

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 1. Стохастическое моделирование

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.\***,  
ЦНИИ ИВ  
Минообороны России,  
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 обеспечении надежности технологической цепочки поставок природного газа с ценными компонентами на газоперерабатывающие и газохимические комплексы (далее — ГПиГХК) большое значение отводится исследованию неопределенности при добыче и подготовке газа к магистральному транспорту. Учитывая, что снижение добывчных возможностей участков месторождений (промыслов) сырьевой базы ГПиГХК по разным причинам (факторам неопределенности) может приводить к неэффективным режимам работы технологических линий переработки газа на комплексе, возможной остановке производства и большим экономическим ущербам, исследования надежности поставок газа количественными методами, в частности с помощью математического моделирования, являются актуальными. В первой части статьи приводятся методический подход и разработанная авторами динамическая модель прогнозирования недопоставок объемов газа с участков месторождений. В основу методического подхода к количественной оценке возможных недопоставок газа кладется понимание того, что реализации факторов неопределенности, связанные с добывчей требуемых объемов газа с различных участков месторождений и получением газа сепарации с требуемым содержанием ценного компонента на установках комплексной подготовки газа к магистральному транспорту, носят стохастический характер. В рамках разработанной динамической модели объединены: вероятностная модель изменения объемов добывчи газа и содержания ценного компонента в нем по участкам месторождений сырьевой базы; вероятностная модель аварий на объектах добывчи газа; вероятностная модель задержки сроков нового строительства, проведения ремонтных работ и работ по реконструкции объектов добывчи газа. Представлены структура и математический аппарат разработанной динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа. Во второй части статьи приведены результаты исследования риска недопоставок этансодержащего газа на один из возможных ГПиГХК по разработанной динамической модели.

**Ключевые слова:** стохастический процесс; анализ риска; моделирование; вероятность; газоперерабатывающий комплекс; надежность поставок; природный газ.

**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 1. Стохастическое моделирование // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 4. С. 49–67.

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 1. Stochastic Modeling

**Igor V. Demkin,**  
**Sergey A. Kovalev,**  
**Anton A. Mitchenko,**  
Gazprom VNIIGAZ,  
Gazovikov str, 15/1, Razvilka,  
Moscow reg., 142717, Russia  
**Andrey V. Shevchenko\*,**  
Central Research Test Institute  
of Engineering Troops Ministry  
of Defense of the Russian  
Federation,  
Karbyshev str, 2, Nakhabino,  
Moscow Region, Krasnogorsk  
District, 143432, Russia,  
**Igor M. Nikonov,**  
Lomonosov Moscow State  
University  
Leninsky Gory, 1, Moscow,  
119991, Russia

### Abstract

In ensuring the reliability of the process supply chain of natural gas with valuable components for gas processing and gas chemical complexes (hereinafter referred to as GP&GCC), the study of uncertainty in the production and preparation of gas for trunk transport is of great importance. Considering that the decrease in production capacity of the fields of the GP&GCC raw material base due to various reasons (uncertainty factors) can lead to inefficient operation of gas processing lines at the complex, possible production shutdown and large economic damage, studies of the reliability of gas supplies by quantitative methods, in particular using mathematical modeling, are relevant. The first part of the article provides a methodological approach and a dynamic model developed by the authors for predicting the shortfall in gas volumes from field areas. The methodological approach to quantifying potential undersupply of gas is based on the understanding that the realization of uncertainty factors associated with the production of required volumes of gas from different areas of the fields and the production of separation gas with the required content of a valuable component in the plants of integrated gas preparation for trunk transport are stochastic in nature.

**Keywords:** stochastic process; risk analysis; modeling; probability; gas processing complex; supply reliability; natural gas.

**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 1. Stochastic modeling // Issues of Risk Analysis. 2024;21(4):49–67. (In Russ.).

The authors declare no conflict of interest.

### Содержание

Введение

1. Общая структура динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа
2. Математический аппарат динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа

Заключение

Список источников

## Введение

Газоперерабатывающий и газохимический комплекс — это промышленное предприятие, осуществляющее переработку природного или попутного газа, в котором присутствуют ценные компоненты (например: сероводород, гелий, этан, пропан, газовый конденсат), с целью получения на комплексе газохимической продукции с высокой добавленной стоимостью. Основным требованием к поставляемому на комплекс газу является высокое содержание ценных компонентов, обуславливающее экономическую выгоду всей цепочки технологических процессов по добыче и подготовке газа, транспортировке его на ГПиГХК и экономически эффективной работы перерабатывающих, в том числе газохимических, мощностей. Как и любая экономическая деятельность, переработка природного или попутного газа подвержена рискам различной природы. Риски недопоставок требуемых объемов газа, риски недостаточного содержания в нем ценных компонентов и, наконец, риски срыва или несвоевременности его поставок обусловливают возможность возникновения неблагоприятных событий, приводящих к снижению эффективности работы технологических линий переработки газа, остановке производства по выпуску газохимической продукции и большим экономическим ущербам. Поэтому исследование факторов неопределенности, влияющих на надежность поставок газа на ГПиГХК, на основе методологии анализа риска с целью выработки решений по управлению рисками недопоставок газа является актуальной научной проблемой. Эффективным инструментом в таких исследованиях является математическое моделирование. Например, в контексте анализа риска и управления цепями поставок рассматривается, как правило, моделирование риска недопоставок. Исследованиям в данном направлении посвящено множество работ. Так, в работах [1, 2] обсуждается методология оценки рисков в цепях поставок и дается обзор применяемых методов анализа рисков. Обзор подходов к оценке рисков поставок природного газа можно найти также в работе [3], включающей, помимо этого, качественный анализ и ранжирование рисков поставок газа на основе метода анализа иерархий. Основным инструментом описания поставок природного газа являются сетевые модели, которые позволяют решать, в том числе, задачи оптимизации направления поставок. При этом возникающие в процессе поставок риски могут быть оценены количественно с помощью

различных методов: от анализа чувствительности до имитационного моделирования. Возможность возникновения аварий на объектах добычи и транспорта газа многими исследователями рассматривается как один из основных факторов, определяющих надежность поставок природного газа [4]. Статистические характеристики рисковых событий, таких как аварии и инциденты, могут быть оценены на основе моделей функционирования отдельных элементов газотранспортной сети [5, 6]. Риски поставок природного газа, связанные с задержками ввода объектов газотранспортной сети, рассмотрены в обзоре [7]. Пример количественной модели риска задержки на основе регрессионного анализа приведен в работе [8]. В работах [9, 10] с помощью методов линейного программирования исследуется зависимость эффективности контрактов поставок продукции на энергетическом рынке от механизма начисления штрафов за недопоставки. В серии работ [11, 12] рассмотрена сетевая модель поставок природного газа, позволяющая минимизировать недопоставки газа путем перераспределения поставок. В работе [13] для идентификации и оценки операционных рисков добычи газа в нефтегазовом холдинге предложен метод нисходящего анализа. И все же, из приведенного материала видно, что в методическом обеспечении и в плане математического моделирования вопросы исследования рисков недопоставок газа с учетом технологической цепочки добычи и подготовки газа к транспорту на ГПиГХК остались освещенными в меньшей степени. Восполняя имеющийся пробел, авторами разработана математическая модель в стохастической постановке для исследования факторов неопределенности, влияющих на надежность поставок газа с цennыми компонентами на ГПиГХК (часть 1), и показаны особенности использования математической модели и инструментов анализа риска для оценки надежности поставки этансодержащего газа на один из возможных ГПиГХК (часть 2).

## 1. Общая структура динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа

Методический подход к количественной оценке возможных объемов недопоставок газа на ГПиГХК построен на принятии предположения, что процессы, связанные с добычей требуемых объемов газа с различных участков месторождений и получением на выходе

с установки комплексной подготовки газа к транспорту (УКПГ) газа сепарации с требуемым содержанием ценного компонента, имеют факторы неопределенности и носят стохастический характер. В качестве основных факторов неопределенности, влияющих на объемы недопоставок газа на ГПиГХК, выделены:

- геолого-технологические факторы, влияющие на изменение объемов добычи газа и содержание ценного компонента в нем, по месторождениям (залежам) сырьевой базы;
- аварии на объектах добычи газа;
- задержки сроков нового строительства, проведения ремонтных работ и работ по реконструкции объектов добычи газа.

По выделенным факторам неопределенности и соответствующим им, стохастическим процессам разработаны:

- вероятностная модель изменения объемов добычи газа по месторождениям (залежам) сырьевой базы;
- вероятностная модель аварий на объектах добычи газа;
- вероятностная модель задержки сроков нового строительства, проведения ремонтных работ и работ по реконструкции объектов добычи газа.

Эти вероятностные модели объединены в рамках единой динамической модели оценки объемов

недопоставок газа на ГПиГХК по годам поставки газа (рис. 1). Разработка данной модели выполнена на основе алгебры случайных величин теории вероятностей [14], позволяющей получать математически точные модели в отличие от имитационного моделирования стохастических процессов.

В динамической модели используется следующая принципиальная схема добычи, сбора и подготовки к транспорту газа с промыслов (рис. 2).

Объемы добычи газа со скважин участка промыслов направляются через систему газопроводов-шлейфов (ГШ) сборной сети данного участка к конкретной УКПГ, где из поступающего сырья от скважин выделяется газ сепарации, который соответствующим образом готовится к магистральной транспортировке. Подготовленный к транспорту газ через газопровод подключения (ГП) направляется в газосборный межпромысловый коллектор для подачи на газоизмерительную станцию (ГИС) и далее на головную компрессорную станцию (ГКС). Предполагается, что структура системы сбора и подготовки к транспортировке газа является древовидной: каждая скважина поставляет газ только на один газопровод-шлейф, каждый газопровод-шлейф связан только с одной УКПГ, УКПГ в каждый период времени поставляет газ только по одному направлению



Рис. 1. Структура динамической (вероятностной) модели прогнозирования объемов недопоставок газа на ГПиГХК

Figure 1. Structure of dynamic (probabilistic) model for prediction of gas underdelivery volumes at GP&GCC

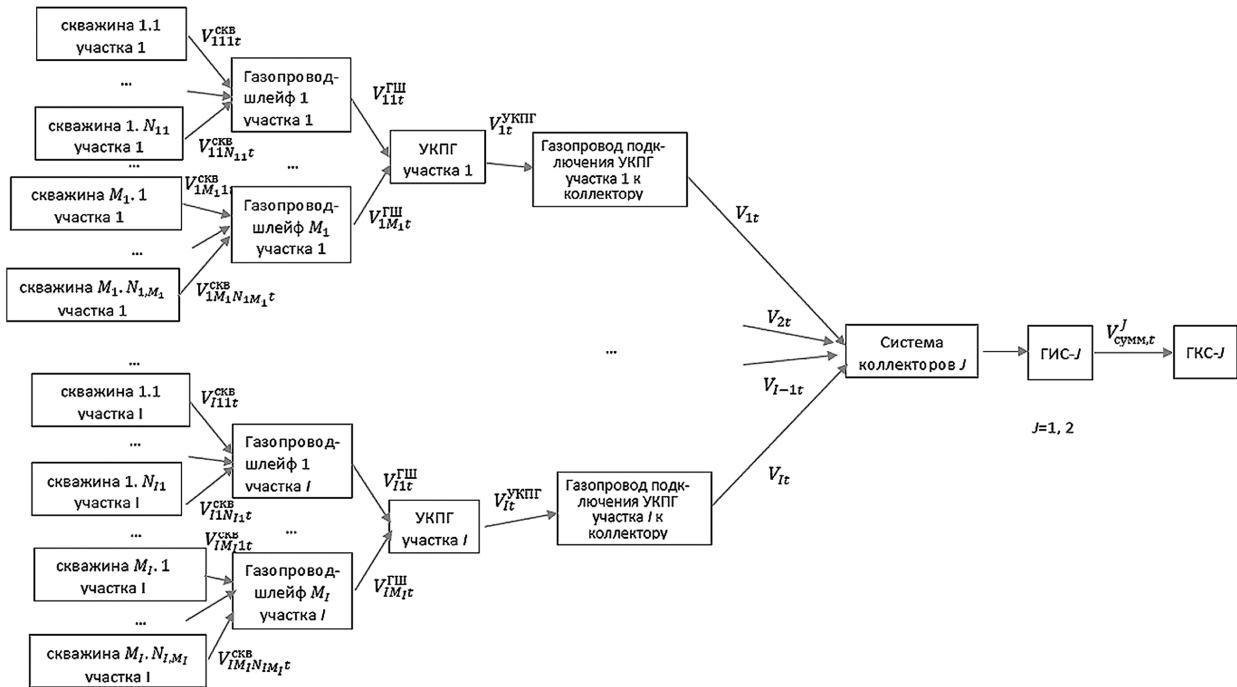


Рис. 2. Принципиальная схема добычи, сбора и подготовки к транспорту газа с промыслов

Figure 2. Flow chart of gas production, collection and preparation to transport from fields

(т.е. через один из коллекторов на конкретную ГИС и ГКС).

Основными неопределенностями, обуславливающими отклонение фактических объемов поставок газа, количества и содержания ценного компонента в газе от запланированных / проектных значений, являются:

- геолого-технологические неопределенности добычи газа, связанные с наблюдаемыми отклонениями фактических объемов добычи газа сепарации на конкретном участке добычи газа от запланированных / проектных значений, вызванными, например, неверной оценкой производительности скважин конкретного участка промысла по газу сепарации (риск объемов добычи газа сепарации);

- геолого-технологические неопределенности, связанные с отклонениями содержания ценного компонента в газе сепарации от проектных значений, а также обусловленные погрешностями измерительных приборов и процедур проведения измерений по компонентному составу газа (риск содержания ценного компонента);

- неопределенность срока ввода объектов в эксплуатацию после завершения строительства / реконструкции объектов промыслов (риск задержки

сроков строительства / реконструкции): скважин, газопроводов-шлейфов, УКПГ, газопроводов подключения к коллектору и ГИС;

- неопределенности продолжительности периода восстановления после аварий (риск аварий) объектов промыслов: скважин, газопроводов-шлейфов, УКПГ, газопроводов подключения к коллектору и ниток коллектора.

Воздействие факторов неопределенностей на снижение объемов поступающего на ГПиГХК газа / ценного компонента в газе предполагается независимым друг от друга и независимым по времени. Влияние факторов неопределенностей носит рисковый характер и проявляется мультипликативно, а именно, реализация каждого фактора неопределенности сокращает запланированный / прогнозируемый объем поставляемого газа на некоторую случайную долю. В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей [14] итоговые объемы поставок газа и ценного компонента ( $V_t^r$  и  $V_t^{цк}$ ), являющиеся результатом взаимодействия многих независимых мультипликативных случайных факторов, можно считать случайными величинами с логнормальным вероятностным распределением. Содержание ценного

компонентом в газе, как отношение данных логнормальных случайных величин, также распределено по логнормальному закону.

Разработанная динамическая модель недопоставок газа на ГПиГХК позволяет выполнить по годам количественную оценку рисков нарушения контрактных условий поставок газа на ГПиГХК, а именно, оценить вероятность нарушения в году  $t$  контрактных обязательств по объему поставляемого газа, процентному содержанию и массе ценного компонента, например, этана.

Входными данными динамической модели являются:

1) структура системы сбора и подготовки к транспортировке газа: число участков, количество газопроводов-шлейфов и скважин на участках, даты ввода объектов добычи, протяженность газопроводов и др.;

2) динамика планируемых / прогнозируемых объемов поставок газа, например, в виде детерминированной модели поставок газа по годам;

3) данные проектов (контрактов) по поставкам газа на ГПиГХК;

4) выбранные сценарии развития негативных событий;

5) статистические параметры (ожидаемое значение и среднеквадратичное отклонение) факторов неопределенности:

- параметры случайного процесса, связанного с геолого-технологическими неопределенностями, влияющими на объемы добычи газа;

- параметры случайного процесса, связанного с задержкой строительства (реконструкции) объектов добычи газа;

- параметры случайного процесса, связанного с геолого-технологическими неопределенности, влияющими на содержание ценного компонента в газе;

- параметры случайного процесса продолжительности восстановления функционирования объектов добычи газа после аварий.

Основными выходными данными разработанной динамической модели являются:

- ожидаемые значения и доверительные интервалы объемов поставок газа на ГПиГХК, содержания и количества ценного компонента по годам;

- ожидаемые значения и доверительные интервалы недопоставок газа на ГПиГХК, а также отклонения содержания ценного компонента по годам;

- вероятность нарушения контрактных обязательств по объему поставок газа на ГПиГХК,

содержанию и количеству ценного компонента по годам.

Расчет по динамической модели производится следующим образом. Сначала в соответствии с детерминированной моделью объемов поставок газа сепарации на ГПиГХК составляется детерминированный прогноз объемов поставок газа и содержания ценного компонента по участкам месторождений и годам поставок, в том числе с учетом периодов падающей добычи. Далее последовательно добавляются факторы неопределенности и пересчитываются математическое ожидание и дисперсия объемов поставок газа с учетом добавленных факторов. Факторы вводятся в динамическую модель в следующем порядке:

а) геолого-технологические неопределенности добычи газа;

б) риск задержки ввода в эксплуатацию скважин и риск аварии на скважинах;

в) риск задержки ввода в эксплуатацию газопроводов-шлейфов и риск аварии на газопроводах-шлейфах;

г) риск задержки ввода УКПГ и риск аварии на УКПГ;

д) риск задержки ввода в эксплуатацию газопровода подключения и риск аварии на газопроводе подключения;

е) риск аварии в системе коллекторов;

ж) риск задержки ввода в эксплуатацию ГИС.

Следующим шагом расчета является оценка по полученным статистическим параметрам объемов поставок газа и колебаний содержания ценного компонента в нем параметров вероятностного распределения (математического ожидания и дисперсии) массы поставляемого на ГПиГХК ценного компонента.

В конце расчета вычисляются следующие результатирующие стохастические показатели:

- объемы поставок газа на ГПиГХК под риском ( $P=10\%$ ),

- содержание ценного компонента в газе, поставляемого на ГПиГХК под риском ( $P = 10\%$ ),

- штрафуемые объемы недопоставок газа на ГПиГХК под риском ( $P = 90\%$ ),

- штрафуемая масса недопоставленного на ГПиГХК ценного компонента под риском ( $P = 90\%$ ),

- вероятности нарушения контрактных обязательств.

## 2. Математический аппарат динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа

Математический аппарат динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа сгруппирован по следующим блокам:

- условные обозначения;
- основные формулы модели;
- формулы для учета влияния факторов неопределенности на объемы поставок газа и ценного компонента;
- формулы для расчета показателей вероятностного распределения (математического ожидания и дисперсии) объемов поставок газа на ГПиГХК и массы ценного компонента;
- формулы для расчета показателей вероятностного распределения содержания ценного компонента;
- формулы для расчета вероятностей невыполнения контрактных обязательств по поставкам газа на ГПиГХК: по объему газа, массе и содержанию ценного компонента;
- вероятностная модель изменения объемов добычи газа и содержания ценного компонента в нем по месторождениям (залежам) сырьевой базы;
- вероятностная модель оценки влияния аварий на объектах добычи газа на изменения объемов газа и содержания ценного компонента в газе;
- вероятностная модель влияния задержек сроков нового строительства, проведения ремонтных работ и работ по реконструкции объектов добычи газа на изменения объемов газа и содержания ценного компонента в газе;
- модель выбора рационального варианта компенсирующих мероприятий.

### Блок «Условные обозначения»

В математической модели прогнозирования объемов недопоставок газа на ГПиГХК используются следующие обозначения.

#### 1) Индексы:

$J$  — направление поставок (например,  $J = 1$  для поставок газа на ГПиГХК № 1, и  $J = 2$  для поставок газа на ГПиГХК № 2);

$I$  — число участков промыслов;

$M_i$  — число газопроводов-шлейфов сборной сети  $i$ -го участка,  $1 \leq i \leq I$ ;

$N_{im}$  — число скважин, подключаемых к  $m$ -му газопроводу-шлейфу сборной сети  $i$ -го участка,  $1 \leq i \leq I$ ,  $1 \leq m \leq M_i$ .

#### 2) Объемы:

$V_{\text{сумм}, t}^J$  — суммарный возможный объем поставок газа на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$V_{\text{недопст}, t}^J$  — суммарный возможный объем недопоставок газа на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$V_{\text{колл}, t}^J$  — возможное значение объема поставок газа через систему коллекторов на ГИС в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$V_{it}^J$  — возможное значение объема поставок газа через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период  $t$ ;

$V_{it}^{\text{УКПГ}}$  — возможное значение объема поставок газа через УКПГ  $i$ -го участка на газопровод подключения к коллектору в период  $t$ ;

$V_{int}^{\text{ГШ}}$  — возможное значение объема газа сепарации, относящегося к поставкам через  $m$ -й газопровод — шлейф  $i$ -го участка на вход УКПГ участка в период  $t$ ;

$V_{imt}^{\text{СКВ}}$  — возможное значение объема газа сепарации, относящегося к поставкам с  $n$ -й скважине, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, на газопровод — шлейф в период  $t$ ;

$V_{imt}^{\text{доб}}$  — возможное значение объема газа сепарации, относящегося к добыче на  $n$ -й скважине, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$ ;

$V_{imt}^{\text{база}}$  — прогнозный объем газа сепарации на участке, приходящийся на  $n$ -ю скважину, подключаемую к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, при отсутствии реализованных рисковых ситуаций;

$V_{\text{сумм}, t}^{\text{ЦК}, J}$  — суммарный возможный объем поставок ценного компонента на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$V_{it}^{\text{ЦК}}$  — возможное значение объема поставок ценного компонента через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период  $t$ .

#### 3) Масса:

$M_{\text{сумм}, t}^{\text{ЦК}, J}$  — суммарная возможная масса поставок ценного компонента на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$M_{\text{недопст}, t}^{\text{ЦК}, J}$  — суммарная возможная масса недопоставок ценного компонента на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ .

#### 4) Содержание:

$C_{\text{сумм}, t}^{\text{ЦК}, J}$  — возможное содержание ценного компонента в газе на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$C_{\text{недопост}, t}^{\text{ЦК, } J}$  — суммарное возможное отклонение от предусмотренного контрактом содержания ценного компонента в газе на ГПиГХК ( $C'_{\text{контр}, J}$ ) в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ ;

$C_{it}^{\text{ЦК}}$  — возможное содержание ценного компонента в газе сепарации на  $i$ -м участке в период  $t$ .

5) Доли снижения поставок:

$B_t^{\text{вв.ГИС, } J}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа на ГПиГХК в период  $t$  по направлению поставок  $J$  в результате задержки сроков завершения строительства / реконструкции ГИС;

$B_t^{\text{ав.колл}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа через систему коллекторов на ГИС в период  $t$  в результате аварии на системе коллекторов;

$B_{it}^{\text{вв.ГП}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период  $t$  в результате задержки сроков завершения строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ участка к коллектору;

$B_{it}^{\text{ав.ГП}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период  $t$  в результате аварии на газопроводе подключения УКПГ участка к коллектору;

$B_{it}^{\text{вв.УКПГ}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа с УКПГ  $i$ -го участка на газопровод подключения к коллектору в период  $t$  в результате задержки сроков завершения строительства / реконструкции УКПГ участка;

$B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа с УКПГ  $i$ -го участка на газопровод подключения к коллектору в период  $t$  в результате аварии на УКПГ участка;

$B_{int}^{\text{вв.ГШ}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа через  $m$ -й газопровод — шлейф сборной сети  $i$ -го участка на вход УКПГ участка в период  $t$  в результате задержки сроков завершения строительства / реконструкции участков газопровода — шлейфа;

$B_{int}^{\text{ав.ГШ}}$  — доля снижения поставок объема газа через  $m$ -й газопровод — шлейф сборной сети  $i$ -го участка на вход УКПГ участка в период  $t$  в результате аварии на газопроводе — шлейфе;

$B_{intm}^{\text{вв.СКВ}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа с  $n$ -й скважиной, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$  в результате задержки сроков ввода скважины в эксплуатацию после строительства;

$B_{intm}^{\text{ав.СКВ}}$  — возможное значение доли снижения объема поставок газа с  $n$ -й скважиной, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$  в результате аварии на скважине.

6) Случайные величины, характеризующие реализацию факторов неопределенности:

$I_{\text{ГИС, } J}^{\text{ав.}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение задержки завершения строительства ГИС по направлению поставок, безразмерная величина;

$I_t^{\text{ав.колл}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение аварии в системе коллекторов в период  $t$ , безразмерная величина;

$I_i^{\text{ав.ГП}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение задержки сроков завершения строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ  $i$ -го участка к коллектору, безразмерная величина;

$I_{it}^{\text{ав.ГП}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение задержки сроков завершения строительства / реконструкции УКПГ  $i$ -го участка в период  $t$ , безразмерная величина;

$I_i^{\text{ав.УКПГ}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение задержки сроков завершения строительства / реконструкции УКПГ  $i$ -го участка, безразмерная величина;

$I_{im}^{\text{ав.ГШ}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение задержки сроков завершения строительства / реконструкции участков  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка, безразмерная величина;

$I_{int}^{\text{ав.ГШ}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая наступление аварии на участке  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка в период  $t$ , безразмерная величина;

$I_{intm}^{\text{ав.СКВ}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая возникновение задержки сроков ввода в эксплуатацию  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, безразмерная величина;

$I_{intm}^{\text{ав.СКВ}}$  — случайная величина Бернулли, характеризующая наступление аварии на  $n$ -й скважине, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$ , безразмерная величина.

7) Случайные величины, характеризующие масштаб реализации факторов неопределенности:

$X_{int}^{доб}$  — возможное относительное отклонение объема газа сепарации, относящегося к добыче на  $n$ -й скважине, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$  от прогнозного значения вследствие геолого-технологических неопределенностей, безразмерная величина;

$X^{ГИС,J}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение длительности задержки строительства ГИС по направлению поставок  $J$ , месяц;

$X^{ав.колл}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности устранения последствий аварии на системе коллекторов, месяц;

$X_i^{вв.ГП}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности задержки строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ  $i$ -го участка к коллектору, месяц;

$X_i^{ав.УКПГ}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности задержки строительства / реконструкции УКПГ  $i$ -го участка, месяц;

$X_i^{ав.УКПГ}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности устранения последствий аварии на УКПГ  $i$ -го участка, месяц;

$X_{im}^{вв.ГШ}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности задержки строительства / реконструкции участков  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка, месяц;

$X_{im}^{ав.ГШ}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности устранения последствий аварии на участках  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка, месяц;

$X_{inn}^{вв.СКВ}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности задержки сроков ввода в эксплуатацию  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, месяц;

$X_{inn}^{ав.СКВ}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение продолжительности устранения последствий аварии на  $n$ -й скважине, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, месяц;

$X_{it}^{ЦК}$  — случайная величина, характеризующая вероятностное распределение содержания ценного компонента в газе  $i$ -го участка, в период  $t$ , моляр. доля,%.

8) Планируемые даты ввода объектов:

$t^{ГИС,J}$  — плановая дата завершения строительства ГИС по направлению поставок  $J$ , число.месяц.год;

$t_i^{вв.ГП}$  — плановая дата завершения строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ  $i$ -го участка к коллектору, число.месяц.год;

$t_i^{вв.УКПГ}$  — плановая дата завершения строительства / реконструкции УКПГ  $i$ -го участка, число.месяц.год;

$t_{im}^{вв.ГШ}$  — плановая дата завершения строительства / реконструкции участков  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка, число.месяц.год;

$t_{inn}^{ав.СКВ}$  — плановая дата ввода в эксплуатацию  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, число.месяц.год.

9) Параметры случайных величин:

$P^{вв.ГИС,J}$  — вероятность возникновения задержки завершения строительства ГИС по направлению поставок  $J$ , безразмерная величина;

$P_t^{ав.колл}$  — вероятность возникновения аварии на системе коллекторов в период  $t$ , безразмерная величина;

$P_i^{вв.ГП}$  — вероятность возникновения задержки сроков завершения строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ  $i$ -го участка к коллектору, безразмерная величина;

$P_{it}^{ав.ГП}$  — вероятность возникновения аварии на газопроводе подключения УКПГ  $i$ -го участка к коллектору в период  $t$ , безразмерная величина;

$P_i^{ав.УКПГ}$  — вероятность возникновения задержки сроков завершения строительства / реконструкции УКПГ  $i$ -го участка, безразмерная величина;

$P_{it}^{ав.УКПГ}$  — вероятность возникновения аварии на УКПГ  $i$ -го участка в период  $t$ ;

$P_{im}^{вв.ГШ}$  — вероятность возникновения задержки сроков завершения строительства / реконструкции участков  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка, безразмерная величина;

$P_{inn}^{ав.ГШ}$  — вероятность возникновения аварии на участке  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка в период  $t$ , безразмерная величина;

$P_{imt}^{\text{бв.скв}}$  — вероятность возникновения задержки сроков ввода в эксплуатацию  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, безразмерная величина;

$P_{imt}^{\text{ав.скв}}$  — вероятность возникновения аварии на  $n$ -й скважине, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$ , безразмерная величина.

10) Параметры участков:

$T_i^{\text{экспл}}$  — дата ввода  $i$ -го участка в эксплуатацию, число.месяц.год;

$Q_{it}^{\Gamma,J}$  — проектный объем поставок газа на ГПиГХК с  $i$ -го участка в период  $t$  по направлению  $J$  в соответствии с детерминированной моделью объемов поставок газа, куб. м;

$n_{it}^{\text{скв}}$  — ожидаемый по проекту фонд действующих скважин  $i$ -го участка в период  $t$ , ед.;

$n_{imt}^{\text{бв.скв}}$  — ожидаемый по проекту фонд скважин  $i$ -го участка, вводимых в период  $t$ , ед.;

$L_{im}^{\text{ГШ}}$  — протяженность  $m$ -го газопровода — шлейфа сборной сети  $i$ -го участка, км;

$L_i^{\text{ГП}}$  — протяженность газопровода подключения  $i$ -го участка, км.

11) Параметры объектов:

$\lambda^{\text{ГП}}$  — удельная частота аварий для газопровода — шлейфа сборной сети, 1/(км·год);

$\lambda^{\text{ГШ}}$  — удельная частота аварий для газопровода подключения, 1/(км·год);

$\lambda^{\text{колл}}$  — удельная частота аварий в системе коллекторов, 1/(км·год);

$\lambda^{\text{УКПГ}}$  — удельная частота аварий на УКПГ на одной линии, 1/(линия·год);

$\lambda^{\text{скв}}$  — удельная частота аварий на скважине, 1/(скв.год);

$L^{\text{колл}}$  — протяженность системы коллекторов, км;

$n_{\text{УКПГ}}$  — число линий на УКПГ, ед.;

$\delta^{\text{колл}}$  — коэффициент остаточной средней производительности коллекторов при аварии, безразмерная величина;

$\gamma^{\text{УКПГ}}$  — удельный объем недопоставок газа при задержке ввода УКПГ, безразмерная величина.

12) Параметры проектов (контрактов):

$V_{\text{контр}, t}^{\Gamma, J}$  — предусмотренный проектом (контрактом) объем поставок газа на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ , куб. м;

$M_{\text{контр}, t}^{\text{цк}, J}$  — предусмотренная проектом (контрактом) масса поставок ценного компонента на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ , тонн;

$C_{\text{контр}, t}^J$  — предусмотренное проектом (контрактом) содержание ценного компонента в газе на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$ , моляр. доля, %;

$\Delta_{\text{пост}}^J$  — допустимые относительные отклонения поставок газа / ценного компонента на ГПиГХК по направлению  $J$ , безразмерная величина;

$\Delta_{\text{сад}}^J$  — допустимые относительные отклонения содержания ценного компонента в газе при поставках на ГПиГХК по направлению  $J$ , безразмерная величина.

13) Прочие параметры:

$\rho_{\text{цк}}$  — плотность ценного компонента, кг/м<sup>3</sup>.

### Блок «Основные формулы модели»

Суммарный возможный объем поставок газа вычисляется по следующим формулам.

Планируемые объемы поставок газа сепарации в расчете на одну скважину:

$$V_{imt}^{\text{база}} = \frac{Q_{it}^{\Gamma, J}}{n_{it}^{\text{скв}}}. \quad (1)$$

Возможные объемы поставок газа сепарации в расчете на одну скважину с учетом геолого-технологических неопределенностей добычи:

$$V_{imt}^{\text{доб}} = V_{imt}^{\text{база}} \left(1 + X_{imt}^{\text{доб}}\right). \quad (2)$$

Возможные объемы поставок газа сепарации в расчете на одну скважину с учетом неопределенностей задержки ввода скважин и возникновения аварии на скважинах:

$$V_{imt}^{\text{скв}} = \left(1 - B_{imt}^{\text{бв.скв}}\right) \cdot \left(1 - B_{imt}^{\text{ав.скв}}\right) \cdot V_{imt}^{\text{доб}}. \quad (3)$$

Возможные объемы поставок газа сепарации в расчете на один газопровод-шлейф с учетом неопределенностей задержки ввода газопроводов-шлейфов и возникновения аварии на газопроводах-шлейфах:

$$V_{imt}^{\text{ГШ}} = \left(1 - B_{imt}^{\text{бв.ГШ}}\right) \cdot \left(1 - B_{imt}^{\text{ав.ГШ}}\right) \cdot \sum_{n=1}^{N_{im}} V_{inm}^{\text{скв}}. \quad (4)$$

Возможные объемы поставок газа с учетом неопределенностей задержки ввода УКПГ и возникновения аварии на УКПГ:

$$V_{it}^{\text{УКПГ}} = \left(1 - B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}\right) \cdot \left(1 - B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}\right) \cdot \sum_{m=1}^{M_i} V_{imt}^{\text{ГШ}}. \quad (5)$$

Возможные объемы поставок газа с учетом неопределенностей задержки ввода газопровода

подключения и возникновения аварии на газопроводе подключения:

$$V_{it} = (1 - B_{it}^{\text{вв.ГП}}) \cdot (1 - B_{it}^{\text{ав.ГП}}) \cdot V_{it}^{\text{УКПГ}}. \quad (6)$$

Возможные объемы поставок газа с учетом неопределенностей возникновения аварии в системе коллекторов:

$$V_{\text{колл},t}^J = (1 - B_t^{\text{ав.колл}}) \cdot \sum_{i=1}^I V_{it}. \quad (7)$$

Возможные объемы поставок газа с учетом неопределенности задержки ввода ГИС:

$$V_{\text{сумм},t}^J = (1 - B_t^{\text{ав.колл}}) \cdot V_{\text{колл},t}^J. \quad (8)$$

Суммарный возможный объем недопоставок газа на ГПиГХК будет равен

$$V_{\text{недопост},t}^J = V_{\text{контр},t}^{\Gamma,J} - V_{\text{сумм},t}^J. \quad (9)$$

Возможная суммарная масса поставляемого на ГПиГХК ценного компонента, находящегося в газе, вычисляется по следующим формулам.

Возможный объем поставок ценного компонента по участкам:

$$V_{it}^{\text{ЦК}} = V_{it} \cdot X_{it}^{\text{ЦК}}. \quad (10)$$

Возможный суммарный объем поставок ценного компонента:

$$V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J} = (1 - B_t^{\text{вв.ГИС},J}) \cdot (1 - B_t^{\text{ав.колл}}) \cdot \sum_{i=1}^I V_{it}^{\text{ЦК}}. \quad (11)$$

Возможная суммарная масса поставок ценного компонента:

$$M_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J} = \rho_{\text{ЦК}} \cdot V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}. \quad (12)$$

Суммарная возможная масса недопоставок ценного компонента на ГПиГХК будет равна:

$$M_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J} = M_{\text{контр},t}^{\text{ЦК},J} - M_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}. \quad (13)$$

Возможное содержание ценного компонента в газе на ГПиГХК в период времени  $t$  по направлению поставок  $J$  вычисляется по формуле:

$$C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J} = \frac{V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}}{V_{\text{сумм},t}^J} = \frac{\sum_{i=1}^I V_{it} X_{it}^{\text{ЦК}}}{\sum_{i=1}^I V_{it}}. \quad (14)$$

Суммарное возможное отклонение от проектного (контрактного) содержания ценного компонента в газе на ГПиГХК равно:

$$C_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J} = C_{\text{контр},t}^J - C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}. \quad (15)$$

#### **Блок «Формулы для учета влияния факторов неопределенности на объемы поставок газа и ценного компонента»**

Доли снижения поставок газа из-за факторов неопределенности определяются по следующим формулам:

а) риск задержки ввода новой группы скважин участка в эксплуатацию в году  $t$ :

$$B_{imnt}^{\text{вв.СКВ}} = I_{imn}^{\text{вв.СКВ}} \cdot w(X_{imn}^{\text{вв.СКВ}} - (t - t_{imn}^{\text{вв.СКВ}})), \quad (16)$$

где:

$$w(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ x, & x \in [0,1], \\ 1, & x > 1 \end{cases}. \quad (17)$$

Функция  $w(x)$  показывает, какую долю годового периода охватывает задержка запланированной на начало периода сдачи объекта, если длительность задержки составляет  $x$  лет;

б) риск аварии на скважине:

$$B_{imnt}^{\text{ав.СКВ}} = I_{imnt}^{\text{ав.СКВ}} \cdot X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}; \quad (18)$$

в) риск задержки сроков завершения строительства / реконструкции участков газопроводов — шлейфов сборной сети участка:

$$B_{imt}^{\text{вв.ГШ}} = I_{im}^{\text{вв.ГШ}} \cdot w(X_{im}^{\text{вв.ГШ}} - (t - t_{im}^{\text{вв.ГШ}})); \quad (19)$$

г) риск аварии на газопроводах — шлейфах сборной сети участка:

$$B_{int}^{\text{ав.ГШ}} = I_{int}^{\text{ав.ГШ}} \cdot X_{im}^{\text{ав.ГШ}}; \quad (20)$$

д) риск задержки завершения строительства / реконструкции УКПГ участка:

$$B_{it}^{\text{вв.УКПГ}} = I_i^{\text{вв.УКПГ}} \cdot w(X_i^{\text{вв.УКПГ}} - (t - t_i^{\text{вв.УКПГ}})); \quad (21)$$

е) риск аварии на УКПГ участка:

$$B_{it}^{\text{ав.УКПГ}} = I_{it}^{\text{ав.УКПГ}} \cdot \frac{X_i^{\text{ав.УКПГ}}}{n_{\text{лин}}} ; \quad (22)$$

ж) риск задержки завершения строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ участка к коллектору:

$$B_{it}^{\text{вв.ГП}} = I_i^{\text{вв.ГП}} \cdot \gamma^{\text{УКПГ}} \cdot w(X_i^{\text{вв.ГП}} - (t - t_i^{\text{вв.ГП}})) ; \quad (23)$$

к) риск аварии на газопроводе подключения УКПГ участка к коллектору:

$$B_{it}^{\text{ав.ГП}} = I_{it}^{\text{ав.ГП}} \cdot X_i^{\text{ав.ГП}} ; \quad (24)$$

л) риск аварии в системе коллекторов:

$$B_{it}^{\text{ав.колл}} = I_{it}^{\text{ав.колл}} \cdot (1 - \delta^{\text{колл}}) \cdot X_i^{\text{ав.колл}} ; \quad (25)$$

м) риск задержки завершения строительства ГИС:

$$B_t^{\text{вв.ГИС,}J} = I^{\text{ГИС,}J} \cdot w(X^{\text{ГИС,}J} - (t - t^{\text{ГИС,}J})) . \quad (26)$$

### **Блок «Формулы для расчета математического ожидания и дисперсии объемов поставок газа и массы ценного компонента»**

Вероятностное распределение случайных величин  $I_{imn}^{\text{вв.ГШ}}, I_{im}^{\text{вв.ГШ}}, I_i^{\text{ав.УКПГ}}, I_i^{\text{ав.ГП}}, I^{\text{ГИС}}, I_{imn}^{\text{ав.СКВ}}, I_{im}^{\text{ав.ГШ}}, I_{it}^{\text{ав.УКПГ}}, I_{it}^{\text{ав.ГП}}$  однозначно определяется вероятностями:

$$\begin{aligned} P(I_{imn}^{\text{вв.СКВ}} = 1) &= P_{imn}^{\text{ав.СКВ}} ; \\ P(I_{imn}^{\text{ав.СКВ}} = 1) &= P_{imn}^{\text{ав.СКВ}} = \lambda^{\text{СКВ}} ; \\ P(I_{im}^{\text{вв.ГШ}} = 1) &= P_{im}^{\text{ав.ГШ}} ; \\ P(I_{im}^{\text{ав.ГШ}} = 1) &= P_{im}^{\text{ав.ГШ}} = I_{im}^{\text{ГШ}} \cdot \lambda^{\text{ГШ}} ; \\ P(I_i^{\text{ав.УКПГ}} = 1) &= P_{it}^{\text{ав.УКПГ}} = \lambda^{\text{УКПГ}} \cdot n_{\text{лин}}^{\text{УКПГ}} ; \\ P(I_i^{\text{ав.ГП}} = 1) &= P_i^{\text{ав.ГП}} ; \\ P(I_{it}^{\text{ав.ГП}} = 1) &= P_{it}^{\text{ав.ГП}} = L_i^{\text{ГП}} \cdot \lambda^{\text{ГП}} ; \\ P(I_t^{\text{ав.колл}} = 1) &= P_t^{\text{ав.колл}} = L_t^{\text{колл}} \cdot \lambda^{\text{колл}} ; \\ P(I^{\text{ГИС,}J} = 1) &= P^{\text{ав.ГИС,}J} . \end{aligned}$$

Для распределения случайной величины  $X$  введем обозначения соответственно для математического ожидания  $e_k[X]$  и дисперсии  $d_k[X]$  случайной величины  $w(X - k)$ , а именно:  $e_k[X] = E[w(X - k)]$ ,  $d_k[X] = D[w(X - k)]$ .

Параметры вероятностного распределения объема газа сепарации в расчете на одну скважину  $n$ , подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка определяются по формулам:

$$E[V_{imnt}^{\text{добр}}] = V_{imnt}^{\text{база}} \cdot (1 + E[X_{imnt}^{\text{добр}}]) = \frac{Q_t q_{it}}{n_{it}^{\text{СКВ}}} (1 + E[X_{imnt}^{\text{добр}}]) ; \quad (27)$$

$$D[V_{imnt}^{\text{добр}}] = (V_{imnt}^{\text{база}})^2 \cdot D[X_{imnt}^{\text{добр}}] = \left( \frac{Q_t q_{it}}{n_{it}^{\text{СКВ}}} \right)^2 \cdot D[X_{imnt}^{\text{добр}}] . \quad (28)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_{imnt}^{\text{вв.СКВ}}$  с  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$  в результате задержки плановых сроков ввода скважины в эксплуатацию определяются по формулам:

$$E[B_{imnt}^{\text{вв.СКВ}}] = P_{imn}^{\text{ав.СКВ}} \cdot e_{t-t_{imn}^{\text{ав.СКВ}}} [X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}] ; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} D[B_{imnt}^{\text{вв.СКВ}}] &= P_{imn}^{\text{ав.СКВ}} \cdot \left( d_{t-t_{imn}^{\text{ав.СКВ}}} [X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}] + \right. \\ &\quad \left. + (1 - P_{imn}^{\text{ав.СКВ}}) (e_{t-t_{imn}^{\text{ав.СКВ}}} [X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}])^2 \right) . \end{aligned} \quad (30)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_{imnt}^{\text{ав.СКВ}}$  с  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$  в результате аварии на скважине определяются по формулам:

$$E[B_{imnt}^{\text{ав.СКВ}}] = P_{imnt}^{\text{ав.СКВ}} \cdot E[X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}] ; \quad (31)$$

$$\begin{aligned} D[B_{imnt}^{\text{ав.СКВ}}] &= P_{imnt}^{\text{ав.СКВ}} \cdot \left( D[X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}] + \right. \\ &\quad \left. + (1 - P_{imnt}^{\text{ав.СКВ}}) \cdot E[X_{imn}^{\text{ав.СКВ}}]^2 \right) . \end{aligned} \quad (32)$$

Параметры вероятностного распределения объема поставок газа  $V_{imnt}^{\text{СКВ}}$  с  $n$ -й скважины, подключаемой к  $m$ -му газопроводу — шлейфу  $i$ -го участка, в период  $t$  определяются по формулам:

$$E[V_{imnt}^{\text{CKB}}] = \\ = (1 - E[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}]) \cdot (1 - E[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}]) \cdot E[V_{imnt}^{\text{доб}}]; \quad (33)$$

$$D[V_{imnt}^{\text{CKB}}] = D[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}] \cdot D[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}] \cdot D[V_{imnt}^{\text{доб}}] + \\ + D[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}] \cdot D[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}] \cdot E[V_{imnt}^{\text{доб}}]^2 + \\ + D[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}] \cdot (1 - E[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}])^2 \cdot D[V_{imnt}^{\text{доб}}] + \\ + (1 - E[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}])^2 \cdot D[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}] \cdot D[V_{imnt}^{\text{доб}}] + \\ + D[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}] \cdot (1 - E[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}])^2 \cdot E[V_{imnt}^{\text{доб}}]^2 + \\ + (1 - E[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}])^2 \cdot D[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}] \cdot E[V_{imnt}^{\text{доб}}]^2 + \\ + (1 - E[B_{imnt}^{\text{BB,CKB}}])^2 \cdot (1 - E[B_{imnt}^{\text{AB,CKB}}])^2 \cdot D[V_{imnt}^{\text{доб}}]. \quad (34)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}$  через  $m$ -й газопровод — шлейф сборной сети  $i$ -го участка на вход УКПГ участка в период  $t$  в результате задержки плановых сроков завершения строительства / реконструкции участков газопровода — шлейфа определяются по формулам:

$$E[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}] = P_{im}^{\text{BB,ГШ}} \cdot e_{t-t_{im}^{\text{BB,ГШ}}} [X_{im}^{\text{BB,ГШ}}]; \quad (35)$$

$$D[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}] = P_{im}^{\text{BB,ГШ}} \cdot \\ \cdot \left( d_{t-t_{im}^{\text{BB,ГШ}}} [X_{im}^{\text{BB,ГШ}}] + (1 - P_{im}^{\text{BB,ГШ}}) \left( e_{t-t_{im}^{\text{BB,ГШ}}} [X_{im}^{\text{BB,ГШ}}] \right)^2 \right). \quad (36)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа сепарации  $B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}$  через  $m$ -й газопровод — шлейф сборной сети  $i$ -го участка на вход УКПГ участка в период  $t$  в результате аварии на газопроводе — шлейфе определяются по формулам:

$$E[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}] = P_{imt}^{\text{AB,ГШ}} \cdot E[X_{im}^{\text{AB,ГШ}}]; \quad (37)$$

$$D[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}] = \\ = P_{imt}^{\text{AB,ГШ}} \cdot \left( D[X_{im}^{\text{AB,ГШ}}] + (1 - P_{imt}^{\text{AB,ГШ}}) \cdot E[X_{im}^{\text{AB,ГШ}}]^2 \right). \quad (38)$$

Параметры вероятностного распределения объема поставок газа  $V_{imt}^{\text{ГШ}}$  через  $m$ -й газопровод — шлейф  $i$ -го

участка на вход УКПГ участка в период  $t$  определяются по формулам:

$$E[V_{imt}^{\text{ГШ}}] = (1 - E[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}]) \cdot \\ \cdot (1 - E[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}]) \cdot \sum_{n=1}^{N_{im}} E[V_{imnt}^{\text{CKB}}]; \quad (39)$$

$$D[V_{imt}^{\text{ГШ}}] = D[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}] \cdot D[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}] \cdot \sum_{n=1}^{N_{im}} D[V_{imnt}^{\text{CKB}}] + \\ + D[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}] \cdot D[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}] \cdot (\sum_{n=1}^{N_{im}} E[V_{imnt}^{\text{CKB}}])^2 + \\ + D[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}] \cdot (1 - E[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}])^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_{im}} D[V_{imnt}^{\text{CKB}}] + \\ + (1 - E[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}])^2 \cdot D[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}] \cdot \sum_{n=1}^{N_{im}} D[V_{imnt}^{\text{CKB}}] + \\ + D[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}] \cdot (1 - E[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}])^2 \cdot (\sum_{n=1}^{N_{im}} E[V_{imnt}^{\text{CKB}}])^2 + \\ + (1 - E[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}])^2 \cdot D[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}] \cdot (\sum_{n=1}^{N_{im}} E[V_{imnt}^{\text{CKB}}])^2 + \\ + (1 - E[B_{imt}^{\text{BB,ГШ}}])^2 \cdot (1 - E[B_{imt}^{\text{AB,ГШ}}])^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_{im}} D[V_{imnt}^{\text{CKB}}]. \quad (40)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $V_{it}^{\text{вв,УКПГ}}$  через УКПГ  $i$ -го участка на газопровод подключения к коллектору в период  $t$  в результате задержки плановых сроков завершения строительства / реконструкции УКПГ участка определяются по формулам:

$$E[B_{it}^{\text{вв,УКПГ}}] = P_i^{\text{вв,УКПГ}} \cdot \gamma^{\text{УКПГ}} \cdot e_{t-t_i^{\text{вв,УКПГ}}} [X_i^{\text{вв,УКПГ}}]; \quad (41)$$

$$D[B_{it}^{\text{вв,УКПГ}}] = (\gamma^{\text{УКПГ}})^2 \cdot P_i^{\text{вв,УКПГ}} \cdot \\ \cdot \left( d_{t-t_i^{\text{вв,УКПГ}}} [X_i^{\text{вв,УКПГ}}] + (1 - P_i^{\text{вв,УКПГ}}) \cdot \right. \\ \left. \cdot \left( e_{t-t_i^{\text{вв,УКПГ}}} [X_i^{\text{вв,УКПГ}}] \right)^2 \right). \quad (42)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_{it}^{\text{ав,УКПГ}}$  через УКПГ  $i$ -го участка на газопровод подключения к коллектору в период  $t$  в результате аварии на УКПГ участка определяются по формулам:

$$E[B_{it}^{\text{ав,УКПГ}}] = P_{it}^{\text{ав,УКПГ}} \cdot \frac{E[X_i^{\text{ав,УКПГ}}]}{n_{\text{лин}}}; \quad (43)$$

$$D[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}] = \frac{P_{it}^{\text{ав.УКПГ}}}{(n_{\text{дин}}^{\text{УКПГ}})^2} \cdot \left( D[X_i^{\text{ав.УКПГ}}] + (1 - P_{it}^{\text{ав.УКПГ}}) \cdot E[X_i^{\text{ав.УКПГ}}]^2 \right). \quad (44)$$

Параметры вероятностного распределения объема поставок газа  $V_{it}^{\text{УКПГ}}$  через УКПГ  $i$ -го участка на газопровод подключения к коллектору в период  $t$  определяются по формулам:

$$E[V_{it}^{\text{УКПГ}}] = (1 - E[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}]) \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}]) \cdot \sum_{m=1}^{M_i} E[V_{imt}^{\text{ГШ}}]; \quad (45)$$

$$\begin{aligned} D[V_{it}^{\text{УКПГ}}] = & D[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}] \cdot D[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}] \cdot \sum_{m=1}^{M_i} D[V_{imt}^{\text{ГШ}}] + \\ & + D[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}] \cdot D[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}] \cdot \left( \sum_{m=1}^{M_i} E[V_{imt}^{\text{ГШ}}] \right)^2 + \\ & + D[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}] \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}])^2 \cdot \sum_{m=1}^{M_i} D[V_{imt}^{\text{ГШ}}] + \\ & + (1 - E[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}])^2 \cdot D[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}] \cdot \sum_{m=1}^{M_i} D[V_{imt}^{\text{ГШ}}] + \\ & + D[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}] \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}])^2 \cdot \left( \sum_{m=1}^{M_i} E[V_{imt}^{\text{ГШ}}] \right)^2 + \\ & + (1 - E[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}])^2 \cdot D[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}] \cdot \left( \sum_{m=1}^{M_i} E[V_{imt}^{\text{ГШ}}] \right)^2 + \\ & + (1 - E[B_{it}^{\text{бв.УКПГ}}])^2 \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.УКПГ}}])^2 \cdot \sum_{m=1}^{M_i} D[V_{imt}^{\text{ГШ}}]. \end{aligned} \quad (46)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_{it}^{\text{бв.ГП}}$  через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период  $t$  в результате задержки плановых сроков завершения строительства / реконструкции газопровода подключения УКПГ участка к коллектору определяются по формулам:

$$E[B_{it}^{\text{бв.ГП}}] = P_i^{\text{бв.ГП}} \cdot e_{t-t_i^{\text{бв.ГП}}} [X_i^{\text{бв.ГП}}]; \quad (47)$$

$$\begin{aligned} D[B_{it}^{\text{бв.ГП}}] = & P_i^{\text{бв.ГП}} \cdot \\ & \cdot \left( d_{t-t_i^{\text{бв.ГП}}} [X_i^{\text{бв.ГП}}] + (1 - P_i^{\text{бв.ГП}}) \left( e_{t-t_i^{\text{бв.ГП}}} [X_i^{\text{бв.ГП}}] \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (48)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_{it}^{\text{ав.ГП}}$  через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период

$t$  в результате аварии на газопроводе подключения УКПГ участка к коллектору определяются по формулам:

$$E[B_{it}^{\text{ав.ГП}}] = P_{it}^{\text{ав.ГП}} \cdot E[(X_i^{\text{ав.ГП}})]; \quad (49)$$

$$\begin{aligned} D[B_{it}^{\text{ав.ГП}}] = & P_{it}^{\text{ав.ГП}} \cdot \\ & \cdot \left( D[X_i^{\text{ав.ГП}}] + (1 - P_{it}^{\text{ав.ГП}}) \cdot E[X_i^{\text{ав.ГП}}]^2 \right). \end{aligned} \quad (50)$$

Параметры вероятностного распределения объема поставок газа  $V_{it}$  через газопровод подключения УКПГ  $i$ -го участка на коллектор в период  $t$  определяются по формулам:

$$E[V_{it}] = (1 - E[B_{it}^{\text{бв.ГП}}]) \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.ГП}}]) \cdot E[V_{it}^{\text{УКПГ}}]; \quad (51)$$

$$\begin{aligned} D[V_{it}] = & D[B_{it}^{\text{бв.ГП}}] \cdot D[B_{it}^{\text{ав.ГП}}] \cdot D[V_{it}^{\text{УКПГ}}] + \\ & + D[B_{it}^{\text{бв.ГП}}] \cdot D[B_{it}^{\text{ав.ГП}}] \cdot E[V_{it}^{\text{УКПГ}}]^2 + \\ & + D[B_{it}^{\text{бв.ГП}}] \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.ГП}}])^2 \cdot D[V_{it}^{\text{УКПГ}}] + \\ & + (1 - E[B_{it}^{\text{бв.ГП}}])^2 \cdot D[B_{it}^{\text{ав.ГП}}] \cdot D[V_{it}^{\text{УКПГ}}] + \\ & + D[B_{it}^{\text{бв.ГП}}] \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.ГП}}])^2 \cdot E[V_{it}^{\text{УКПГ}}]^2 + \\ & + (1 - E[B_{it}^{\text{бв.ГП}}])^2 \cdot D[B_{it}^{\text{ав.ГП}}] \cdot E[V_{it}^{\text{УКПГ}}]^2 + \\ & + (1 - E[B_{it}^{\text{бв.ГП}}])^2 \cdot (1 - E[B_{it}^{\text{ав.ГП}}])^2 \cdot D[V_{it}^{\text{УКПГ}}]. \end{aligned} \quad (52)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_t^{\text{ав.колл}}$  через систему коллекторов в период  $t$  в результате аварии в системе коллекторов определяются по формулам:

$$E[B_{it}^{\text{ав.колл}}] = P_{it}^{\text{ав.колл}} \cdot (1 - \delta^{\text{колл}}) \cdot E[X_i^{\text{ав.колл}}]; \quad (53)$$

$$\begin{aligned} D(B_{it}^{\text{ав.колл}}) = & (1 - \delta^{\text{колл}})^2 \cdot P_{it}^{\text{ав.колл}} \cdot \\ & \cdot \left( D[X_i^{\text{ав.колл}}] + (1 - P_{it}^{\text{ав.колл}}) \cdot E[X_i^{\text{ав.колл}}]^2 \right). \end{aligned} \quad (54)$$

Параметры вероятностного распределения доли снижения поставок газа  $B_t^{\text{ГИС}}$  в результате задержки плановых сроков завершения строительства ГИС определяются по формулам:

$$E[B_t^{\text{БВ.ГИС},J}] = P^{\text{БВ.ГИС},J} \cdot e_{t-t^{\text{ГИС},J}}[X^{\text{ГИС},J}]; \quad (55)$$

$$\begin{aligned} D[B_t^{\text{БВ.ГИС},J}] &= P^{\text{БВ.ГИС},J} \cdot \\ &\cdot (d_{t-t^{\text{ГИС},J}}[X^{\text{ГИС},J}] + (1 - P^{\text{БВ.ГИС},J})(e_{t-t^{\text{ГИС},J}}[X^{\text{ГИС},J}])^2). \end{aligned} \quad (56)$$

Параметры вероятностного распределения суммарного объема поставок газа  $V_{\text{сумм},t}^J$  на ГПиГХК по направлению  $J$  в период времени  $t$  определяются по формулам:

$$E[V_{\text{сумм},t}^J] = (1 - E[B_t^{\text{БВ.ГИС},J}]) \cdot \sum_{i=1}^I E[V_{it}]; \quad (57)$$

$$\begin{aligned} D[V_{\text{сумм},t}^J] &= D[B_t^{\text{БВ.ГИС},J}] \cdot \\ &\cdot \sum_{i=1}^I D[V_{it}] + D[B_t^{\text{БВ.ГИС},J}] \cdot (\sum_{i=1}^I E[V_{it}])^2 + \\ &+ (1 - E[B_t^{\text{БВ.ГИС},J}])^2 \cdot \sum_{i=1}^I D[V_{it}]. \end{aligned} \quad (58)$$

Параметры вероятностного распределения объема поставок ценного компонента  $V_{it}^{\text{ЦК}}$  с  $i$ -го участка в период времени  $t$  определяются по формулам:

$$E[V_{it}^{\text{ЦК}}] = E[V_{it}] \cdot E[X_{it}^{\text{ЦК}}]; \quad (59)$$

$$\begin{aligned} D[V_{it}^{\text{ЦК}}] &= D[V_{it}] \cdot D[X_{it}^{\text{ЦК}}] + \\ &+ D[V_{it}] \cdot E[X_{it}^{\text{ЦК}}]^2 + E[V_{it}]^2 \cdot D[X_{it}^{\text{ЦК}}]. \end{aligned} \quad (60)$$

Параметры вероятностного распределения суммарного объема поставок ценного компонента  $V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}$  на ГПиГХК по направлению  $J$  в период времени  $t$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} E[V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}] &= \\ &= (1 - E[B_t^{\text{ГИС},J}]) \cdot (1 - E[B_t^{\text{ав.колл}}]) \cdot \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}]; \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} D[V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}] &= D[B_t^{\text{ГИС},J}] \cdot D[B_{it}^{\text{ав.колл}}] \cdot \sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}] + \\ &+ D[B_t^{\text{ГИС},J}] \cdot D[B_{it}^{\text{ав.колл}}] \cdot (\sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}])^2 + \\ &+ D[B_t^{\text{ГИС},J}] \cdot (1 - E[B_t^{\text{ав.колл}}])^2 \cdot \sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}] + \\ &+ (1 - E[B_t^{\text{ГИС},J}])^2 \cdot D[B_{it}^{\text{ав.колл}}] \cdot \sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}]. \end{aligned} \quad (62)$$

Параметры вероятностного распределения суммарной массы поставок ценного компонента  $M_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}$  на ГПиГХК по направлению  $J$  в период времени  $t$  определяются по формулам:

$$E[M_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}] = \rho_{\text{ЦК}} \cdot E[V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}]; \quad (63)$$

$$D[M_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}] = \rho_{\text{ЦК}}^2 \cdot D[V_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}]. \quad (64)$$

### Блок «Формулы для расчета показателей вероятностного распределения содержания ценного компонента»

Найдем статистические характеристики вероятностного распределения случайной величины  $C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}$ .

Будем считать, что вероятностное распределение случайных величин

$$V_t^{\Gamma} = \sum_{i=1}^I V_{it} \text{ и } V_t^{\text{ЦК}} = \sum_{i=1}^I V_{it}^{\text{ЦК}}$$

в приближении является логнормальным. Иными словами, случайные величины

$$Y_{1t} = \ln(V_t^{\Gamma}) \text{ и } Y_{2t} = \ln(V_t^{\text{ЦК}})$$

подчиняются двумерному нормальному распределению с ожидаемыми значениями

$$E[Y_{1t}] = a_{1t}, \quad E[Y_{2t}] = a_{2t}$$

и матрицей ковариаций

$$\Sigma_t = \begin{bmatrix} \sigma_{1t}^2 & \sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t \\ \sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t & \sigma_{2t}^2 \end{bmatrix}.$$

Тогда имеют место следующие математические соотношения:

$$E[V_t^{\Gamma}] = e^{a_{1t} + \frac{\sigma_{1t}^2}{2}}; \quad (65)$$

$$D[V_t^{\Gamma}] = (e^{\sigma_{1t}^2} - 1)e^{2a_{1t} + \sigma_{1t}^2}; \quad (66)$$

$$E[V_t^{\text{ЦК}}] = e^{a_{2t} + \frac{\sigma_{2t}^2}{2}}; \quad (67)$$

$$D[V_t^{\text{ЦК}}] = (e^{\sigma_{2t}^2} - 1)e^{2a_{2t} + \sigma_{2t}^2}; \quad (68)$$

$$\begin{aligned} Cov[V_t^{\Gamma}, V_t^{\text{ЦК}}] &= \\ &= e^{a_{1t} + a_{2t} + \frac{\sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2}{2}} (e^{\sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t} - 1). \end{aligned} \quad (69)$$

С другой стороны,

$$E[V_t^{\Gamma}] = \sum_{i=1}^I E[V_{it}]; \quad (70)$$

$$D[V_t^{\Gamma}] = \sum_{i=1}^I D[V_{it}]; \quad (71)$$

$$E[V_t^{\text{ЦК}}] = \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}]; \quad (72)$$

$$D[V_t^{\text{ЦК}}] = \sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}]; \quad (73)$$

$$\text{Cov}[V_t^{\Gamma}, V_t^{\text{ЦК}}] = \sum_{i=1}^I E[X_{it}^{\text{ЦК}}] \cdot D[V_{it}]. \quad (74)$$

Отсюда получаем:

$$a_{1t} = \ln \frac{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}] \right)^2}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}] \right)^2 + \sum_{i=1}^I D[V_{it}]}}; \quad (75)$$

$$\sigma_{1t} = \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^I D[V_{it}]}{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}] \right)^2} \right)}; \quad (76)$$

$$a_{2t} = \ln \frac{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}] \right)^2}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}] \right)^2 + \sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}]}}; \quad (77)$$

$$\sigma_{2t} = \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}]}{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}] \right)^2} \right)}; \quad (78)$$

$$\rho_t = \frac{\ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^I E[X_{it}^{\text{ЦК}}] \cdot D[V_{it}]}{\sum_{i=1}^I E[V_{it}] \cdot \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}]} \right)}{\sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^I D[V_{it}]}{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}] \right)^2} \right) \cdot \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^I D[V_{it}^{\text{ЦК}}]}{\left( \sum_{i=1}^I E[V_{it}^{\text{ЦК}}] \right)^2} \right)}}}. \quad (79)$$

Тогда случайная величина

$$C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}} = \frac{V_t^{\text{ЦК}}}{V_t^{\Gamma}} = e^{Y_{2t} - Y_{1t}}$$

будет иметь логнормальное распределение со средним, определяемым по формуле:

$$E[C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}] = e^{a_{2t} - a_{1t} + \frac{\sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2}{2} - \sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t} = \\ = \frac{E[V_t^{\text{ЦК}}]^2}{E[V_t^{\Gamma}]^2} \cdot \frac{D[V_t^{\Gamma}] + E[V_t^{\Gamma}]^2}{\text{Cov}[V_t^{\Gamma}, V_t^{\text{ЦК}}] + E[V_t^{\Gamma}]E[V_t^{\text{ЦК}}]} \quad (80)$$

и дисперсией, определяемой по формуле:

$$D[C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}] = \\ = e^{2a_{2t} - 2a_{1t} + \sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2 - 2\sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t} \left( e^{\sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2 - 2\sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t} - 1 \right) = \\ = \frac{E[V_t^{\text{ЦК}}]^4}{E[V_t^{\Gamma}]^4} \cdot \frac{\left( D[V_t^{\Gamma}] + E[V_t^{\Gamma}]^2 \right)^2}{\left( \text{Cov}[V_t^{\Gamma}, V_t^{\text{ЦК}}] + E[V_t^{\Gamma}]E[V_t^{\text{ЦК}}] \right)^2} \\ \cdot \left[ \frac{\left( D[V_t^{\Gamma}] + E[V_t^{\Gamma}]^2 \right) \left( D[V_t^{\text{ЦК}}] + E[V_t^{\text{ЦК}}]^2 \right)}{\left( \text{Cov}[V_t^{\Gamma}, V_t^{\text{ЦК}}] + E[V_t^{\Gamma}]E[V_t^{\text{ЦК}}] \right)^2} - 1 \right]. \quad (81)$$

Квантили  $c_q$ ,  $P[C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}} < c_q] = q$ , случайной величины  $C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}$  вычисляются по формуле:

$$c_q = e^{a_{2t} - a_{1t} + \Phi^{-1}[q] \cdot \sqrt{\sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2 - 2\sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t}}, \quad (82)$$

где:

$$\Phi[z] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx -$$

стандартная нормальная функция распределения.

### Блок «Формулы для расчета вероятностей невыполнения проектных (контрактных) обязательств по поставкам: по объему газа, массе и содержанию ценного компонента (нижние пределы)»

Вероятность возникновения штрафуемых отклонений поставок газа в период  $t$ ,  $p_{\Gamma,t}^{\text{штраф}}$  приближенно вычисляется по формуле:

$$p_{\Gamma,t}^{\text{штраф}} = P[V_{\text{недопост},t}^J > V_{\text{контр},t}^J \cdot \Delta_{\text{пост}}^J] = \\ = (1 - p^{\text{ГИС},J}) \cdot \Phi \left[ \frac{\ln(V_{\text{контр},t}^J \cdot (1 - \Delta_{\text{пост}}^J)) - a_{1t}}{\sigma_{1t}} \right] + \\ + p^{\text{ГИС},J} \cdot \Phi \left[ \frac{\ln \frac{V_{\text{контр},t}^J (1 - \Delta_{\text{пост}}^J)}{1 - e_{t-t^{\text{ГИС},J}}[X^{\text{ГИС},J}]} - a_{1t}}{\sigma_{1t}} \right]. \quad (83)$$

Вероятность возникновения штрафуемых отклонений поставок ценного компонента в период  $t$ ,  $p_{\text{ЦК},t}^{\text{штраф}}$  приближенно вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
p_{\text{ЦК},t}^{\text{штраф}} &= P[M_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J} > M_{\text{контр},t}^{\text{ЦК},J} \cdot \Delta_{\text{пост}}^J] = \\
&= (1 - P^{\text{ВВ.ГИС},J}) \cdot \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{M_{\text{контр},t}^{\text{ЦК},J} \cdot (1 - \Delta_{\text{пост}}^J)}{\rho_{\text{ЦК}}} - a_{2t} \right)}{\sigma_{2t}} \right] + \\
&+ P^{\text{ВВ.ГИС},J} \cdot \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{M_{\text{контр},t}^{\text{ЦК},J} \cdot (1 - \Delta_{\text{пост}}^J)}{\rho_{\text{ЦК}}(1 - e_{t-t^{\text{ГИС},J}}[x^{\text{ГИС},J}])} - a_{2t} \right)}{\sigma_{2t}} \right]. \quad (84)
\end{aligned}$$

Вероятность возникновения штрафуемых отклонений содержания ценного компонента в газе в период  $t$ ,  $p_{\text{штраф}}$  приближенно вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
p_{\text{штраф}}^{\text{сод},t} &= P[C_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J} > C_{\text{контр},t}^J \cdot \Delta_{\text{сод}}^J] = \\
&= \Phi \left[ \frac{\ln \left( C_{\text{контр},t}^J \cdot (1 - \Delta_{\text{сод}}^J) \right) + a_{1t} - a_{2t}}{\sqrt{\sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2 - 2\sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t}} \right]. \quad (85)
\end{aligned}$$

Математическое ожидание недопоставок газа в период  $t$  вычисляется по формуле

$$E[V_{\text{недопост},t}^J] = V_{\text{контр},t}^{\Gamma,J} - E[V_{\text{сумм},t}^J]. \quad (86)$$

Математическое ожидание недопоставок ценного компонента в период  $t$  вычисляется по формуле

$$E[M_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J}] = M_{\text{контр},t}^{\text{ЦК},J} - E[M_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК},J}]. \quad (87)$$

Математическое ожидание отклонений содержания ценного компонента в газе в период  $t$  вычисляется по формуле

$$E[C_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J}] = C_{\text{контр},t}^J - E[C_{\text{сумм},t}^{\text{ЦК}}]. \quad (88)$$

Процентиль VAR90 по объемам недопоставок газа в период  $t$  определяется как решение нелинейного уравнения относительно  $V$ :

$$\begin{aligned}
&(1 - P^{\text{ВВ.ГИС},J}) \cdot \Phi \left[ \frac{\ln(V_{\text{контр},t}^{\Gamma,J} - V) - a_{1t}}{\sigma_{1t}} \right] + \\
&+ P^{\text{ВВ.ГИС},J} \cdot \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{V_{\text{контр},t}^{\Gamma,J} - V}{\rho_{\text{ЦК}}(1 - e_{t-t^{\text{ГИС},J}}[x^{\text{ГИС},J}])} - a_{1t} \right)}{\sigma_{1t}} \right] = 0,9. \quad (89)
\end{aligned}$$

Процентиль VAR90 по массе недопоставок ценного компонента в период  $t$  является решением нелинейного уравнения относительно  $M$ :

$$\begin{aligned}
&(1 - P^{\text{ВВ.ГИС},J}) \cdot \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{M_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J} - M}{\rho_{\text{ЦК}}} \right) - a_{2t}}{\sigma_{2t}} \right] + \\
&+ P^{\text{ВВ.ГИС},J} \cdot \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{M_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J} - M}{\rho_{\text{ЦК}}(1 - e_{t-t^{\text{ГИС},J}}[x^{\text{ГИС},J}])} - a_{2t} \right)}{\sigma_{2t}} \right] = 0,9. \quad (90)
\end{aligned}$$

Процентиль VAR90 отклонений содержания ценного компонента в газе в период  $t$  задается формулой

$$\begin{aligned}
&VAR_{90}[C_{\text{недопост},t}^{\text{ЦК},J}] = \\
&= C_{\text{контр},t}^J - e^{a_{2t} - a_{1t} + \Phi^{-1}[0,1] \cdot \sqrt{\sigma_{1t}^2 + \sigma_{2t}^2 - 2\sigma_{1t}\sigma_{2t}\rho_t}}. \quad (91)
\end{aligned}$$

## Заключение

В представленной динамической модели прогнозирования объемов недопоставок газа на ГПиГХК учтены и технологически увязаны все основные объекты, обеспечивающие добычу, сбор и подготовку к транспорту газа. Поэтому она носит универсальный характер. На практике, при пользовании динамической модели, сначала составляется конкретная схема извлечения из недр, сбора и подготовки к транспорту природного или попутного газа, учитывающая планируемые к использованию в проекте участки месторождений (промыслы, залежи), введенные в эксплуатацию объекты извлечения, сбора и подготовки к транспорту газа, в том числе объекты, на которых планируются в определенные

годы ремонтные работы и работы по реконструкции, объекты нового строительства. Задаются прогнозные показатели поставок газа на ГПиГХК по проекту (контракту) во времени с разбивкой по периодам. Далее в соответствии с конкретной схемой и целями анализа риска производится настройка динамической модели путем уточнения или исключения ряда формул по промыслам и объектам. Определяются статистические параметры факторов неопределенности и производится расчет по настроенной таким образом на конкретный проект поставок на ГПиГХК динамической модели.

Динамическая модель прогнозирования недопоставок газа на ГПиГХК может также использоваться и для целей мониторинга риска при изменении факторов неопределенности, уточнении прогнозных показателей поставок объемных и массовых характеристик газа и его компонентов на ГПиГХК, выработке условий контракта на поставку продукции промыслов на ГПиГХК.

Во второй части статьи применительно к поставкам этансодержащего газа на ГПиГХК даются описания: вероятностной модели изменения объемов добычи газа и содержания ценного компонента в нем по участкам месторождений (промыслам, залежам) сырьевой базы; вероятностной модели оценки влияния аварий на объектах добычи газа на изменения объемов газа и содержания ценного компонента в газе; вероятностной модели влияния задержек плановых сроков строительства, проведения ремонтных работ и работ по реконструкции объектов добычи газа на изменения объемов газа и содержания ценного компонента в нем; модели выбора рационального варианта компенсирующих мероприятий. Приводятся результаты расчетов прогнозирования недопоставок этансодержащего газа на один из возможных ГПиГХК по настроенной динамической модели.

## Список источников [References]

1. Ismail, Mohd & Sharif, Kamal Imran & Udin, Zulkifli & Hassan, Mohamad ghazali & Mohd Nawi, Mohd Nasrun & Hamid, Z.A.M.A. & Ibrahim, J. A. & Othman, Abdul. (2018). A risk assessment in natural gas supply. International Journal of Supply Chain Management. 7. 180–184.
2. Tummala, R. and Schoenherr, T. (2011), “Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP)”, Supply Chain Management, Vol. 16. No. 6, pp. 474–483. <https://doi.org/10.1108/13598541111171165>
3. Zhang, L., & Bai, W. (2020). Risk Assessment of China's Natural Gas Importation: A Supply Chain Perspective. SAGE Open, 10(3). <https://doi.org/10.1177/2158244020939912>
4. Witek, Maciej & Uilhoorn, F.. (2021). Influence of gas transmission network failure on security of supply. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 90. 103877. 10.1016/j.jngse.2021.103877.
5. Шевченко А. В. Статистические функции последствий аварий для исследования ущербов и количественной оценки рисков на объектах газовой промышленности // Вести газовой науки. 2022. № 2 (51). С. 106–115 [Shevchenko A. V. Statistical functions of emergency after effects for studying distribution of losses and quantitative risk assessment at gas facilities // Vesti Gazovoy Nauki. 2022;(2):106–115. (In Russ.)]
6. Ямников С. А., Шевченко А. В. К вопросу о возможных функциях распределения экологического ущерба применительно к авариям на линейной части магистральных газопроводов для целей страхования // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2018. № 2(34). С. 252–257 [Yamnikov S. A., Shevchenko A. V. On the issue of possible distribution functions of environmental damage in relation to accidents on the linear part of main gas pipelines for insurance purposes // Vesti Gazovoy Nauki. 2018;(2):252–257. (In Russ.)]
7. Basak, Munmun & Perrons, Robert & Coffey, Vaughan. (2019). Schedule overruns as a barrier for liquefied natural gas projects: A review of the literature and research agenda. Energy Reports. 5. 210–220. 10.1016/j.egyr.2019.01.008.
8. Mohammed, Reyadh M. M. and Saad Mohamed Ahmed Suliman. “Delay in Pipeline Construction Projects in the Oil and Gas Industry: Part 2 (Prediction Models).” International Journal of Construction Engineering and Management 8 (2019): 37–45. 10.5923/j.ijcem.20190802.01
9. Park, Minhwan & Park, Sunwon & Mele, Fernando & Grossmann, Ignacio. (2006). Modeling of Purchase and Sales Contracts in Supply Chain Optimization. Industrial & Engineering Chemistry Research. 45. 10.1021/ie0513144.
10. C. Vazquez, M. Rivier and I. J. Perez-Arriaga, “A market approach to long-term security of supply,” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 2, pp. 349–357, May 2002, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.1007903>.
11. Крутко А. А., Курашвили П. С., Казак К. А. и др. Об одной логистической модели формирования и оптимизации оперативного баланса экспортных поставок природного газа. Ч. 1 // Газовая промышленность. 2021. № 8 (820). С. 162–171 [Krutko A. A., Kurashvili P. S., Kazak K. A. [et al.] On a logistic model for formation and optimization of the operating balance of natural gas export supply. Part 1 // Gas Industry Journal. 2021;(8):162–171. (In Russ.)]

12. Крутко А.А., Курашвили П.С., Казак К.А. и др. Об одной логистической модели формирования и оптимизации оперативного баланса экспортных поставок природного газа. Ч. 2 // Газовая промышленность. 2021. № 10 (822). С. 52–62 [Krutko A. A., Kurashvili P. S., Kazak K. A. [et al.] On a logistic model for formation and optimization of the operating balance of natural gas export supply. Part 2 // Gas Industry Journal. 2021;(10):52–62. (In Russ.)]
13. Демкин И.В., Шевченко А.В., Ковалев С. А. Метод нисходящего анализа в практике идентификации и оценке операционных рисков добычи газа в нефтегазовом холдинге // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2022. № 2 (51). С. 276–284 [Demkin I. V., Shevchenko A. V., Kovalev S. A. Top-down analysis applied for identification and assessment of operational risks of gas production in an oil-gas conglomerate // Vesti Gazovoy Nauki. 2022;(2):276–284. (In Russ.)]
14. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / учебник для вузов. 12-е изд. М.: Юрайт. 2020. ISBN: 9785534002119 [Gmurmam V. E. Probability theory and mathematical statistics / textbook for universities. 12th ed. M.: Yurite. 2020. ISBN: 9785534002119. (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, Россия, 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 рисковых событий, безопасность

человека и окружающей среды, логико-вероятностное моделирование

**Контактная информация:**

Адрес: 142717, Россия, 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, гр. округ 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, мало-мерная 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: 18.06.2024

Дата публикации: 30.08.2024

*The article was submitted: 02.02.2024*

*Approved after reviewing: 06.06.2024*

*Accepted for publication: 18.06.2024*

*Date of publication: 30.08.2024*