2004. – Москва, 2004. – С. 31.
- 79.Бронз П.В. Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов по интервальным данным // Расширенные тезисы докладов Всероссийского (с международным участием) совещания по интервальному анализу и его приложениям ИНТЕРВАЛ-06. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 21-25.
- 80.Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
- 81.Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента – М.: Наука, 1971. – 312 с.
- 82.Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – Л.: Физматгиз, 1962. – 352 с.
- 83.Демиденко Е.З, Линейная и нелинейная регрессия. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
- 84.Вошинин А.П., Бронз П.В. Построение аналитических моделей по данным вычислительного эксперимента в задачах анализа чувствительности и оценки экономических рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т.73, №1. – С. 101-109.
- 85.Модели, методы и инструментальные средства планирования долгосрочного развития атомной энергетики России/В.В. Батов, П.В. Бронз, А.П. Вошинин и др. // Ядерная энергетика Украины – пути развития и международное сотрудничество: Тезисы докладов международной конференции Украинского ядерного общества. – Киев, 2005. – С. 8-9.

86. Федеральная целевая программа Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007 - 2010 годы и на перспективу до 2015 года // Бюллетень по атомной энергии. –2006. – №11. – С.4-32.
87. Батов В.В, Корякин Ю.И. Экономика ядерной энергетики. – М.: Атомиздат, 1969. – 400 с.