

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Илькевич Николай Иванович

д.т.н., гл.н.с., e-mail: ilkev@isem.irk.ru

Дзюбина Татьяна Владимировна

к.т.н., с.н.с., e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Калинина Жанна Вадимовна

к.т.н., н.с., e-mail: zhannochka_k@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. Актуальность обусловлена, с одной стороны, необходимостью активной газификации крупных территориальных образований (строящихся новых жилых агломераций, коттеджных и дачных поселков, а также крупных промышленных комплексов). С другой стороны, продолжается увеличение общей протяженности газораспределительных систем и усложнение конфигурации схем газопроводов. Перечисленные факторы влияют на надежность работы газораспределительных систем и предъявляют высокие требования со стороны потребителей энергии к безаварийной их работе. **Цель.** Основная исходная надежностная информация, используемая для анализа надежности газопроводов, – это интенсивности отказов его элементов: отдельных участков линейной части, газоперекачивающих агрегатов и т.д., и интенсивности восстановления этих элементов. Эти показатели характеризуют такие свойства надежности как, безотказность и ремонтпригодность. Цель исследований заключается в оценке влияния показателей безотказности и ремонтпригодности оборудования на интегральные показатели надежности газораспределительной системы (ГС). К ним относятся математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) пропускной способности ГС, а также коэффициент надежности газопровода. **Методы:** эквивалентирования, аналитический метод на уровне случайных Марковских процессов – схема «гибели и размножения», теоремы сложения и умножения вероятностей, композиция рядов распределения; математическая модель анализа надежности проектируемого магистрального газопровода (МГ). **Результаты.** На основе математической модели оценки надежности проектируемого магистрального газопровода и разработанной вычислительной программы были выполнены расчеты по определению интегральных показателей надежности условной газораспределительной системы. Исследования показали, что при изменении исходных показателей надежности (интенсивностей отказов и восстановлений) элементов ГС на одинаковую величину их влияние на изменение интегральных показателей надежности ГС имеет разную силу. **Выводы.** На основе предложенной математической модели анализа надежности ГС показано влияние показателей интенсивности отказов и интенсивности восстановлений элементов, характеризующих безотказность и ремонтпригодность газотранспортных систем, на ее интегральные показатели надежности, в частности, на коэффициент надежности.

Ключевые слова: газораспределительные системы, математическая модель, оценка надежности, интегральные показатели надежности, интенсивности отказов и восстановлений.

Цитирование: Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Развитие методов анализа и обеспечения надежности газораспределительных систем в задачах комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 89-100. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.008.

Введение. Анализ структуры потребления природного газа в РФ за последние несколько лет [1] показывает рост использования газа в жилом секторе за счет активного строительства новых жилых агломераций, коттеджных и дачных поселков (преимущественно в ком-

мунально-бытовой сфере и у населения), а также в крупных промышленных комплексах. Одновременно с этим здесь же растет спрос на электрическую и тепловую энергию.

Для удовлетворения этого спроса в настоящее время реализуется общемировая тенденция развития распределенной генерации энергии [2], представляющая собой применение небольших установок – распределенных источников генерации электрической и тепловой энергии. В силу ряда преимуществ по сравнению с другими видами топлива и ископаемыми энергоносителями природный газ в ближайшей и отдаленной перспективе станет основным видом топлива, используемым в централизованной и распределенной генерации электрической и тепловой энергии [3].

Таким образом, активная газификация крупных территориальных образований для нужд их комплексного энергоснабжения приводит к необходимости развития систем централизованного газоснабжения и газовых распределительных сетей, росту охватываемой ими территории.

С другой стороны, продолжается увеличение общей протяженности газораспределительных систем (ГС) и усложнение конфигурации схем газопроводов. Системы изготавливаются из новых материалов, используются современные технологии для тепло- и гидроизоляции, минимизируются процессы коррозии и отложений на внутренней поверхности труб, внедряются новое высокоманевренное компрессорно-силовое оборудование и качественная запорно-регулирующая арматура и т.д.

Все перечисленные факторы влияют на надежность работы газораспределительных систем и предъявляют высокие требования со стороны потребителей энергии к безаварийной их работе.

1. Проблематика надежности. Под *надежностью* понимается свойство газоснабжающих систем (ГСС) выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования, т.е. бесперебойно обеспечивать потребителей газом и не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [4].

Под газовыми распределительными сетями (ГРС) понимается система, состоящая из параллельно-последовательно соединенных газопроводов и газоперекачивающих агрегатов компрессорных сооружений для снабжения природным газом крупных территориальных образований.

Газораспределительная система является частью газотранспортной системы (предприятия), однако достаточно сложной и содержащей большое число разнородных элементов, таких как, газораспределительные станции, компрессорные станции, линейные участки (ЛУ) трубопроводов, линейные компрессорные станции (КС) для перекачки газа, перемычки при многониточном газопроводе и др. оборудование.

Основными элементами, имеющими наибольший удельный вес по влиянию, как на стоимость, так и на общую надежность ГС, являются ЛУ и КС.

Методы расчета надежности можно классифицировать по используемому математическому аппарату на методы *аналитические* [5] и методы *статистического моделирования* [6]. Кроме того, все методы расчета надежности можно поделить на две части по воспроизведению свойств объекта, а именно: методы, рассматривающие отдельно *случайные состояния* объекта, и методы, рассматривающие *случайный процесс* функционирования объекта.

Полная классификация методов по двум указанным признакам позволяет разделить их на четыре группы, которые охватывают все существующие методы, причем в газоснабжении в какой-то степени получили развитие все методы.

В России достаточно плотно задачами исследования надежности МГ стали заниматься в середине 1970 годов [7-10] в том числе и в ИСЭМ СО РАН [11, 12].

По данному вопросу имеется большое количество работ. Так, например, в работах используются аналитические методы теории марковских цепей с непрерывным временем как на уровне случайных событий [7, 8], так и на уровне случайных процессов [9, 11]. Имеются методики оценки надежности с гидравлической увязкой [10].

Наиболее общим средством изучения систем с вероятностным поведением является *метод статистических испытаний*. В работе [9] была предложена методика на основе метода Монте-Карло с использованием двух моделей газопровода: вероятностной и гидравлической, на уровне случайных событий, в [13] предлагается использовать для решения задач надежности газопроводов метод статистических испытаний, но уже на уровне случайных процессов.

В наиболее полном виде методики и математические модели расчета надежности систем газоснабжения, в том числе и магистральных газопроводов (МГ) и систем распределения газа, созданные в России в 1980–1990 гг., представлены в справочном издании [14].

За рубежом имеются достаточно большие газоснабжающие системы, и в последнее время стали появляться работы, посвященные надежности газопроводов, в частности [15 – 18], в последних из них используется метод статистических испытаний. Можно также выделить некоторые стандартные программы, которые нашли применение при оценке надежности газоснабжения потребителей, например, программный комплекс (ПК) моделирования надежности и безопасности Relex Reliability Studio 2007 [19] или ПК STATISTICA, разработанные в США [20].

В ИСЭМ СО РАН продолжают исследования основных проблем надежности ГСС и МГ в частности [21, 22]. Анализ надежности МГ осуществляется аналитическим методом на уровне случайных процессов – на основе аналитического метода «гибели – размножения» из теории массового обслуживания [23, 24]. Основная исходная надежностная информация, используемая в модели анализа надежности газопроводов – это *интенсивности отказов* его элементов: отдельных участков линейной части, газоперекачивающих агрегатов и т.д., $\lambda = 1/T_p$, и *интенсивности восстановления* этих элементов, $\mu = 1/T_g$, где T_p – среднее время исправной работы элемента между отказами и T_g – среднее время восстановления элемента. Эти показатели характеризуют такие свойства надежности, как безотказность и ремонтпригодность. Надо отметить, что подобный подход использовался и другими авторами [14, 25]. Внимание, прежде всего, уделялось такому свойству надежности как безотказность. Хотя известно, что средствами повышения надежности работы элементов системы являются их резервирование (введение избыточности) и обеспечение надлежащих ремонтов вышедшего в аварийное состояние оборудования.

В заключение можно отметить, что для оценки надежности газопроводов разработаны весьма эффективные методы с различной степенью упрощений и допущений. Однако, в этом множестве исследований не нашли достаточной проработки вопросы влияния показателей интенсивности отказов и интенсивности восстановлений на интегральные показатели надежности газораспределительных систем.

Актуальность данной работы заключается в постановке задачи исследования влияния показателей безотказности и ремонтпригодности оборудования на интегральные показатели надежности газораспределительной системы, которая оценивается с помощью аналитического метода – схемы «гибели – размножения».

2. Показатели безотказности и ремонтпригодности [4]. Показателями надежности работы оборудования газораспределительной системы являются количественные характеристики одного или нескольких его свойств.

Так, например, одними из основных *показателей безотказности* являются вероятности безотказной работы и отказа, интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы (p) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет, вероятность отказа (q) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ возникает; $p + q = 1$.

Интенсивность отказов (λ) есть предел отношения условной вероятности отказа объекта на интервале времени или наработки непосредственно после данного момента времени при условии, что до этого момента отказ объекта не возник, к продолжительности этого интервала при его неограниченном уменьшении.

Приближенно интенсивность отказов есть условная вероятность отказа за малую единицу времени непосредственно после времени, определяемая в предположении, что до этого момента отказа не было.

Показателями ремонтпригодности являются: вероятность восстановления, интенсивность восстановления и среднее время восстановления.

Вероятность восстановления есть вероятность того, что время восстановления оборудования не превысит заданного.

Интенсивность восстановления (μ) есть предел отношения условной вероятности восстановления объекта на интервале времени непосредственно после данного момента при условии, что до этого момента восстановление еще не произошло, к продолжительности этого интервала при его неограниченном уменьшении.

Среднее время восстановления есть математическое ожидание времени восстановления оборудования.

Упрощенно можно записать следующие соотношения между вероятностями безотказной работы (p) и отказа (q), интенсивностями отказов (λ) и восстановлений (μ) элементов

$$q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}; \quad p = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

3. Математическая модель анализа надежности газораспределительной системы [21]. Носит оценочный характер. Объектом исследования является сложный элемент, состоящий из параллельно и последовательно соединенных звеньев – ЛУ трубопроводов и КС.

При создании модели были введены следующие допущения:

1. Газораспределительная система рассматривается как отдельный элемент системы газоснабжения, вне связи с сырьевым источником газа и потребителем газа.

2. Задана принципиальная схема газораспределительной системы: число ниток труб в общем случае разного диаметра между газораспределительными станциями МГ и потребителями газа крупного территориального образования. Некоторые газопроводы могут иметь КС для компенсации потерь давления при подаче газа удаленным потребителям. Для этих газопроводов, которые могут состоять из нескольких трубопроводов, задается: число линейных участков; число КС; число установленных газоперекачивающих агрегатов (ГПА); число резервных ГПА. Резервные агрегаты предусмотрены только на компрессорных станциях. Линейная часть газораспределительной системы не дублируется.

3. Рассматриваются только стационарные состояния ГС, переходные режимы не рассматриваются.

4. Среди свойств надежности газораспределительной системы учитываются его безотказность и ремонтпригодность (заданы интенсивности отказов и восстановлений ниток и газоперекачивающих агрегатов). Причем потоки отказов и восстановлений оборудования (ГПА и ниток трубопроводов) являются простейшими потоками.

5. Учитываются только аварийные отключения оборудования, текущие ремонты и ремонты в виде профилактики. Отключения оборудования в планово-предупредительный ремонт в данной постановке не рассматриваются.

В общем виде задача оценки надежности формулируется следующим образом: исходя из схемы соединения элементов газораспределительной системы, определенного способа резервирования, а также надежности линейных участков трубопроводов и газоперекачивающих агрегатов, характеризующих аварийность и ремонтпригодность, определяются интегральные показатели надежности ГС, а именно: ряд распределения вероятностей работоспособного состояния газопровода, математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) пропускной способности МГ, коэффициент надежности газопровода (K_n), средний процент потерь пропускной способности ГС, связанных с отказами основного оборудования.

Для анализа надежности ГС используется схема «гибели – размножения». Это аналитический метод, который рассматривает объект на уровне случайного процесса и предполагает определение переходных вероятностей из одного состояния в другое, составление и решение системы алгебраических уравнений марковского процесса.

Схема «гибели – размножения» хорошо себя зарекомендовала при анализе надежности систем однородных элементов [23]. В данной работе ГС рассматривается в виде совокупности как однородных, так и неоднородных систем, поэтому для приведения его во втором случае к однородному виду могут быть использованы методы эквивалентирования [26], когда исходная система неоднородных элементов заменяется системой из однородных элементов. В качестве условий эквивалентирования рассматриваются равенства: числа исходных и эквивалентных элементов (ниток), суммарных пропускных способностей и их математических ожиданий в аварийном простом в однородной и неоднородной системах.

Схема «гибели – размножения» используется для восстанавливаемых после ремонта элементов и предполагает наличие резервов.

Линейная часть (ЛЧ) ГС состоит из n одинаковых (эквивалентных) ниток, резерв в общем случае не рассматривается. Время безотказной работы каждой нитки распределено по показательному закону с интенсивностью отказа λ .

КС ГС может состоять из $(n' + r)$ одинаковых ГПА соответствующего типа. Время безотказной работы каждого ГПА распределено по показательному закону, причем n' агрегатов может находиться в рабочем состоянии и иметь интенсивность отказа, равную λ' , r агрегатов может находиться в резерве и в этом состоянии не отказывать.

Схема «гибели – размножения» предусматривает, что каждый отказавший рабочий агрегат заменяется из резерва (из числа r), а каждый восстановленный агрегат поступает в резерв.

Каждый отказавший элемент (нитка или агрегат) ремонтируется одной ремонтной бригадой. Общее количество ремонтных бригад равно R для ЛЧ и R' для КС. Время ремонта распределено по показательному закону с интенсивностью восстановления μ для ЛЧ и μ' для КС. Если все ремонтные бригады заняты, то отказавший элемент становится в очередь и ожидает начала своего ремонта.

Работа таких систем может описываться процессом «гибели – размножения». Обозначим через P_k вероятность того, что в системе в момент t неисправны k элементов из n или n' , при этом вероятность P_k в общем случае определяется по формуле:

$$P_k = \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{k-1}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_k} \cdot P_0,$$

где

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1}{\mu_1 \cdot \mu_2} + \dots + \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{k-1}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_k}}.$$

Для ЛЧ МГ параметры процесса λ_{k-1} и μ_k определяются формулами:

$$\lambda_{k-1} = (n - k + 1) \cdot \lambda \text{ при } 0 < k \leq n,$$

$$\mu_k = \begin{cases} k \cdot \mu, & \text{если } k \leq R \\ R \cdot \mu, & \text{если } k > R. \end{cases}$$

Для КС ГС параметры процесса λ_{k-1} и μ_k определяются формулами:

$$\lambda_{k-1} = \begin{cases} n' \cdot \lambda, & 0 \leq k - 1 \leq r \\ (n' + r - k + 1) \cdot \lambda, & r \leq k - 1 \leq n' + r \end{cases}$$

$$\mu_k = \begin{cases} k \cdot \mu', & \text{если } k \leq R' \\ R' \cdot \mu', & \text{если } k > R'. \end{cases}$$

Таким образом, для звеньев ГС определяются ряды распределения работоспособного состояния ЛУ и КС. Первый член таких рядов представляет вероятность того, что все элементы (трубопроводы или ГПА) находятся в рабочем состоянии, и пропускная способность составляет суммарную пропускную способность всех этих элементов; второй член ряда – это вероятность того, что отказал один элемент и пропускная способность объекта уменьшится на пропускную способность отказавшего элемента и т.д.; последний член ряда покажет вероятность того, что отказали все элементы и пропускная способность равна нулю. Сумма всех этих вероятностей равна единице.

Затем осуществляется композиция (перемножение) рядов распределения элементов. Композиция осуществляется как для параллельно соединенных элементов, так и для последовательно соединенных сложных элементов. При этом в первом случае получаемые произведения вероятностей будут соответствовать сумме пропускных способностей входящих элементов, во втором случае – дискретной пропускной способности, связанной с ее наименьшим значением одного из рядов распределения.

В результате этих вычислений определяется конечный ряд распределения вероятностей работоспособного состояния газораспределительной системы в целом $P(Q)$, Q – пропускная способность трубопроводов. По нему определяются следующие интегральные показатели надежности.

Математическое ожидание пропускной способности ГС за рассматриваемый расчетный интервал времени

$$M[Q] = \sum_{i=1}^I Q_i \cdot p_i(Q_i),$$

где $p_i(Q_i)$ – вероятность работоспособного состояния ГС Q_i , $i = \overline{1, I}$; I – количество членов в результирующем ряду распределения $P(Q)$.

Дисперсия и с.к.о. пропускной способности МГ

$$D[Q] = \sum_{i=1}^I (Q_i - M[Q])^2 \cdot p_i(Q),$$

$$\sigma[Q] = \sqrt{D[Q]}.$$

Коэффициент надежности газопровода K_H

$$K_H = \frac{M[Q]}{Q_H},$$

где Q_H – номинальное значение пропускной способности ГС.

Средний процент потерь пропускной способности МГ, связанных с отказами основного оборудования

$$K_{II} = (1 - K_H) \cdot 100\%$$

4. Пример расчета показателей надежности газораспределительной системы

Для иллюстрации изложенного подхода к определению интегральных показателей надежности была рассмотрена условная газотранспортная система, состоящая из двух параллельно работающих ветвей, эквивалентная схема ГС приведена на рис. 1.

Линейные участки первой ветви ГС состоят из двух параллельно работающих трубопроводов без резерва и одной КС. Компрессорная станция содержит 5 параллельно работающих ГПА (4 рабочих и 1 резервный), ЛУ и КС являются последовательно включенными звеньями. Вторая ветвь состоит из одноконтурного газопровода без КС.

На интегральные показатели надежности оказывает влияние число ремонтных бригад, здесь их влияние не рассматривалось. Для каждого линейного участка и компрессорной станции было предусмотрено по одной ремонтной бригаде.

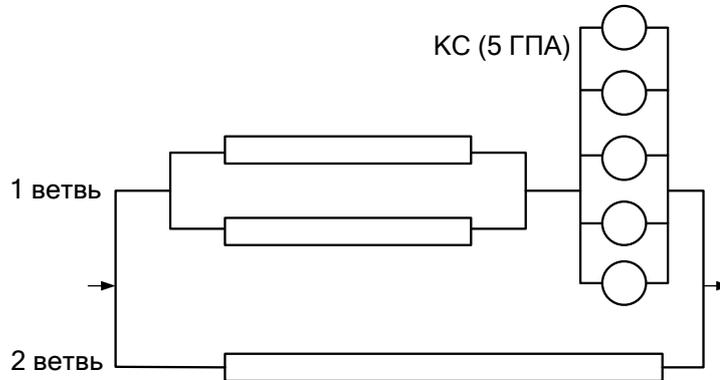


Рис. 1. Эквивалентная схема условной газораспределительной системы

Исходные условные надежностные и технико-технологические параметры ЛЧ и ГПА сведены в таблице 1.

Данная газораспределительная система подает газ от ГРС МГ до потребителей промышленности и энергетики крупного территориального образования. Её пропускная способность равна $Q_H = 0.4$ млрд. $m^3/год$, длина – 250 км.

Таблица 1. Исходные данные

Показатели / Indicators	Трубы		ГПА
	1 ветвь	2 ветвь	
Интенсивность отказов. ЛЧ (1/год км)	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,63 \cdot 10^{-3}$	
ГПА (1/год агр)			3,65
Интенсивность восстановлений (1/год)	108,04	171,44	90,88

На основе математической модели анализа надежности ГС были вычислены ряды распределения вероятностей работоспособного состояния условной газораспределительной системы. Математическое ожидание ее пропускной способности равно $M(Q) = 0,392$ млрд. м³/год, коэффициент надежности $K_n = 0,392/0,4 = 0,98$.

Были выполнены предварительные расчеты по оценке влияния интенсивностей отказов и восстановлений на изменение интегральных показателей надежности ГС. Исследования показали, что если увеличить интенсивности отказов трубопроводов и газоперекачивающих агрегатов на 10% от основного варианта при неизменных интенсивностях восстановлений этих элементов, то коэффициент надежности составит $K_n = 0,972$; при уменьшении интенсивностей восстановлений трубопроводов и ГПА на 10% при неизменных интенсивностях отказов этих элементов коэффициент надежности будет равен $K_n = 0,984$.

Таким образом, очевидно, что при изменении исходных показателей надежности элементов ГС на одинаковую величину их влияние на изменение интегральных показателей надежности ГС имеет разную силу. Такие исследования могут быть полезны в изучении влияния исходных показателей надежности разного оборудования на интегральные показатели надежности сложных устройств.

Выводы. 1. Все возрастающая роль природного газа в обеспечении комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований обуславливает актуальность исследований по совершенствованию методов анализа надежности газораспределительных систем. 2. На основе предложенной математической модели анализа надежности ГС возможны исследования влияния показателей интенсивности отказов и интенсивности восстановлений элементов, характеризующих безотказность и ремонтпригодность газотранспортных систем на ее интегральные показатели надежности.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (FWEU-2021-0002 № АААА-А21-121012090012-1) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовые отчеты ОАО «Газпром». Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2020> (дата обращения: 01.07.2021).
2. Ньюшлосс Д., Ряпин И. Ю. Тенденции развития распределенной генерации. Энергосбережение. 2012. № 7. С. 18-26.
3. Сурнин Н. В. Многоуровневое моделирование интегрированных энергетических систем для комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований // Системные исследования в энергетике. Сборник трудов молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Иркутск. 2016. вып. 46. С. 38-4.
4. Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов М.: ИАЦ «Энергия». 2007. 192 с.
5. Вентцель С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа. 2001. 575 с.
6. Бусленко Н. П., Шнейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) и его реализация на ЭВМ. М.: Наука. 1969. 331 с.
7. Афанасьев А.А., Кифер Ю.И., Подберезкин А.М., Райкин А.Л. Методы анализа надежности газотранспортных и газодобывающих предприятий // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. Иркутск. 1975. Вып. 5. С. 73-79.
8. Александров А.В. Надежность систем дальнего газоснабжения. М.: Недра. 1976.
9. Ставровский Е.Р., Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Методы расчета надежности магистральных газопроводов. Новосибирск: Наука. 1982. 126 с.

10. Вольский Э.Л., Гарляускас А.И., Герчков С.В. Надежность и оптимальное резервирование газовых промыслов и магистральных газопроводов. М.: Недра. 1980. 279 с.
11. Илькевич Н.И. Оптимизация надежности газотранспортных систем как элемента Единой газоснабжающей системы // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. Вып. 1. Иркутск. 1974. С. 50 - 67.
12. Илькевич Н.И., Рабчук В.И., Хрусталева Н.М. Исследование надежности характеристик газотранспортных систем, используемых в задаче оптимального проектирования структуры Единой газоснабжающей системы с учетом надежности // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. Каунас. 1982. Вып. 26. С. 164-175.
13. Акоев Е.П. Статистическое моделирование газопроводов // Транспорт и хранение газа. М.. 1978. Вып. 11. С. 17 - 21.
14. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справ. в 4 т.. М.: Недра. 1994.
15. Convention on the transboundary effects of industrial accidents. Convention on the protection and use of transboundary watercourses and international lakes/ Safety Guidelines And Good Practices For Pipelines: Printed at United Nations. Geneva. 2008. 20 p.
16. Xia_Wu, Changjun_Li, Yufa_He, Wenlong_Jia Operation Optimization of Natural Gas Transmission Pipelines Based on Stochastic Optimization Algorithms: A Review //Mathematical Problems in Engineering Volume 2018. P.18.
17. Witek M. Steel Pipeline Failure Probability Evaluation Based on In-line Inspection Results //Pipeline Technology Journal. 3/2018. Pp. 16-21.
18. Witek M. Gas transmission failure probability estimation and defect repairs activities based on in-line inspection data //Engineering Failure Analysis. Volume 70. 2016. Pp. 255-272.
19. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем. Режим доступа: <https://kit-e.ru/technologies/obzor-programmnyh-kompleksov-po-raschetu-nadezhnosti-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem/> (дата обращения: 01.07.2021).
20. Портал знаний StatSoft. Режим доступа: <http://www.statistica.ru/> (дата обращения: 01.07.2021).
21. Илькевич Н. И., Дзюбина Т. В., Калинина Ж. В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск: Наука. 2014. 217 с.
22. Дьяков А.Ф., Стенников В.А., Сендеров С.М. и др. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука. 2014. 284 с.
23. Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М.: Советское радио. 1969. 400 с.
24. Dr. János Sztrik Basic Queueing Theory. University of Debrecen, Faculty of Informatics. 2012. 193 p.
25. Erik A. van Doorn Shell Polynomials and Dual Birth-Death Processes, Department of Applied Mathematics. University of Twente. 2016. V. 12. 15 p.
26. Дубицкий М.А., Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах. Ангарск: АГТА. 2015. 365 с.

UDK 621.311.1

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR ANALYZING AND ENSURING THE
RELIABILITY OF GAS DISTRIBUTION SYSTEMS IN THE TASKS OF INTEGRATED
POWER SUPPLY OF LARGE TERRITORIAL FORMATIONS**

Nikolay I. Ilkevich

Doctor of engineering sciences, e-mail: ilkev@isem.irk.ru

Tatyana V. Dzyubina

PhD., Senior Researcher, e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Zhanna V. Kalinina

PhD., Researcher, e-mail: zhannochka_k@mail.ru

Melentiev Energy Systems Institute

of Siberian branch of Russian Academy of Science (ESI SB RAS),

664033 Irkutsk, Russia, Lermontov street 130.

Abstract. The **Relevance of the research** is due to the need for active gasification of large territorial entities (new residential agglomerations under construction, cottage and dacha settlements, as well as large industrial complexes). On the other hand, the increase in the total length of gas distribution systems and the complexity of the configuration of gas pipeline schemes continues. These factors affect the reliability of the gas distribution systems and place high demands on the part of energy consumers for trouble-free operation. **Purpose.** The main initial reliability information used for analyzing the reliability of gas pipelines is the failure rates of its elements: individual sections of the linear part, gas pumping units, etc., and the recovery rates of these elements. These indicators characterize such properties of reliability as reliability and maintainability. The purpose of the research is to assess the impact of reliability and maintainability of equipment on the integral reliability indicators of the gas distribution system (GDS). These include the expectation, variance and standard deviation of the throughput of the GDS, as well as the reliability coefficient of the pipeline. **Methods:** equivalent methods, analytical method at the level of random Markov processes - the scheme of "death and reproduction", the theorem of addition and multiplication of probabilities, the composition of distribution series; mathematical model of reliability analysis of the designed main gas pipeline. **Results.** On the basis of a mathematical model for assessing the reliability of the designed main gas pipeline and the developed computational program, calculations were performed to determine the integral indicators of the reliability of the conventional gas distribution system. So, studies have shown that when the initial reliability indicators (failure rates and recoveries) of the GDS elements are changed by the same amount, their effect on the change in the integral reliability indicators of the GDS has a different effect. **Conclusion.** On the basis of the proposed mathematical model for analyzing the reliability of the GDS, the influence of the failure rate indicators and the recovery rate of elements characterizing the reliability and maintainability of gas transmission systems on its integral reliability indicators, in particular, on the reliability coefficient, is shown.

Keywords: gas distribution systems, mathematical model, reliability assessment, integral indicators of reliability, failure rates and recoveries.

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (FWEU-2021-000 № AAAA-A21-121012090012-1) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030.

REFERENCES

1. Godovyie otchety OAO «Gazprom» [Annual reports of OAO Gazprom]. Available at: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2020> (accessed 01.07.2021) (in Russian)
2. Nyushloss D., Ryapin I. YU. Tendentsii razvitiya raspredelennoy generatsii [Trends in the development of distributed generation]. Energoberezhniye = Energy saving. 2012. № 7. Pp. 18-26 (in Russian)

3. Surnin N. V. *Mnogourovnevoye modelirovaniye integrirovannykh energeticheskikh sistem dlya kompleksnogo energosnabzheniya krupnykh territorial'nykh obrazovaniy* [Multilevel modeling of integrated energy systems for integrated power supply of large territorial entities]. *Sistemnyye issledovaniya v energetike. Sbornik trudov molodykh uchenykh ISEM SO RAN = System research in energy. Collection of works of young scientists ISEM SB RAS.* Irkutsk. 2016. Vol. 46. P. 38-44 (in Russian)
4. *Nadezhnost' sistem energetiki. Sbornik rekomenduyemykh terminov* [Reliability of energy systems. Collection of recommended terms]. IATS «Energiya»=IAC "Energy". 2007. 192 p.
5. Venttsel' S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. *Vysshaya shkola = Higher school.* 2001. 575 p (in Russian)
6. Buslenko N. P., Shneyder YU. A. *Metod statisticheskikh ispytaniy (metod Monte-Karlo) i yego realizatsiya na EVM* [Method of statistical tests (Monte Carlo method) and its implementation on a computer]. *Nauka = Science.* 1969. 331 p. (in Russian)
7. Afanas'yev A.A., Kifer Yu.I., Podberezkin A.M., Raykin A.L. *Metody analiza nadezhnosti gazotransportnykh i gazodobyvayushchikh predpriyatii // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE* [Methods for analyzing the reliability of gas transmission and gas production enterprises // Methodological issues of research on the reliability of TSB]. Irkutsk. 1975. Vol. 5. Pp. 73-79 (in Russian)
8. Aleksandrov A.V. *Nadezhnost' sistem dal'nego gazosnabzheniya* [Reliability of long-distance gas supply systems]. *Nedra,* 1976 (in Russian)
9. Stavrovskiy Ye.R., Sukharev M.G., Karasevich A.M. *Metody rascheta nadezhnosti magistral'nykh gazoprovodov* [Methods for calculating the reliability of main gas pipelines]. *Novosibirsk: Nauka = Science.* 1982. 126 p. (in Russian)
10. Vol'skiy E.L., Garlyauskas A.I., Gerchkov S.V. *Nadezhnost' i optimal'noye rezervirovaniye gazovykh promyslov i magistral'nykh gazoprovodov* [Reliability and optimal redundancy of gas fields and main gas pipelines]. *Nedra.* 1980. 279 p. (in Russian)
11. Il'kevich N.I. *Optimizatsiya nadezhnosti gazotransportnykh sistem kak elementa Yedinoy gazosnabzhayushchey sistemy // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE* [Optimization of the reliability of gas transmission systems as an element of the Unified gas supply system // Methodological issues of the study of the reliability of the TSB]. Vol. 1. Irkutsk. 1974. Pp. 50-67 (in Russian)
12. Il'kevich N.I., Rabchuk V.I., Khrustaleva N.M. *Issledovaniye nadezhnostnykh kharakteristik gazotransportnykh sistem, ispol'zuyemykh v zadache optimal'nogo proyektirovaniya struktury Yedinoy gazosnabzhayushchey sistemy s uchetom nadezhnosti // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE* [Investigation of the reliability characteristics of gas transmission systems used in the problem of optimal design of the structure of the Unified gas supply system taking into account reliability // Methodological issues of research on the reliability of the TSB]. *Kaunas.* 1982. Vol. 26. Pp. 164-175 (in Russian)
13. Akoyev Ye.P. *Statisticheskoye modelirovaniye gazoprovodov* [Statistical modeling of gas pipelines]. *Transport i khraneniye gaza = Gas transport and storage.* 1978. Vol. 11. Pp. 17-21 (in Russian)
14. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya: Sprav. v 4 t.* [Reliability of energy systems and their equipment: Ref. in 4 volumes] *M.: Nedra.* 1994. 288 p. (in Russian)
15. *Convention on the transboundary effects of industrial accidents. Convention on the protection and use of transboundary watercourses and international lakes/ Safety Guidelines And Good Practices For Pipelines: Printed at United Nations.* Geneva. 2008. 20 p.

16. Xia Wu, Changjun Li, Yufa He, Wenlong Jia Operation Optimization of Natural Gas Transmission Pipelines Based on Stochastic Optimization Algorithms: A Review //Mathematical Problems in Engineering Volume 2018. P.18.
17. Witek M. Steel Pipeline Failure Probability Evaluation Based on In-line Inspection Results // Pipeline Technology Journal. 3/2018. Pp. 16-21.
18. Witek M. Gas transmission failure probability estimation and defect repairs activities based on in-line inspection data // Engineering Failure Analysis. Volume 70. 2016. Pp. 255-272.
19. Obzor programmnykh kompleksov po raschetu nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Review of software systems for calculating the reliability of complex technical systems]. Available at: <https://kit-e.ru/technologies/obzor-programmnyh-kompleksov-po-raschetu-nadezhnosti-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem/> (accessed 01.07.2021) (in Russian)
20. StatSoft Knowledge Portal. Available at: <http://www.statistica.ru/> (accessed 01.07.2021) (in Russian)
21. Il'kevich N. I., Dzyubina T.V., Kalinina Zh. V. Mnogourovnevoye modelirovaniye razvitiya sistem gazosnabzheniya [Multilevel modeling of the development of gas supply systems]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 217 p. (in Russian)
22. D'yakov A.F., Stennikov V.A., Senderov S.M. i dr; otv. red. N.I. Voropay. Nadezhnost' sistem energetiki: Problemy, modeli i metody ikh resheniya [Reliability of energy systems: Problems, models and methods for their solution]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 284 p. (in Russian)
23. Novikov O.A., Petukhov S.I. Prikladnyye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya [Applied questions of queuing theory.] M.: Sovetskoye radio = Soviet radio. 1969. 400 p. (in Russian)
24. Dr. János Sztrik Basic Queueing Theory. University of Debrecen, Faculty of Informatics. 2012. 193 p.
25. Erik A. van Doorn Shell Polynomials and Dual Birth-Death Processes, Department of Applied Mathematics. University of Twente. 2016. V. 12. 15 p.
26. Dubitskiy M.A., Rudenko Yu.N. Chel'tsov M.B. Vybor i ispol'zovaniye rezervov generiruyushchey moshchnosti v elektroenergeticheskikh sistemakh [Selection and use of generating capacity reserves in electric power systems]. 2-oye izd. pererab. i dop. Angarsk: AGTA. 2015. 365 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 09.07.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2021; принята к публикации 30.09.2021.

The article was submitted 09.07.2021; approved after reviewing 15.09.2021; accepted for publication 30.09.2021.