

УДК 338.2

Научная специальность: 1.1.4

Практика анализа риска в задачах надежности поставок природного газа с ценными компонентами на газоперерабатывающие и газохимические комплексы. Часть 2. Поставка этансодержащего газа

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2024

**Демкин И.В.,
Ковалев С.А.,
Митченко А.А.,**
Газпром ВНИИГАЗ,
142717, Россия,
Московская обл.,
г.о. Ленинский, п. Развилка,
ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1.

Шевченко А.В. *,
Военно-инженерная
академия,
143432, Россия,
Московская обл.,
г.о. Красногорск, рп Нахабино,
ул. Карбышева, д. 2

Никонов И.М.,
МГУ имени М.В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва,
Ленинские горы, д. 1

Аннотация

В статье представлены результаты исследований по обеспечению надежности по годам поставок этансодержащего газа на газоперерабатывающие и газохимические комплексы с учетом неопределенности в объемах добычи газа и содержании в нем ценных компонент с различных участков газоконденсатных месторождений в Надым-Пур-Тазовском регионе Западной Сибири.

Ключевые слова: факторы неопределенности; задержка сроков; геолого-технологические факторы; вероятностная модель; прогнозирование; риск недопоставок.

Для цитирования: Демкин И.В., Ковалев С.А., Митченко А.А., Шевченко А.В., Никонов И.М. Практика анализа риска в задачах надежности поставок природного газа с ценными компонентами на газоперерабатывающие и газохимические комплексы. Часть 2. Поставка этансодержащего газа // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 5. С. 36–49.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Risk Analysis Practice for Reliability of Supply of Natural Gas with Valuable Components to Gas Processing and Gas Chemical Complexes. Part 2. Ethane-Containing Gas Supply

Igor V. Demkin,
Sergey A. Kovalev,
Anton A. Mitchenko,
Gazprom VNIIGAZ,
Gazovikov str., 15/1, Razvilka,
Moscow reg., 142717, Russia

Andrey V. Shevchenko*,
Military Engineering Academy,
Karbyshv str., 2, Nakhbino,
Moscow Region, Krasnogorsk
District, 143432, Russia,

Igor M. Nikonov,
Lomonosov Moscow State
University
Leninsky Gory, 1, Moscow,
119991, Russia

Abstract

The article presents the results of research on ensuring the reliability of ethane-containing gas supplies to gas processing and gas chemical complexes over the years, taking into account uncertainty in gas production volumes and the content of valuable components in it from various sections of gas condensate fields in the Nadym-Pur-Taz region of Western Siberia.

Keywords: uncertainty factors; time delay; geological and technological factors; probabilistic model; forecasting; risk of under-delivery.

For citation: Demkin I.V., Kovalev S.A., Mitchenko A.A., Shevchenko A.V., Nikonov I.M. Risk analysis practice for reliability of supply of natural gas with valuable components to gas processing and gas chemical complexes. Part 2. Ethane-containing gas supply // Issues of Risk Analysis. 2024;21(5):36-49. (In Russ.).

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Сырьевая база этансодержащего газа
2. Настройка вероятностной модели изменения объемов добычи этансодержащего газа по месторождениям (залежам) сырьевой базы
3. Настройка вероятностной модели аварий на объектах добычи этансодержащего газа
4. Настройка вероятностной модели задержки плановых сроков нового строительства, проведения работ по реконструкции объектов добычи ЭСГ
5. Результаты анализа риска недопоставок этансодержащего газа на ГПИГХК с использованием настроенной стохастической динамической модели
6. Верификация динамической модели поставок ЭСГ на ГПИГХК

Заключение

Список источников

Введение

В настоящее время основным районом добычи газа в России является Надым-Пур-Тазовский регион (далее — НПТР) Западной Сибири, где сосредоточены крупные и уникальные по начальным запасам газа разрабатываемые месторождения. Однако на сегодняшний день базовые месторождения характеризуются высокой степенью выработанности начальных запасов газа по основным объектам разработки — сеноманским залежам. Одним из ключевых мероприятий по поддержанию добычи является ввод в эксплуатацию нижележащих отложений (в первую очередь, валанжинских и ачимовских залежей). В газе валанжинских и ачимовских отложений содержится значительное количество гомологов метана — этана, пропана, бутана и др. ценных компонентов, что обуславливает необходимость их извлечения, в первую очередь этана, в качестве ценного сырья в нефтехимической промышленности для производства полимеров.

С целью организации переработки растущих объемов добычи этансодержащего газа (далее — ЭСГ) предусматривается строительство газоперерабатывающих заводов — для извлечения ценных компонентов природного газа и газохимических заводов — для производства из них сырья для полимерной промышленности, как правило, в виде единого комплекса, объединяющего газопереработку и газохимию (далее — ГПиГХК). Стоимость таких комплексов по извлечению компонентов природного газа и производства полимерного сырья значительна, поэтому обеспечение надежности поставок ЭСГ на комплекс является приоритетом в деятельности ПАО «Газпром», как компании с высокой ответственностью за свою деятельность перед контрагентами. Исследование надежности поставок ЭСГ на ГПиГХК выполнено авторами на основе методологии анализа риска с использованием стохастической динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа, представленной в первой части настоящей статьи [1].

1. Сырьевая база этансодержащего газа

Основные запасы ЭСГ сосредоточены в первую очередь в ачимовских и валанжинских залежах Уренгойского НГКМ, а также в валанжинских залежах Ямбургского, Ен-Яхинского, Заполярного и ряда других месторождений. В НПТР, кроме введенных в эксплуатацию объектов добычи ЭСГ, расположены перспективные, не

разрабатываемые в настоящее время ачимовские и юрские залежи природного газа, запасы и состав которых позволяют использовать его в качестве сырьевого газа для газохимии. Наиболее перспективными объектами по величине ресурсной базы ЭСГ и содержанию в нем этановой фракции являются ачимовские и юрские залежи Ямбургского НГКМ, валанжинские, ачимовские и юрские залежи Песцового НГКМ, ачимовские залежи Падинского ГКМ, юрские залежи Уренгойского, Западно-Песцового месторождений и Тазовско-Заполярного лицензионного участка.

На надежность поставок ЭСГ на ГПиГХК могут оказывать негативное влияние факторы неопределенности различной природы, например, риски задержки строительства/реконструкции объектов добычи ЭСГ, риски аварии на объектах добычи, геолого-технологические риски. Негативное влияние данных рисков факторов носит случайный характер и может проявляться в возможных недопоставках на ГПиГХК части плановых объемов ЭСГ в отдельные периоды времени. Недопоставленные объемы ЭСГ в свою очередь могут привести к внеплановым затратам на выплату штрафов контрагентам, снижению плановой выручки и иным негативным последствиям.

С целью количественной оценки рисков недопоставок ЭСГ на ГПиГХК авторами была выполнена настройка разработанной динамической модели под конкретную схему добычи, сбора и подготовки к транспорту ЭСГ.

2. Настройка вероятностной модели изменения объемов добычи этансодержащего газа по месторождениям (залежам) сырьевой базы

Динамическая модель [1] позволяет учесть геолого-технологические неопределенности добычи ЭСГ, обусловленные, например:

- недостаточной изученностью залежей, высокой степенью неопределенности в геологическом строении и характере распределения параметров продуктивности в объеме пласта;
- неточностью геологической (фильтрационной) модели;
- просчетами, допущенными при проектировании и строительстве скважин;

- неспособностью оборудования участка принимать и подготавливать к дальнейшей транспортировке в полном объеме ЭСГ, параметры которого отклоняются от проектных показателей;

- ошибками проекта обустройства месторождения;
- потерями газа при добыче сверхнормативных величин.

Геолого-технологические неопределенности добычи ЭСГ в большой степени влияют на несоответствие фактических объемов добычи и подготовки газа (газа сепарации) при эксплуатации месторождений плановым объемам, добыча которых предусмотрена решениями, представленными в проектной документации на разработку и обустройство этого участка месторождения (далее — проект). В наибольшей степени геолого-технологические неопределенности добычи ЭСГ проявляются на начальном этапе эксплуатации участков месторождения, когда добываемые объемы ЭСГ могут быть значительно меньше объемов, предусмотренных проектной документацией. По результатам проведенного анализа отклонений фактических объемов добычи газа с участков ачимовских залежей Уренгойского НГКМ от проектных величин наибольшие отклонения наблюдаются в течение первых 12 лет с начала эксплуатации участков.

С использованием метода освоенного объема, рекомендованного международным стандартом *РМВок* [2], был определен вклад геолого-технологических факторов в разность между проектными объемами добычи газа сепарации и фактическими добываемыми объемами газа с участков ачимовских залежей. При этом вклад иных факторов (например, задержки строительства и реконструкции объектов добычи и др.) был также определен, но не учитывался формулой (1) с целью избежания двойного учета. Этот вклад, по данным эксплуатации ачимовских залежей Уренгойского месторождения, количественно оценен с использованием метода построения «квантиль-квантиль диаграмм» [3] в виде функции вероятностного распределения относительного влияния геолого-технологических факторов неопределенности добычи ЭСГ на начальном этапе эксплуатации месторождения $F_{\Pi}(x)$ длительность которого принята равной 12 годам. Эта функция описывается нормальным законом распределения:

$$F_{\Pi}(x) = P(X < x) = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x + 0,394}{0,092} \right) \right], \quad (1)$$

с математическим ожиданием, равным $-0,394$ отн. ед. (отклонение фактических объемов добываемого газа от проектных величин за 12 лет в среднем составило $-39,4\%$), и среднеквадратическим отклонением, равным $0,065$ отн. ед.

На последующих этапах эксплуатации месторождения (начиная с 2013 г., с момента ввода в эксплуатацию месторождения) влияние геолого-технологических факторов неопределенности добычи ЭСГ значительно снижается, так что относительные отклонения фактических объемов добычи газа от проектных значений становятся незначительными. Проведенный анализ динамики плановых и фактических объемов добычи газа сепарации валанжинских залежей по Уренгойскому месторождению позволил определить аналитическую функцию вероятностного распределения относительных отклонений фактических объемов добычи ЭСГ от прогнозных величин вследствие влияния геолого-технологических факторов неопределенности $F_{\Pi}(x)$ на более поздних этапах разработки этансодержащих залежей природного газа. Эта функция описывается следующим нормальным законом распределения:

$$F_{\Pi}(x) = P(X < x) = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{0,108} \right) \right], \quad (2)$$

с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением, равным $0,0769$ отн. ед.

Применение по годам эксплуатации залежей ЭСГ функций вероятностного распределения относительных отклонений фактических объемов добычи ЭСГ от проектных величин вследствие влияния геолого-технологических факторов неопределенности показано на рис. 1.

Для проведения расчетов по динамической модели дополнительно определены по фактическим данным лабораторий качества продукции Уренгойского ГКМ с использованием метода построения «квантиль-квантиль диаграмм» [3] функции распределения случайной величины, описывающей геолого-технологические неопределенности содержания этана в ЭСГ применительно к поставкам ЭСГ на ГПИГХК. Для валанжинских отложений функция имеет следующий логарифмически нормальный вид:

$$F(x) = P(X < x) = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 1,9224}{0,06389} \right) \right],$$

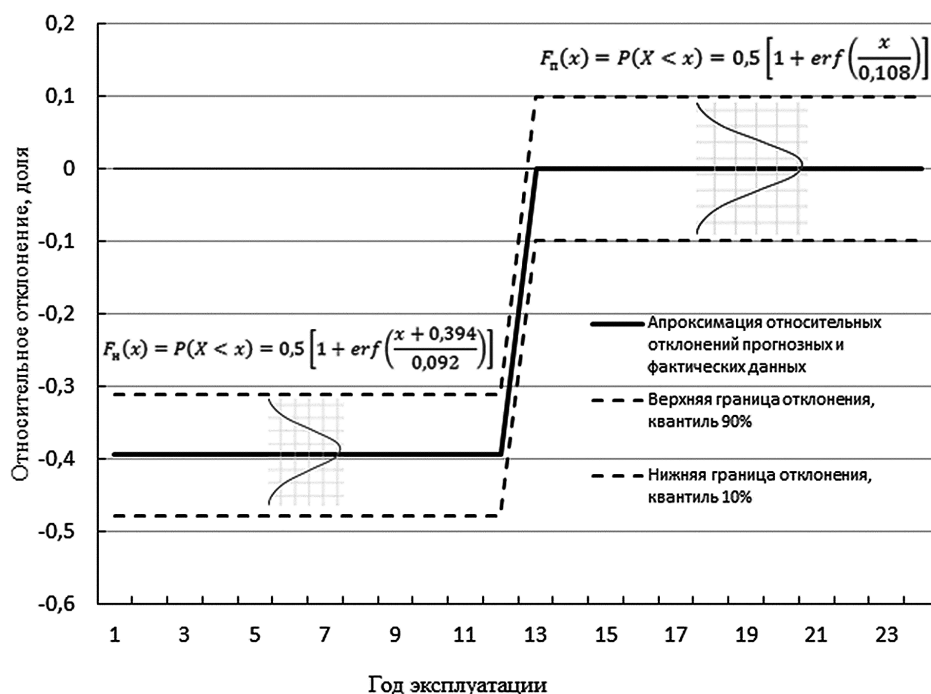


Рис. 1. Вероятностная модель изменения объемов добычи ЭСГ по месторождениям (залежам) сырьевой базы вследствие влияния геолого-технологических неопределенностей на начальном и последующих этапах эксплуатации месторождения (первым годом эксплуатации считается календарный год ввода месторождения в эксплуатацию)

Figure 1. Probabilistic model of changes in ECG production volumes for fields (reservoirs) of the raw material base due to the influence of geological and technological uncertainties at the initial and subsequent stages of field operation (the first year of operation is the calendar year of field commissioning)

с параметрами: математическое ожидание — 4,45 моляр. доля, %; среднеквадратическое отклонение — 0,201 моляр. доля, %. Для ачимовских отложений:

$$F(x) = P(X < x) = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 2,0913}{0,0181} \right) \right],$$

с параметрами: математическое ожидание — 8,1 моляр. доля, %; среднеквадратическое отклонение — 0,104 моляр. доля, %.

3. Настройка вероятностной модели аварий на объектах добычи этансодержащего газа

Вероятностная модель аварий на объектах добычи ЭСГ позволяет учесть неопределенности срока восстановления объектов добычи ЭСГ после аварий, в течение которого поставка ЭСГ по ветке сборной сети промысла, в которой присутствует аварийный объект, не производится.

В таблице представлен состав вероятностной модели аварий на объектах добычи ЭСГ, включающей параметры функций вероятностного распределения, описывающих сроки восстановления объектов добычи после аварий и частоты аварий на объектах добычи, определенные по результатам расследования аварий за период 2001–2020 гг.

4. Настройка вероятностной модели задержки плановых сроков нового строительства, проведения работ по реконструкции объектов добычи ЭСГ

Вероятностная модель задержки сроков нового строительства, проведения работ по реконструкции объектов добычи ЭСГ позволяет учесть неопределенности продолжительности задержки строительства (реконструкции) объектов добычи, в течение которого поставка ЭСГ по ветке сборной сети промысла, в которой

Таблица. Состав вероятностной модели аварий на объектах добычи ЭСГ

Table. Composition of the probabilistic accident model at ECG production facilities

Аварийный объект	Теоретический закон. Функция распределения сроков восстановления	Математическое ожидание, месяцы	Среднеквадратическое отклонение, месяцы	Частота аварий
Скважина, УКПГ	Логарифмически нормальный. $F(x) = P(X < x) =$ $= 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) + 1,9886}{3,4242} \right) \right]$	2,567	48,07	На одной скважине в год – 0,0000524. На УКПГ на одной линии в год – 0,00077
Газопровод-шлейф, газопровод-подключе- ния УКПГ к кол- лектору, коллектор	Логарифмически нормальный. $F(x) = P(X < x) =$ $= 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) + 3,6}{2,1524} \right) \right]$	0,087	0,263	0,000069 1/(год•км)

присутствует объект строительства с задержками сроков, не производится. В состав модели задержки сроков строительства (реконструкции) объектов добычи ЭСГ включены функции вероятностного распределения, описывающие сроки задержки строительства (реконструкции) объектов добычи ЭСГ. В основу определения функций вероятностного распределения, описывающих сроки задержки строительства (реконструкции) объектов ЭСГ, положены уточненные результаты частотного анализа негативных событий по строительным работам объектов добычи ЭСГ НПТР за период 2013–2018 гг.

С использованием метода построения «квантиль-квантиль диаграмм» [3] определена функция плотности логнормального распределения, описывающая задержки плановых сроков завершения строительства (реконструкции) скважин, задается формулой:

$$f(x) = \frac{0,4191}{x} \exp \left[-0,5519 (\ln(x) - 1,1362)^2 \right]. \quad (3)$$

Функция плотности логнормального распределения, описывающая задержки плановых сроков завершения строительства газопроводов подключения, определена формулой:

$$f(x) = \frac{0,5693}{x} \exp \left[-1,0183 (\ln(x) - 1,9136)^2 \right]. \quad (4)$$

Функция плотности логнормального распределения, описывающая задержки плановых сроков завершения строительства УКПГ, определена формулой:

$$f(x) = \frac{0,735}{x} \exp \left[-1,6974 (\ln(x) - 2,6377)^2 \right]. \quad (5)$$

Функция плотности логнормального распределения, описывающая задержки плановых сроков завершения реконструкции УКПГ (ДКС), определена формулой:

$$f(x) = \frac{0,4994}{x} \exp \left[-0,7836 (\ln(x) - 1,9017)^2 \right]. \quad (6)$$

В ходе проведенного авторами статьи исследования с применением статистической информации по ранее выполненным проектам строительства и реконструкции нефтегазовых объектов (в исследование было вовлечено 27 завершенных инвестиционных проектов), включая объекты добычи и привлечения экспертов, участвующих в управлении такими проектами. Установлено, что к основным факторам риска, оказывающим значимое влияние на увеличение плановых сроков завершения строительства/реконструкции объектов добычи ЭСГ, относятся:

- изменение условий поставки и комплектации материально-технических ресурсов (далее — МТР) и оборудования на стадии проектирования и/или изготовления оборудования, поставки и комплектации МТР, в том числе решение инвестора о директивном изменении типа применяемого оборудования или МТР поставки оборудования с характеристиками, отличными от ранее представленных в документации, повлекшие пересмотр плановых сроков завершения строительства объектов;
- необходимость импортозамещения технологического оборудования, программного обеспечения, что повлекло или может повлечь пересмотр плановых (проектных) сроков завершения строительства/реконструкции объектов.

5. Результаты анализа риска недопоставок этансодержащего газа на ГПиГХК с использованием настроенной стохастической динамической модели

Прогноз потенциально возможных объемов недопоставок ЭСГ

Произведя настройку динамической модели [1] и выполнив по ней расчеты, была получена по периодам поставок (в данном случае — год, но может быть и квартал, и месяц) динамика случайной величины (рис. 2), характеризующей объемы ожидаемых поставок ЭСГ на ГПиГХК в сопоставлении с плановыми объемами поставок ЭСГ по контракту (для определенности: объем поставки ЭСГ по контракту за один период равен 100 усл. ед. объема) и минимальным нештрафуемым объемом поставок ЭСГ за один период (для определенности авторами было сделано предположение, что минимальный нештрафуемый объем поставок ЭСГ на ГПиГХК за один период меньше контрактного объема поставки за тот же период на 7%).

Из данных рис. 2 следует, что в первые 10–12 периодов поставок возможно снижение объема поставок ЭСГ вследствие геолого-технологических неопределенностей добычи ЭСГ на начальном этапе эксплуатации месторождения (см. формулу (1)) и возможных задержек плановых сроков завершения строительства/реконструкции объектов добычи ЭСГ (возможны задержки плановых сроков строительства/реконструкции ряда объектов добычи до трех лет), в первую очередь таких объектов, как, например, установки комплексной подготовки газа (УКПГ), установки стабилизации конденсата (УСК) ачимовских залежей, задержки строительства газопроводов, подключения УКПГ к коллекторным линиям. По мере завершения строительства/реконструкции объектов добычи ЭСГ влияние фактора задержек сроков завершения строительства ослабевает. Установлено, что основной вклад в возможное снижение поставок ЭСГ на ГПиГХК в первые 10–12 периодов поставок вносят геолого-технологические неопределенности добычи ЭСГ для ряда участков ачимовских залежей Уренгойского

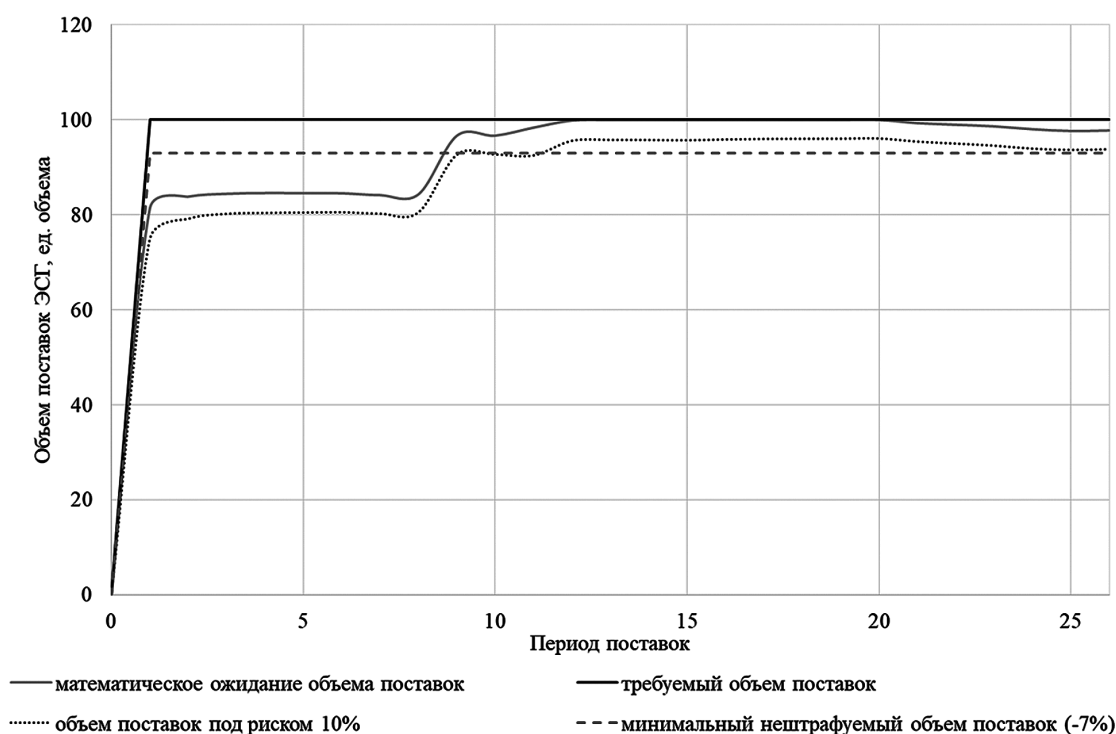


Рис. 2. Математические ожидания объемов поставок ЭСГ и объемы поставок ЭСГ под риском ($P = 10\%$) в сопоставлении с плановыми объемами поставок ЭСГ на ГПиГХК по периодам поставок

Figure 2. Mathematical expectations of ECG supply volumes and ECG supply volumes at risk ($P = 10\%$) in comparison with planned volumes of ECG supply to gas processing and gas chemical complexes by supply periods

месторождений. По мере освоения этих участков месторождений влияние геолого-технологических неопределенностей добычи ЭСГ снижается. На 8–10 периоды, а также на 21 период поставок ЭСГ предусмотрено подключение дополнительных участков месторождений в обеспечение необходимого объема поставок ЭСГ на ГПиГХК. В этот период также увеличиваются ожидаемые объемы недопоставок ЭСГ из-за возможных задержек плановых сроков завершения строительства объектов обустройства месторождений.

На рис. 3 представлены рассчитанные по модели штрафные объемы недопоставок ЭСГ на ГПиГХК, т.е. неотрицательная разница между минимальным нештрафуемым и прогнозируемым объемами поставок ЭСГ в расчетном периоде под риском ($P = 90\%$) по периодам поставки ЭСГ на ГПиГХК.

Из приведенных данных следует, что в условиях неопределенности без применения компенсирующих мероприятий возможно ожидать недопоставки части объемов ЭСГ выше допустимого предела недопоставок в первые 10–12 периодов реализации проекта.

Рассчитанные значения вероятности невыполнения контрактных обязательств по объемам поставки ЭСГ позволяют на основе Рекомендаций [4, 5] оценить значимость уровня риска недопоставки ЭСГ по годам для выработки мероприятий по управлению данным риском (рис. 4).

Авторы отмечают, что с целью снижения критических рисков следует разрабатывать мероприятия по управлению критическими рисками. Исходя из этого, было установлено, что мероприятия по компенсации возможных недопоставок ЭСГ следует предусмотреть в первые 8 периодов поставок ЭСГ.

Прогноз содержания этана в ЭСГ

Авторами было сделано предположение, что по технологическим причинам на ГПиГХК также необходимо обеспечить содержание этана в ЭСГ на уровне 6,57% (молярная доля) (далее требуемое содержание этана). Для простоты допустимое отклонение содержания этана в ЭСГ принято как $\pm 7\%$ от требуемого значения. Поэтому была проведена оценка влияния неопределенности при добыче ЭСГ с разных залежей месторождений на

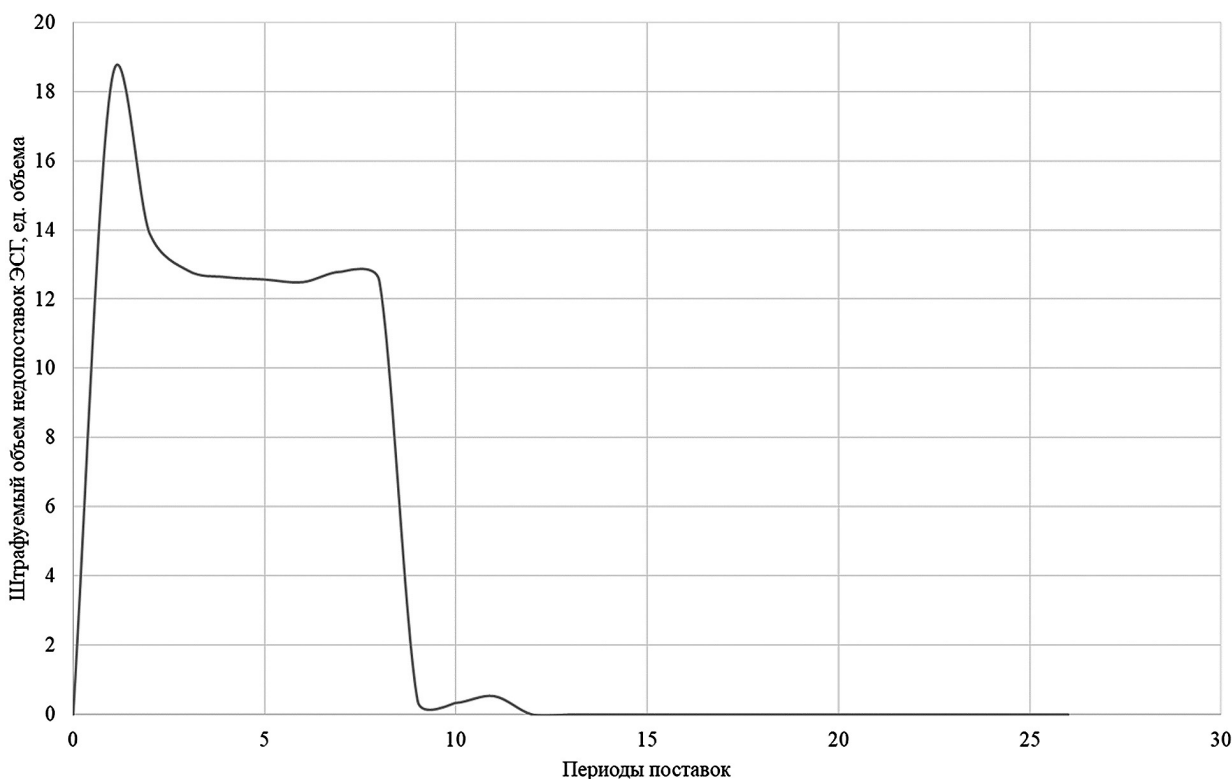


Рис. 3. Динамика штрафного объема недопоставки ЭСГ на ГПиГХК под риском ($P = 90\%$)

Figure 3. Dynamics of the penalized volume of short supply of ECG to gas processing and gas chemical complexes at risk ($P = 90\%$)

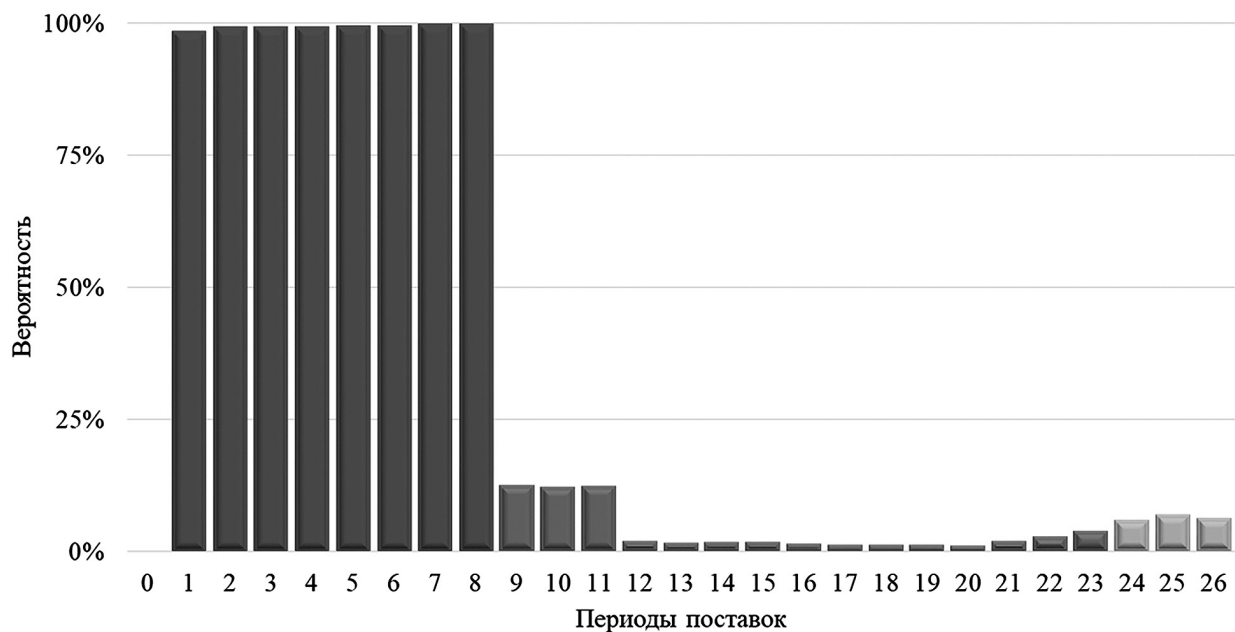


Рис. 4. Значимость уровня риска недопоставки ЭСГ на ГПиГХК по периодам поставок
Figure 4. The significance of the level of risk of short delivery of ECG to gas processing and gas chemical complexes by delivery periods

Периоды	Значимость уровня риска	Характеристика уровня риска
1–8	Риск критический – очень высокий	Превышает предельно допустимый уровень
	Риск критический – высокий	Превышает предельно допустимый уровень
9–11	Риск существенный – средний	Допустимый уровень риска
24–26	Риск существенный – низкий	Допустимый уровень риска
12–23	Риск несущественный – очень низкий	Не превышает пороговый уровень

содержание этана в поставляемом на ГПиГХК ЭСГ. На рисунке 5 графически показана по годам динамика параметров случайной величины, характеризующей содержание этана (ожидаемое значение и значение квантиля уровня 10%) в поставляемом на ГПиГХК ЭСГ, в сопоставлении с требуемым значением. Содержание этана в ЭСГ под риском определяется значением квантиля уровня $P = 10\%$ (нижняя граница) функции вероятностного распределения случайной величины, получаемой в ходе расчетов по модели и описывающей содержание этана в условиях неопределенности.

Оцененные вероятности отклонения содержания этана в ЭСГ ниже допустимого предела (-7%) не превышают $0,7\%$, что говорит о допустимом уровне риска поставки ЭСГ с возможным заниженным в нем содержанием этана.

Результаты анализа расчетных данных позволили ранжировать участки месторождений по их относительному вкладу в колебания содержания этана в ЭСГ по периодам поставок.

Факторный анализ недопоставок ЭСГ

Методической основой факторного анализа недопоставок ЭСГ на ГПиГХК является анализ чувствительности уровней возможных недопоставок объемов ЭСГ на ГПиГХК по месторождениям минерально-сырьевой базы и объектам добычи.

На рисунке 6 представлены результаты расчета влияния вышерассмотренных неопределенностей на объемы штрафующихся недопоставок ЭСГ под риском ($P = 90\%$) в разрезе участков (месторождений, залежей), которые рассматриваются как анализируемые факторы. Рассмотрены поставки с 13 участков, которым были присвоены номера с 1 по 13 включительно. В качестве показателя чувствительности объема недопоставок ЭСГ к факторам риска по участкам был выбран максимальный (с доверительной вероятностью 90%) объем штрафующихся недопоставок ЭСГ на ГПиГХК, то есть неотрицательная разность между минимальным нештрафуемым объемом поставок ЭСГ на ГПиГХК (в предположении авторов — 93% от

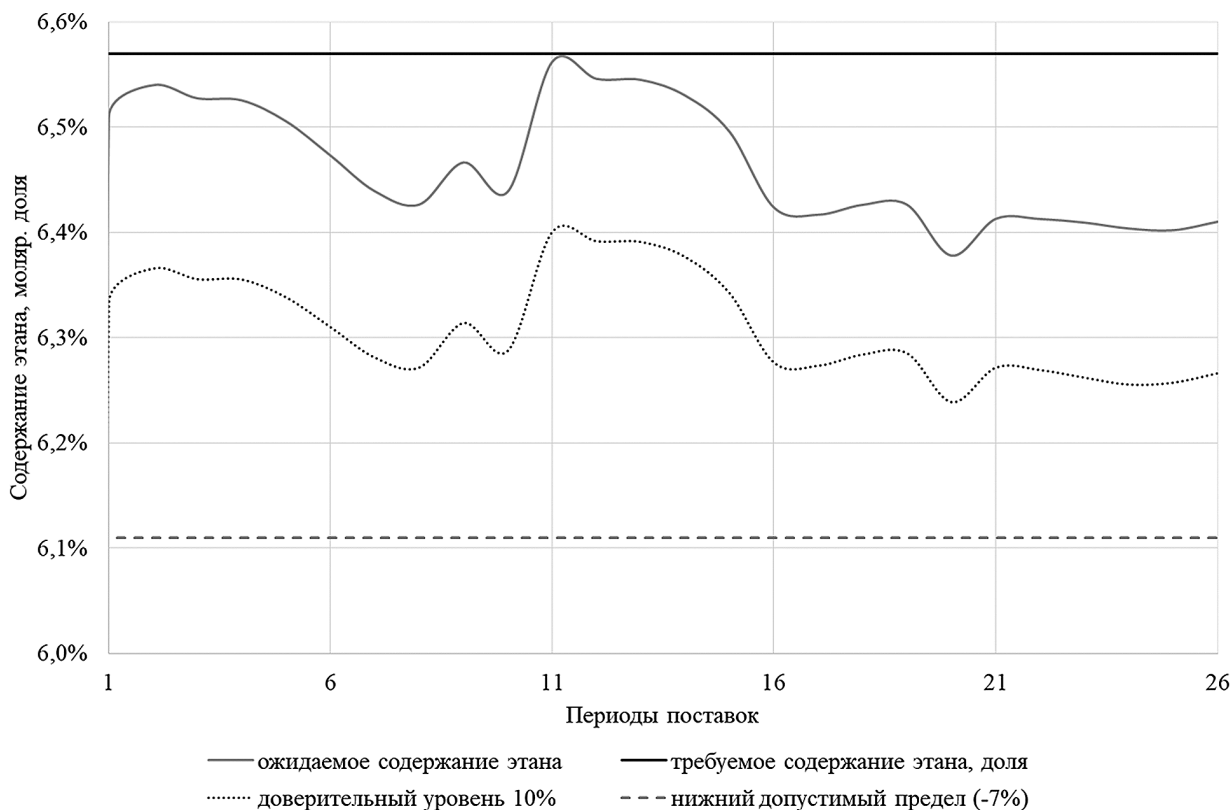


Рис. 5. Прогноз содержания этана в ЭСГ в сопоставлении с требуемыми значениями

Figure 5. Forecast of ethane content in the ECG against the required values

контрактного объема) и 10%-ным квантилем объема поставки ЭСГ по заданному участку.

Приведенные на рис. 6 данные позволяют провести ранжирование влияния участков на возможные недопоставки объемов ЭСГ на ГПиГХК. Результаты проведенного исследования показали, что в первые 10 периодов поставок ЭСГ на ГПиГХК участки месторождений располагаются следующим образом (от более значимого к менее значимому): участок 5, участок 4, участок 2. В районе 11 периода значимым становится подключаемый в этот период участок 11, а в последние проектные годы поставок — подключаемый в 21 период участок 12.

На рис. 7 представлены результаты расчета влияния неопределенностей, связанных с геолого-технологическими факторами, с задержкой плановых сроков строительства/реконструкции объектов добычи ЭСГ, а также с авариями на объектах добычи, на штрафные объемы возможных недопоставок ЭСГ под риском ($P = 90\%$).

Как следует из данных рис. 7, влияние неопределенности, обусловленной авариями, незначительно

ввиду низкой вероятности аварий на объектах добычи, за исключением аварий на УКПГ. Так, для расчетов приняты следующие показатели аварийности:

- частота аварий на одной скважине в год — 0,0000524;
- частота аварий на газопроводе-шлейфе или газопроводе подключения, или на участке коллекторов, $1/(\text{год} \cdot \text{км})$ — 0,000069;
- частота аварий на УКПГ на одной линии в год — 0,00077.

В противоположность им весомое влияние на возможные недопоставки ЭСГ на ГПиГХК оказывают неопределенности, связанные с геолого-технологическими факторами, особенно в первые 10 периодов поставок. Неопределенности, связанные с задержками строительства УКПГ, вносят существенный вклад в возможные недопоставки ЭСГ в первые 3 периода, а также в 12 и 13 периоды поставок. Неопределенности, связанные с задержками строительства газопроводов подключения, также вносят существенный вклад в возможные недопоставки ЭСГ в первые 2 периода и в 12 период поставок ЭСГ на ГПиГХК.

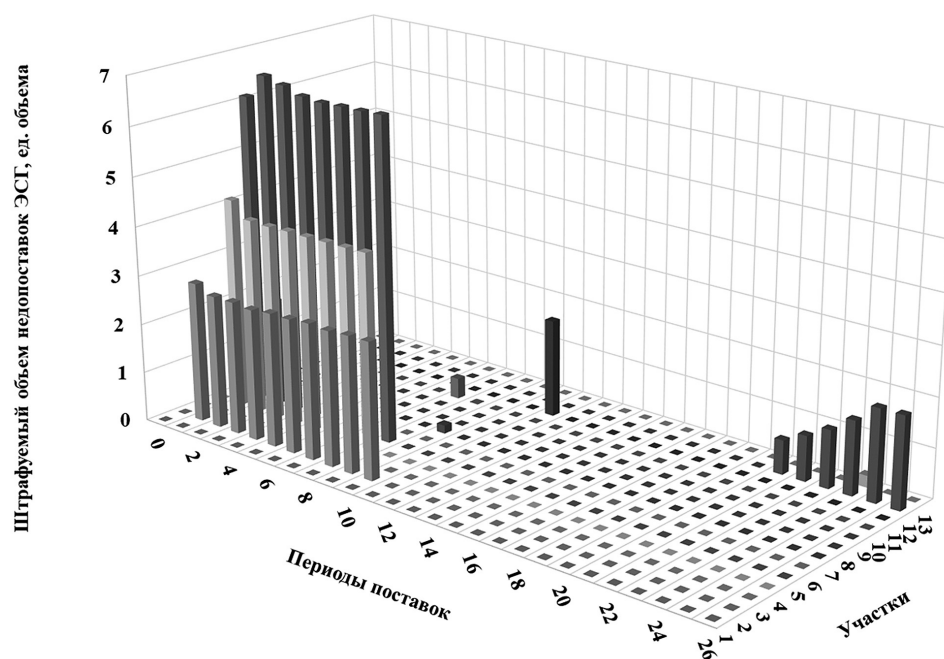


Рис. 6. Объемы штрафуемых недопоставок ЭСГ под риском ($P = 90\%$) в разрезе участков/месторождений

Figure 6. Volumes of penalized short-deliveries of ECG at risk ($P = 90\%$) by area/field

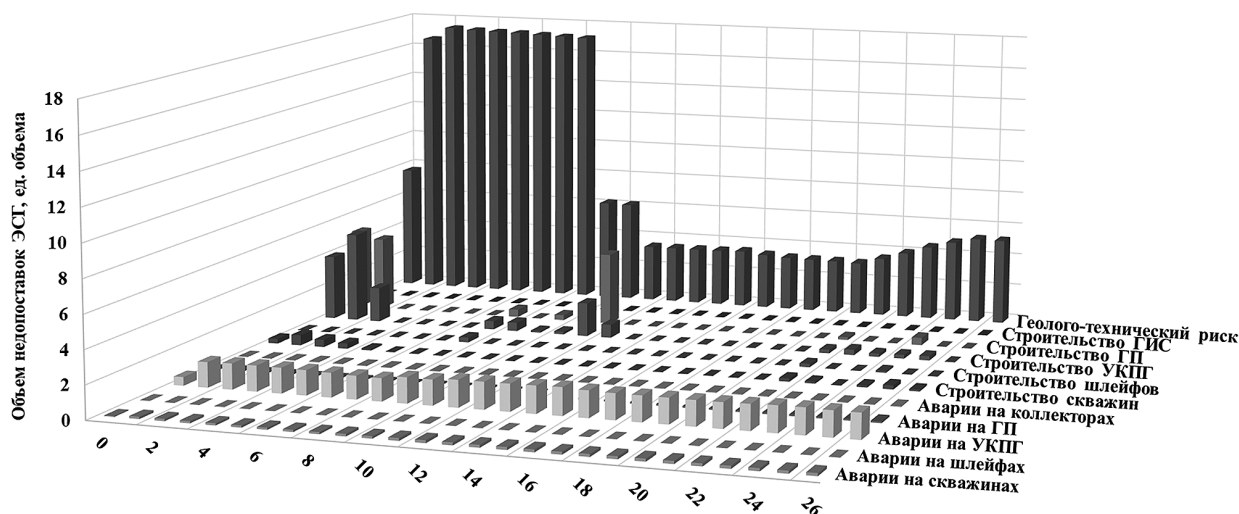


Рис. 7. Изменение объемов штрафуемых недопоставок ЭСГ под риском 90% в разрезе геолого-технологических неопределенностей, сроков устранения последствий аварий, а также задержек сроков строительства (реконструкции) объектов добычи ЭСГ

Figure 7. Change in the volume of penalized short-deliveries of ECG at a risk of 90% in the context of geological and technological uncertainties, the timing of eliminating the consequences of accidents, as well as delays in the construction (reconstruction) of ECG production facilities

6. Верификация динамической модели поставок ЭСГ на ГПиГХК

Верификация разработанной динамической модели поставок ЭСГ на ГПиГХК была выполнена путем сравнения полученных результатов с результатами, полученными методом имитационного моделирования. Оценки параметров вероятностных распределений показателей поставок объемов ЭСГ с одного участка по результатам 10 тыс. испытаний в имитационной модели в сравнении с аналогичными показателями разработанной авторами динамической модели представлены на рис. 8 и 9.

Проведенные расчеты показали, что использование динамической и имитационной моделей приводит к схожим оценкам вероятностного распределения объема поставок ЭСГ и массы этана в нем. В частности, относительное отклонение оценок одной модели от оценок другой модели математического ожидания объема поставок ЭСГ, в том числе массы этана, не превышает 10%. Для среднеквадратичного отклонения объема поставок ЭСГ относительная разница между оценками, полученными в разных моделях, не превышает 18%. Полученные расхождения в результатах объясняются использованием приближенного метода расчета (метод имитационного моделирования Монте-Карло) и недостаточным числом испытаний в ходе имитационного моделирования (для повышения точности расчетов показателей с использованием метода имитационного моделирования Монте-Карло необходимо существенно

увеличить число испытаний). Близость получаемых различными методами оценок свидетельствует в пользу адекватности разработанной динамической модели.

Таким образом, стохастическая динамическая модель прогнозирования недопоставок ЭСГ на ГПиГХК верифицирована методом имитационного моделирования Монте-Карло и может быть рекомендована для использования в проектах поставок многокомпонентного углеводородного сырья на комплексные предприятия по их переработке при анализе риска и обеспечении надежности поставок сырья.

Заключение

Полученные результаты исследования по прогнозированию недопоставок ЭСГ на ГПиГХК можно обобщить для любого многокомпонентного газа.

Представленные результаты расчетов по разработанной динамической модели прогнозирования недопоставок многокомпонентного газа (в том числе ЭСГ) на ГПиГХК позволяют с использованием рискованных показателей решать следующие задачи:

- ранжировать объекты добычи многокомпонентного газа по уровню их подверженности факторам неопределенности и, как следствие, по влиянию на возможные непоставки газа на ГПиГХК;
- прогнозировать временные периоды, наиболее подверженные влиянию различных факторов неопределенности;

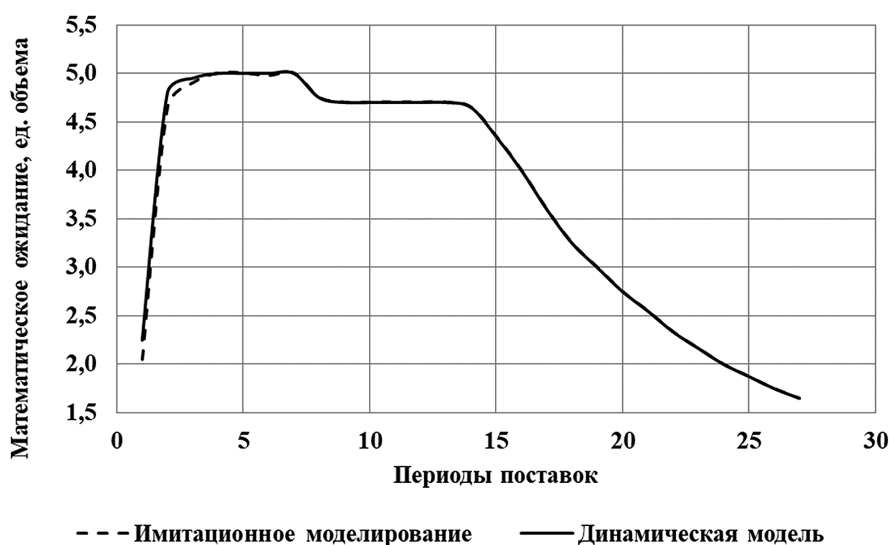


Рис. 8. Оценки математических ожиданий поставок объемов ЭСГ по периодам поставок

Figure 8. Estimates of mathematical expectations of supply of ECG volumes by supply periods

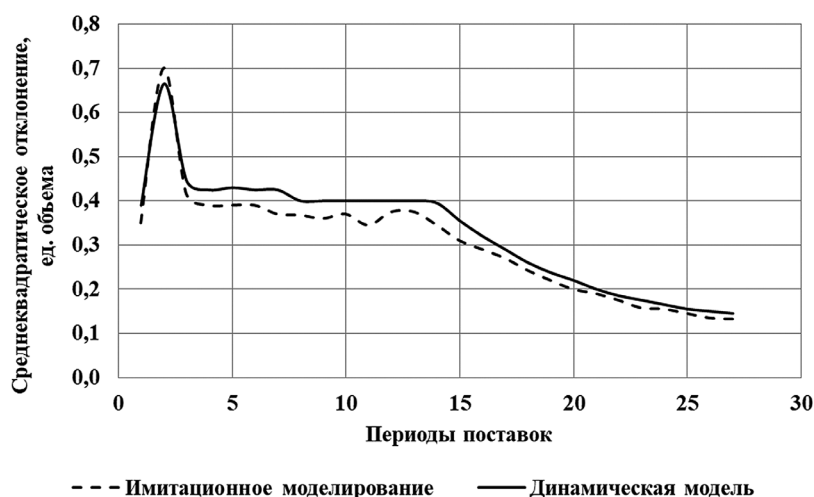


Рис. 9. Оценки среднеквадратичных отклонений объемов поставок ЭСГ по периодам поставок

Figure 9. Estimations of standard deviations of ESG supply volumes by supply periods

- прогнозировать временные периоды наиболее вероятного невыполнения обязательств по поставке многокомпонентного газа на ГПИГХК, определять вероятные причины такого невыполнения;
- оценивать надежность поставок объемов многокомпонентного газа и его отдельных компонентов, определять направления и временные рамки выработки мероприятий по управлению рисками недопоставок многокомпонентного газа на ГПИГХК.

С использованием разработанной авторами динамической модели прогнозирования недопоставок многокомпонентного газа на ГПИГХК была выполнена оценка экономической эффективности мероприятий по управлению рисками недопоставок многокомпонентного газа на ГПИГХК (далее — экономическая эффективность мероприятий). Для этих целей был актуализирован существующий методический аппарат оценки экономической эффективности инвестиционных проектов, основанный на вычислении денежных потоков, ожидаемого чистого дисконтированного дохода, например, представленный в Методических рекомендациях [6].

Актуализация методического аппарата была связана:

- с учетом в денежных потоках затрат на проведение мероприятий по управлению рисками;
- с учетом в денежных потоках снижения выручки за счет прогнозируемого уменьшения объемов поставок многокомпонентного газа и возможных штрафов за невыполнение контрактных обязательств по поставке многокомпонентного газа на ГПИГХК.

Экономическая эффективность мероприятий по управлению риском (перенос сроков ввода в эксплуатацию отдельных промыслов, переподключение промыслов к межпромысловым коллекторам и другие) оценивалась по разности дисконтированных денежных потоков для двух вариантов поставок продукции: при наличии мероприятий и при их отсутствии. в денежных потоках снижения выручки за счет прогнозируемого уменьшения объемов.

Список источников [References]

1. Демкин И. В., Ковалев С. А., Митченко А. А., Шевченко А. В., Никонов И. М. Практика анализа риска в задачах надежности поставок природного газа с ценными компонентами на газоперерабатывающие и газохимические комплексы. Часть 1. Стохастическое моделирование // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 4. С. 49–67 [Demkin I. V., Kovalev S. A., Mitchenko A. A., Shevchenko A. V., Nikonov I. M. Risk analysis practice for reliability of supply of natural gas with valuable components to gas processing and gas chemical complexes. Part 1. Stochastic modeling // Issues of Risk Analysis. 2024;21(4):49–67. (In Russ.)]
2. Свод знаний по управлению проектами, PMBoK, 7th Edition, PMI, 2021, раздел «Управление стоимостью проекта» [Project management body of knowledge, PMBoK, 7th Edition, PMI, 2021, Project Cost Management section]
3. Акимов В. А. Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения / В. А. Акимов, А. А. Быков, Е. Ю. Щетинин / М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. 536 с. ISBN 978-5-93970-037-5. EDN NCHAAR

- [Akimov V. A. Introduction to the statistics of extreme values and its applications/V.A. Akimov, A. A. Bykov, E. Yu. Shchetinin/- М.: VNII GOChS (FC) 2009. 536 с. ISBN 978-5-93970-037-5. EDN NCHAAAR. (In Russ.)]
4. Р Газпром 183–2021 «Корпоративная система управления рисками. Добыча газа и газового конденсата. Операционные риски. Идентификация и оценка [R Gazprom 183–2021 Corporate Risk Management System. Gas and gas condensate production. Operational risks. Identification and evaluation. (In Russ.)]
 5. Р Газпром 191–2021 «Корпоративная система управления рисками. Восполнение минерально-сырьевой базы. Операционные риски. Идентификация и оценка» [R Gazprom 191–2021 «Corporate Risk Management System. Replenishment of the mineral resource base. Operational risks. Identification and evaluation». (In Russ.)]
 6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция, исправленная и дополненная), утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21.06.1999, № ВК 477 [Guidelines for assessing the effectiveness of investment projects (second edition, revised and supplemented), approved by Ministry of Economy of the Russian Federation, Ministry of Finance of the Russian Federation and Gosstroy of the Russian Federation dated 21.06.1999, No. VK 477. (In Russ.)]

Сведения об авторах

Демкин Игорь Вячеславович: доктор экономических наук, начальник отдела, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Количество публикаций: более 80, в т.ч. монографий — 3, учебных изданий — 10

Область научных интересов: управление риском, управление проектами, логико-вероятностное моделирование

Контактная информация:

Адрес: 142717, Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1

i.demkin@mail.ru

Ковалев Сергей Андреевич: кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Количество публикаций: более 70

Область научных интересов: управление риском, механизмы проявления рисков событий, безопасность человека и окружающей среды, логико-вероятностное моделирование

Контактная информация:

Адрес: 142717, Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1

s.kovalev2006@mail.ru

Митченко Антон Александрович: младший научный сотрудник, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Количество публикаций: 4

Область научных интересов: управление риском

Контактная информация:

Адрес: 142717, Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1

antileo00@yandex.ru

Шевченко Андрей Владимирович: доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБВОУ ВО «Военно-инженерная ордена Кутузова академия имени Героя Советского Союза генерал-лейтенанта инженерных войск Д. М. Карбышева» (ФГБВОУ ВО «ВИА»)

Количество публикаций: более 110, в т.ч. монографий — 13, учебных изданий — 5

Область научных интересов: управление риском, теория безопасности человека и окружающей среды, теория гражданской обороны, химическая безопасность

Контактная информация:

Адрес: 143432, Московская область, г.о. Красногорск, р.п. Нахабино, ул. Карбышева, д. 2

Shevchenkoav@inbox.ru

Никонов Игорь Михайлович: кандидат физико-математических наук, доцент, МГУ им. М. В. Ломоносова

Количество публикаций: 84, в т.ч. монографий — 5, учебных изданий — 4

Область научных интересов: управление риском, маломерная топология

Контактная информация:

Адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

nim@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 02.02.2024

Одобрена после рецензирования: 06.06.2024

Принята к публикации: 28.06.2024

Дата публикации: 31.10.2024

The article was submitted: 02.02.2024

Approved after reviewing: 06.06.2024

Accepted for publication: 28.06.2024

Date of publication: 31.10.2024